

➤ Indicateurs thermiques et hydrologiques des cours d'eau du bassin de la Saône : observations et modélisations

Florentina Moatar, Léo Rouchy, Guillaume Hevin, Laurent Valette, Flora Branger

INRAE, UR RiverLy

Rapport final de l'étude « Couplage des modélisations hydrologiques et thermiques dans le bassin de la Saône » 2021-2024

Table des matières

1. Contexte et objectifs	10
2. Chroniques de températures, débits et leur représentativité	11
2.1. Données de températures de l'eau.....	11
2.2. Données de débits	12
2.3. Stations hydrologiques et thermiques communes.....	13
2.4. Représentativité climatique, physiographique, pédologique et d'occupation du sol des stations.....	13
3. Signatures thermiques et hydrologiques	16
3.1. Métriques et signatures.....	16
3.2. Signatures choisies	17
3.2.1. Signatures hydrologiques	17
3.2.2. Signatures thermiques.....	18
4. Caractérisation de l'atténuation du réchauffement des cours d'eaux en fonction des classes lithologiques	20
4.1. Classification des signatures suivant les classes lithologiques	20
4.2. Complémentarité des signatures hydrologiques et thermiques	24
4.3. Apports et limites du travail sur les signatures	27
4.4. Analyse des signatures par profil longitudinal de rivière	29
5. Construction d'un modèle couplé hydrologie-thermie	33
5.1. Développement informatique pour l'application au bassin de la Saône.....	33
5.2. Architecture du nouveau modèle couplé.....	34
5.3. Construction de la modélisation hydrologique J-2000	35
5.3.1. Principes de J2000.....	35
5.3.2. Maillage et réseau hydrographique theorique.....	36
5.3.3. Prise en compte des usages de l'eau.....	38
5.3.4. Paramétrisation initiale du modèle.....	38
5.3.5. Calibration du modèle hydrologique	40
5.4. Construction du modèle thermique T-NET, couplé au modèle J-2000	42
5.4.1. Principe du modèle T-NET et données d'entrée.....	42
5.4.2. Couplage des réseaux hydrographiques théorique et observé.....	48
5.4.3. Paramétrisation de la géométrie hydraulique.....	49
5.4.4. Calcul et paramétrisation de la végétation et de l'ombrage.....	50
6. Diagnostic du modèle couplé	56

6.1.	Performance globale sur 246 stations de température	56
6.2.	Performance saisonnière	57
6.3.	Analyse de sensibilité aux différentes entrées.....	59
6.4.	Comparaison des performances en fonction de la lithologie	61
6.5.	Comparaison des performances en fonction des signatures thermiques.....	61
6.6.	Éléments de diagnostic des apports latéraux	63
7.	Evolution des températures saisonnières simulées (1980-2021)	67
7.1.	Confrontation des simulations aux observations pour la Saône à Macon.....	67
7.2.	Tendances basées sur les simulations	67
8.	Analyse des scénarios de plantation de ripisylve	68
9.	Limites de la modélisation	72
10.	Conclusions et perspectives	72
11.	Références bibliographiques	74
12.	Remerciements	75

Annexes :

Signatures thermiques des cours d'eau du bassin de la Saône

Signatures hydrologiques des cours d'eau du bassin de la Saône

Simulations thermiques et hydrologiques pour les cours d'eau du bassin de la Saône (246 stations) – document annexe

Résumé

La structuration des communautés aquatiques dans les réseaux hydrographiques dépend de plusieurs variables environnementales, qui contrôlent l'habitat de ces organismes. La température et les débits sont parmi les plus importantes car elles affectent le bon fonctionnement des communautés (continuités, refuges physiques, thermiques, ...). Dans le contexte des évolutions climatiques, la caractérisation spatiale et temporelle de ces grandeurs à l'échelle des bassins hydrographiques est donc d'une importance majeure et le bassin de la Saône est d'un intérêt particulier. Il présente des enjeux liés à la thermie des cours d'eau très contrastés, en lien avec la forte variabilité de la lithologie (zones karstiques notamment) et des usages potentiels de l'eau. La taille du bassin est assez grande pour considérer l'influence cumulée des échanges nappe-rivière, du développement de la ripisylve, ou plus globalement l'influence des aménagements et des activités humaines.

Ce rapport présente le travail réalisé dans le cadre du projet « Couplage entre modélisations hydrologiques et thermiques spatialisées pour caractériser l'habitat thermique des cours d'eau du bassin de la Saône », financé par l'AERMC et INRAE.

Il a abouti à plusieurs résultats :

- 1) la collecte d'une base de données de températures des cours d'eau à l'échelle horaire (646 stations) auprès de plusieurs acteurs de l'eau (Fédérations de Pêche, DREAL, OFB, ...) et composée de suivis hétérogènes (chroniques estivales, annuelles, avec des suivis variant entre 1 mois et 20 ans, parfois discontinus, dans la période 2005-2021) ; Ces données ont suivi un protocole de critique et validation (0.6% des mesures ont été enlevées). Certaines stations thermiques ont pu aussi être couplées à des stations hydrométriques (44 stations), suivant des critères de proximité.
- 2) le calcul et l'analyse spatiale de huit signatures thermiques au niveau de 342 stations thermiques avec un suivi au moins annuel et 91 stations hydrométriques. Le choix de ces signatures a été fait principalement pour caractériser la genèse des écoulements annuels ou pendant la période d'étiage et l'influence des apports de chaleur des aquifères aux cours d'eau. En effet, dans le contexte du changement climatique, les eaux souterraines ont une importance majeure dans le soutien d'étiage et le maintien des températures plus froides l'été et plus chaudes en hiver, compte tenu des différences de température et de dynamique entre les deux types de milieux. Nous avons montré que les quatre classes lithologiques dominantes (calcaires purs, calcaires mixtes, argiles et socle) pouvaient être discriminantes pour les signatures thermiques et dans une moindre mesure pour les signatures hydrologiques. La complémentarité des deux types de signatures, a aussi permis de différencier des types de substrat et les stations de suivi suivant leur sensibilité au réchauffement atmosphérique.
- 3) la mise en place d'une modélisation couplée hydrologie-thermie, dont les simulations ont été comparées aux observations de débits et de températures. Les performances du modèle hydrologique sont satisfaisantes avec un KGE médian de 0.63 et un NSE médian de 0.5. Les performances du modèle thermique T-NET sont relativement bonnes en considérant les moyennes journalières, avec un RMSE médian de 2°C sur la base de 246 stations de suivi. La comparaison des moyennes saisonnières simulées et observées entre 1999 et 2022 pour la Saône à Macon, a montré des bonnes performances à la fois en terme de RMSE et de tendances long-terme.
- 4) l'analyse des évolutions long-terme des températures saisonnières simulées sur la Saône à Macon depuis 1980 a permis de mettre en évidence le réchauffement moyen de +0.5 à 0.6°C/décennie au printemps et en été et de +0.3 à +0.4 en hiver et à l'automne, ce qui est similaire aux tendances observées pour d'autres cours d'eau européens (Seyed-hashemi et al, 2022)..
- 5) L'exploitation de cette modélisation couplée pour analyser l'effet d'atténuation des températures maximales à partir des scénarios de restauration de la végétation en bord de rivière pour 15 bassins versants tests. Ainsi nous avons pu hiérarchiser les bassins versants tests en fonction du gain d'atténuation de la température. La Reyssoze et le Solnan sont deux bassins versants, où la plantation de ripisylve maximise l'atténuation des températures.
- 6) Des améliorations du modèle couplé (hydrologie-thermie) sont possibles compte tenu de l'application du modèle T-NET sur d'autres bassins (Beaufort et al, 2016). Nous avons identifié un lien entre les biais de modélisation et les signatures thermiques caractérisant la contribution des aquifères (TS, b, Tw30), indiquant une représentation imparfaite des flux de chaleur provenant des aquifères. Egalement la variabilité des simulations de température est plus importante par comparaison aux observations, montrant probablement une mauvaise estimation des temps de parcours dans le réseau hydrographique. Enfin, la caractérisation de la hauteur de la végétation pourra se faire de manière plus précise à partir des données LIDAR (projet ResTeau, AERMC, en cours), permettant une amélioration de l'effet de l'ombrage.

Table des figures

Figure 1. Contributeurs et disponibilité temporelle des données	11
Figure 2. Exemple de chroniques en 2019 de températures journalières de trois rivières (graphique du haut) caractérisées par des températures atmosphériques similaires (graphique du bas)	12
Figure 3. Stations thermiques et hydrologiques non influencées, ainsi que les stations couplées hydrologie/thermie constituant la base de données.....	13
Figure 4. Carte des conditions hydroclimatiques moyennes du bassin de la Saône sur la dernière période de référence (1990-2020): températures atmosphériques (°C), précipitations totales annuelles (mm/an), évapotranspiration potentielle (mm/an)	14
Figure 5. Cartes d'occupation des sols : à gauche à partir du référentiel Corine Land Cover, à droite à partir du produit OSO (https://www.cesbio.cnrs.fr).....	14
Figure 6. Distribution des classes d'occupation du sol suivant les territoires : Doubs, Grande Saône, Petite Saône	14
Figure 7. Entités pédologiques du bassin de la Saône (à gauche, la réserve utile, à droite, profondeur des sols). « Carte de la profondeur du sol issue de la Base de Données Géographique des Sols de France » (Le Bas, 2021) et « Carte de la Réserve Utile en eau issue de la Base de Données Géographique des Sols de France » (Le Bas, 2018), basés sur l'European Soil Geographical Data Base of Europe.	15
Figure 8. Composantes du régime thermique d'une rivière: magnitude, fréquence, durée, taux de variation, occurrence	16
Figure 9. Schéma conceptuel de l'influence des signaux des flux de chaleur des aquifères sur la température en cours d'eau (Briggs et al, 2018).....	17
Figure 10. Exemples des régressions entre les températures hebdomadaires des quelques cours d'eau (axe des ordonnées) et les températures hebdomadaires atmosphériques (axes des abscisses) sur la base de la littérature. Les pentes les plus faibles désignent des apports importants de flux de chaleur provenant des aquifères	17
Figure 11. Schéma conceptuel des signatures hydrologiques retenues	18
Figure 12. Schéma conceptuel des signatures thermiques retenues.....	19
Figure 13. Classification des signatures hydrologiques suivant 4 classes lithologiques (calcaires purs (>90%), calcaires mixtes, roches cristallines, argiles et marnes) : les différences non-significatives ne sont pas figurées ; les symboles « * » désignent une pvalue < 0.05, « ** », <0.01, « *** », <0.001, « **** », < 1e-4.....	22
Figure 14. Classification des signatures thermiques suivant 4 classes lithologiques (calcaires purs (>90%), calcaires mixtes, roches cristallines, argiles et marnes) : les différences non-significatives ne sont pas figurées ; les symboles « * » désignent une pvalue < 0.05, « ** », <0.01, « *** », <0.001, « **** », < 1e-4.....	23
Figure 15. Analyse en composantes principales des 44 stations, avec des signatures hydrologiques et thermiques disponibles aux stations proches : à gauche, le cercle des corrélations sur les F1 et F2 (variance expliquée de 69% du nuage de points) ; à droite, la matrice de corrélation des signatures sur les 3 axes principaux.....	24
Figure 16. Matrice de corrélation des signatures hydrologiques et thermiques.....	25
Figure 17. ACP des signatures hydrologiques. La variable explicative « lithologie » est figurée pour chaque station. Les stations avec une représentation faible dans les deux dimensions ($\cos^2 < 0.8$) ne sont pas figurées. Le centre de la classe lithologie est figuré par un point plus grand.	25
Figure 18. ACP des signatures thermiques. La variable explicative « lithologie » est figurée pour chaque station.....	26

Figure 19. Coefficients de corrélation Pearson entre signatures hydrologiques et thermiques et les facteurs confondants (surface bassin versant, altitude, température moyenne atmosphérique, précipitation moyenne annuelle).....	29
Figure 20. Profils en long des signatures thermiques du Doubs depuis la source. TS = pente de la régression entre température de l'eau et de l'air (moyennes hebdomadaires), b = intercepte de la régression entre température de l'eau et de l'air (moyennes hebdomadaires), Tw30 = moyenne des 30 jours consécutifs les plus chauds	30
Figure 21. Profils en long des signatures thermiques du Drugeon depuis la source. TS = pente de la régression entre température de l'eau et de l'air (moyennes hebdomadaires), b = intercepte de la régression entre température de l'eau et de l'air (moyennes hebdomadaires), Tw30 = moyenne des 30 jours consécutifs les plus chauds	31
Figure 22. Profils en long des signatures thermiques de la Loue depuis la source. TS = pente de la régression entre température de l'eau et de l'air (moyennes hebdomadaires), b = intercepte de la régression entre température de l'eau et de l'air (moyennes hebdomadaires), Tw30 = moyenne des 30 jours consécutifs les plus chauds	31
Figure 23. Profils en long des signatures thermiques de Ardière depuis la source. TS = pente de la régression entre température de l'eau et de l'air (moyennes hebdomadaires), b = intercepte de la régression entre température de l'eau et de l'air (moyennes hebdomadaires), Tw30 = moyenne des 30 jours consécutifs les plus chauds	32
Figure 24. Profils en long des signatures thermiques du Dessoubre depuis la source. TS = pente de la régression entre température de l'eau et de l'air (moyennes hebdomadaires), b = intercepte de la régression entre température de l'eau et de l'air (moyennes hebdomadaires), Tw30 = moyenne des 30 jours consécutifs les plus chauds	32
Figure 25. Profils en long des signatures thermiques de l'Ognon depuis la source. TS = pente de la régression entre température de l'eau et de l'air (moyennes hebdomadaires), b = intercepte de la régression entre température de l'eau et de l'air (moyennes hebdomadaires), Tw30 = moyenne des 30 jours consécutifs les plus chauds	33
Figure 26. Schéma détaillé du fonctionnement de T-NET, TnetRUI, TnetShape et le lien avec le modèle hydrologique J2000.....	34
Figure 27. Diagramme descriptif des processus hydrologiques représentés dans J2000 (source : Horner, 2020).....	36
Figure 28. Appartenance des HRUs aux classes d'occupation des sols, de pédologie et géologie	37
Figure 29. Réseau hydrographique J2000-Saône et unité de réponse hydrologique (HRU).....	38
Figure 30. Performance du modèle hydrologique amélioré J2000 Saône.....	41
Figure 31. Principe du modèle T-NET et données d'entrée du modèle (d'après Beaufort, 2014).....	42
Figure 32. Bilan énergétique, température d'équilibre, coefficient d'échange thermique et propagation.....	44
Figure 33. Réseaux hydrographiques des deux modèles : J2000, réseau théorique, à gauche ; TNET, réseau BD Topage, à droite.....	48
Figure 34. Représentation de l'ombrage en fonction de la végétation rivulaire (modifiée, d'après Li et al., 2012).	52
Figure 35. Exemples de variations saisonnière d'indice foliaire pour (a) un aulne noir (Tillack et al., 2014) et (b)	

et dans une chênaie (Bréda, 1999) (d'après Beaufort, 2014).....	53
Figure 36. Exemples d'évolutions horaires (de 7h à 21h) de l'ombrage dû aux positions relatives du cours d'eau et du soleil. Cas du 15 juillet, végétation fixe prise à 100% de couverture et une hauteur de canopée égale à 10 m (Beaufort, 2014).....	54
Figure 37. Densité de végétation (vc) sur chaque rive de tronçon modélisé dans TNET.....	55
Figure 38. Schéma conceptuelle de l'intégration de la ripisylve et de l'ombrage dans la modélisation T-NET ...	55
Figure 39. Distribution statistique des erreurs du modèle T-NET suivant les classes d'erreurs (RMSE, Biais et SD) : Tsim-Tobs ; valeur positive du biais implique une surestimation de la valeur observée.....	56
Figure 40. Carte des erreurs (RMSE et biais) de simulation de la température des cours d'eau du bassin de la Saône. Les biais sont satisfaisants entre -0.5 et +0.5°C ; Les biais > +0.5 montrent des valeurs simulées plus chaudes que les valeurs observées ; Les biais < -0.5 montrent des valeurs simulées plus froides que celles observées	57
Figure 41. Evolution mensuelle des erreurs de simulation (biais en haut, RMSE en bas) par catégorie de type de station – station en tête de réseau hydrographique (distance <30km depuis la source), station intermédiaire (distance entre 30 et 100 km), station aval (distance > 100 km depuis la source).....	58
Figure 42. Exemples de comparaison des simulations de température de l'eau aux observations pour deux rivières contrastées (la Saône aval, Ardière à Cercié).....	59
Figure 43. Changements dans la simulation de la température en fonction des variations dans les données d'entrée	60
Figure 44. Résultats de l'analyse de sensibilité du couplage TNET/EROS, réalisée pour le bassin de la Loire par Beaufort et al, 2016. Distribution des différences moyennes de température des rivières et de la variabilité de la température de l'eau en fonction des variations de la profondeur des rivières, du débit des eaux souterraines, du facteur d'ombrage, des conditions aux limites, de la largeur des rivières, du débit des rivières et de la vitesse d'écoulement de (a) - 50 % et (b) +50 % calculées dans les 128 stations entre 2008 et 2012.	60
Figure 45. Distribution des Biais de modélisation de la température au niveau des stations, en fonction de la classe lithologique dominante du bassin versant	61
Figure 46. Relation entre les biais de modélisation et les signatures thermiques aux stations.....	62
Figure 47. Carte des lithologies des tronçons des bassins de la Saône et de la Loire suivant 5 classes principales.....	63
Figure 48. Débits latéraux souterrains moyens simulés sur les bassins de la Loire et de la Saône, pour les mois de janvier et août 2012, selon les mêmes classes lithologiques.....	64
Figure 49. Définition de sous-bassins hydrogéologiques sur le sous-bassin de la Saône pour la redistribution des apports latéraux souterrains.....	65
Figure 50. Comparaison de plusieurs méthodes de calcul des apports latéraux souterrains à partir des sorties J2000 sur la Saône.....	66
Figure 51. Influence de la régionalisation des apports latéraux souterrains par sous-bassin hydrogéologique sur la température de l'eau simulée par T-NET sur la Saône.....	66
Figure 52. Tendances observées et simulées de températures saisonnières de l'eau de la Saône à Macon (simulation : 1980-2021 ; observation : 2000-2021, chronique EDF).....	67
Figure 53. Tendances observées et simulées de températures saisonnières de l'eau de la Saône à Macon (observations EDF).....	68

Figure 54. Localisation des 15 sous-bassins versants étudiés pour l'analyse de scénarios de restauration de la végétation rivulaire à partir du modèle T-NET	69
Figure 55. Cartographie du taux de végétation actuel (moyenne rive gauche et rive droite) par tronçon de calcul T-NET (bassin Reyssouze) et des taux de végétation pour trois scénarios	70
Figure 56. Cartographie de la température des tronçons de calcul T-NET (bassin Reyssouze) avec la simulation de référence et avec les trois scénarios de restauration de la ripisylve	71
Figure 57. Distribution statistique des températures simulées au niveau des tronçons du bassin de la Reyssouze (simulation de référence et simulations avec 3 scénarios de restauration de la ripisylve)	71
Figure 58. Hiérarchisation des gains de refroidissement obtenus par bassin versant et pour deux scénarios contrastés de restauration de la ripisylve	71

1. Contexte et objectifs

Le réchauffement de la température des cours d'eau est un fait avéré du fait du changement climatique et pourrait être exacerbé par les activités humaines. Les conséquences directes de ce réchauffement et des dépassements de certains seuils thermiques sont déjà visibles et affectent négativement le fonctionnement écologique, la santé humaine et les activités économiques. Malgré ces conséquences, nous manquons de données consolidées, bancarisées à grande échelle, ainsi que des modèles prédictifs permettant d'évaluer l'importance de ce réchauffement suivant les différents milieux et climats, influencés ou non par les eaux souterraines, par l'ombrage de la végétation, par les activités anthropiques. En effet, dans le contexte du changement climatique actuel et futur, il est nécessaire d'analyser la réponse des différents cours d'eau, ayant des capacités spécifiques pour atténuer les effets du réchauffement atmosphérique.

Pour aborder la question de la température dans les cours d'eau de façon spatialisée dans un bassin versant, plusieurs approches sont possibles. Les approches statistiques (exemple projet TIGRE <https://thermie-rivieres.inrae.fr/>) permettent de reconstituer des indicateurs de régime thermique sur la base de critères explicatifs (géologie, taille bassin, climat, etc), sur de grands territoires. Ils ne permettent pas par contre de se projeter dans le futur. Pour estimer la résilience des milieux en terme de régime thermique en fonction de scénarios climatiques, de végétation ou d'aménagements, les approches de modélisation à base physique sont les plus appropriées. Ces approches représentent explicitement les différents processus contrôlant les écoulements et les échanges thermiques. Elles permettent de réaliser des simulations en tout point et à tout pas de temps, sous projections climatiques et de tester différents scénarios d'aménagements et d'adaptation. Cependant, leur mise en œuvre pour des bassins régionaux (taille > 10 000 km²) est complexe, compte tenu des processus à prendre en compte et des données disponibles. Notamment, le régime thermique des cours d'eau dépend de la répartition et du bilan des flux de chaleur transférés de l'amont vers l'aval. Il est ainsi contrôlé par un nombre important de facteurs que l'on peut classer en cinq catégories : les conditions atmosphériques, l'hydrologie, la géomorphologie et la végétation, les échanges à l'interface eau/sédiments, et les actions anthropiques. En tête de réseau hydrographique l'ombrage, l'apport de chaleur provenant des résurgences des eaux souterraines sont des éléments importants à prendre en compte dans la modélisation. Pour les cours d'eau à l'aval, les échanges atmosphériques à l'interface eau-atmosphère deviennent prépondérants, et sont généralement plus facilement intégrables dans la modélisation.

Ce projet a plusieurs visés. D'abord de caractériser la sensibilité des cours d'eau au réchauffement en fonction d'un ensemble d'observations et d'indicateurs hydrologiques et thermiques, dénommés des signatures. L'analyse de ces signatures contribue dans un premier temps à la classification des stations suivant leur degré d'atténuation du réchauffement et leur lithologie. Ensuite de mettre en œuvre une modélisation spatialisée couplée, à base physique, de l'hydrologie et de la thermie de l'eau, afin de caractériser la variabilité spatio-temporelle de la température des cours d'eau et son évolution potentielle sous changement climatique. Cette modélisation couplée est validée à la fois avec des critères classiques d'erreur (biais, RMSE), mais aussi en considérant les signatures thermiques et hydrologiques, permettant ainsi de mettre en évidence les processus mal renseignés ou modélisés. Enfin, l'étape d'exploitation du modèle par des simulations des évolutions passées et futurs n'a pas pu être réalisée, compte tenu des résultats des modélisations qui nécessitent encore des améliorations. Ces améliorations sont listées également dans le rapport. Cependant le modèle mis en place, permet d'ores et déjà d'hierarchiser les rivières en terme de sensibilité au réchauffement et les possibilités d'atténuation de ce réchauffement par l'étude des scénarios de plantation de ripisylve en bordure des rivières. Quinze bassins versants ont été analysés dans le projet TEMPOVEGET. Un aperçu des premiers résultats est donné également dans ce rapport.

2. Chroniques de températures, débits et leur représentativité

2.1. Données de températures de l'eau

Une collecte importante des données de température des cours d'eau du bassin de la Saône a été réalisée en 2022 auprès de plusieurs producteurs de données. Cela a permis de collecter 646 stations avec des données horaires entre 2005-2021 (cf. Tableau 1). Ces stations ont des durées de suivi variant de 1 mois à 20 ans, avec une moyenne de 3 ans. Cependant ces suivis ne sont pas toujours consécutifs, et peuvent avoir lieu seulement l'été.

	Nombre de stations	Durée des chroniques (an)	Ordre de Strahler du tronçon	Aire du bassin versant (km²)	Pente du tronçon (%)	Altitude (m)
Doubs	151	6,4 [0,1 – 20,4]	3,1 [1 - 6]	689 [0,3 - 7028]	0,7 [0,009 – 17,9]	455 [183 – 981]
Grande Saone	354	2,3 [0,1 – 11,7]	3,2 [1 – 8]	342 [0,3 – 29008]	1,3 [0,002 – 20,1]	265 [164 – 602]
Petite Saone	121	3,2 [0,3 – 8,3]	3,6 [1 – 7]	751 [0,5 – 11773]	0,4 [0,002 – 3,6]	253 [175 – 446]
Total	626	3,4 [0,1 – 20,4]	3,2 [1 – 8]	506 [0,3 – 7028]	1,0 [0,002 – 20,1]	308 [164 – 981]

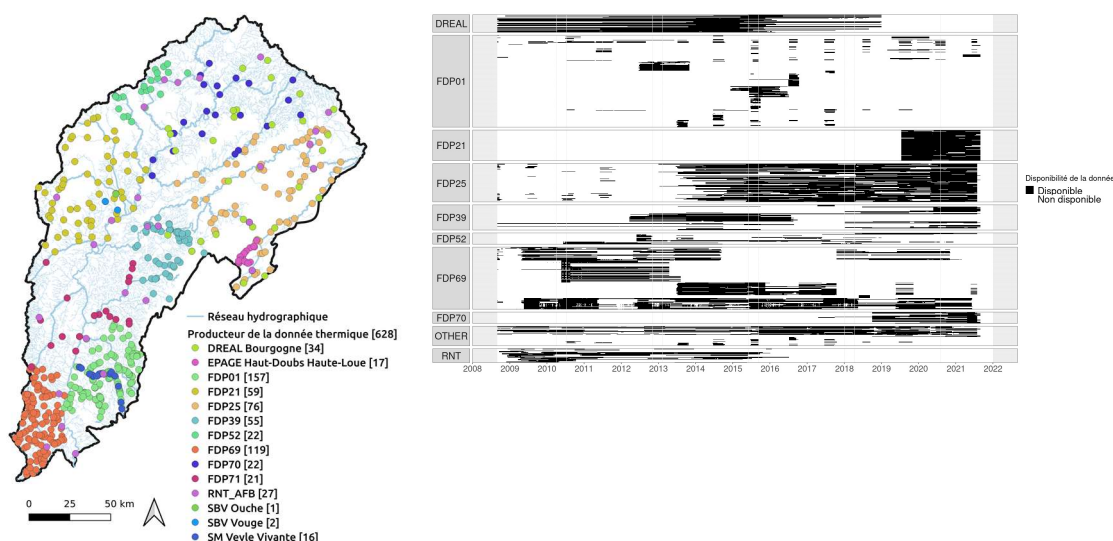
Tableau 1. Caractéristiques des stations thermiques ; moyenne [min-max]

Ainsi, 263 stations (43%) possèdent moins d'une année complète de suivi ; 126 stations (20%), possèdent 1 année entière; 220 stations (35%), entre 2 et 7 années de suivis; et finalement 15 stations (3%) ont plus de 8 années de suivis. La surface des bassins versants varie de 0,3 km² à 30.000 km². La durée des chroniques est variable suivant les secteurs pouvant influencer les analyses spatiales réalisées dans ce travail. On remarque notamment que les chroniques les plus longues sont sur le bassin versant du Doubs, et les plus courtes sur le secteur aval du bassin de la Saône.

En complément de la collecte des données, un travail de détection automatique des anomalies ponctuelles a été réalisé avec 10 filtres, présentés dans le rapport du projet TIGRE (Beaufort et al, 2020), ainsi qu'un diagnostic visuel systématique de chaque série chronologique. Ce travail a abouti au retrait de 0.6% des données.

Après critique, nous avons retenu 347 stations avec au moins une année complète de mesures, pour l'analyse des indicateurs thermiques et pour la validation des modélisations mises en place.

Figure 1. Contributeurs et disponibilité temporelle des données



A titre d'exemple, la Figure 2 (haut) présente les températures de l'eau (moyennes journalières) pour trois stations en 2019, situées dans des conditions climatiques similaires comme l'atteste les températures de l'air (réanalyses SAFRAN) aux mêmes stations (Figure 2 bas). Il s'agit de l'Ognon à Broye-Aubigny-Montseugny (FDP70, 2157 km², altitude 189 m), secteur de la Petite Saône, la Loue à Cléron (FDP25, 545 km², altitude 310), secteur du Doubs, la Brevenne à Chatillon (FDP69, 420 km², altitude 209 km²). On remarque la variabilité très différente des températures de l'eau au niveau de ces trois stations. La Loue se distingue par un régime thermique moins variable, certainement attribué aux interactions avec les écoulements souterrains au droit de ce bassin.

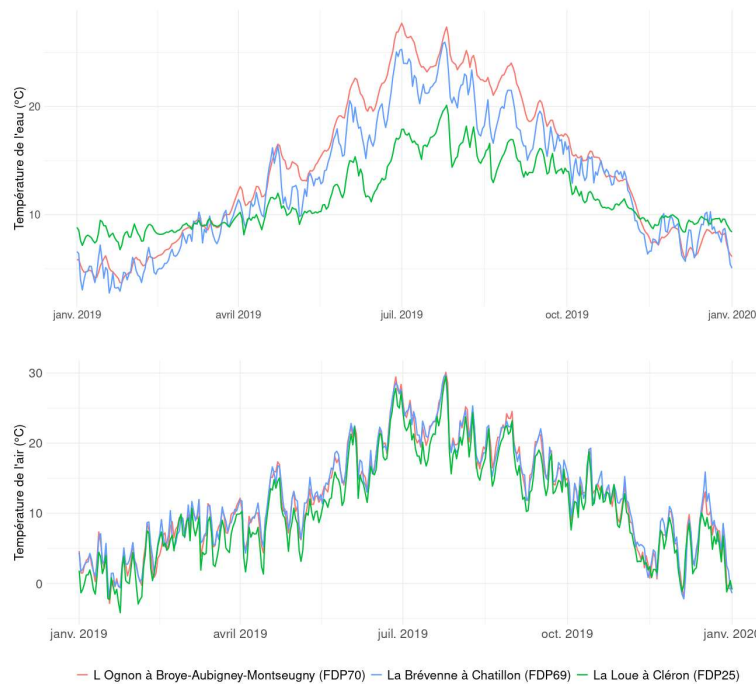


Figure 2. Exemple de chroniques en 2019 de températures journalières de trois rivières (graphique du haut) caractérisées par des températures atmosphériques similaires (graphique du bas)

2.2. Données de débits

Les données journalières de débit utilisées dans cette étude ont été extraites de la base de données nationale HYDRO Portail. Dans le bassin de la Saône, 254 stations actives ont été recensées. La surface de bassin versant des stations recensées varie de 4 km² à 29 080 km² et la surface moyenne est de 1665 km². La longueur des chroniques disponibles varie de 2 mois à 100 ans, pour une durée moyenne de 27 ans. La plupart des chroniques démarrent dans les années 1970. Ainsi 221 stations ont au moins 1 an de mesure (87%), 160 stations ont plus de 10 années de mesure (63%), et 58 stations ont plus de 40 années de mesure (23%). De cette base de données, nous avons écarté 65 stations qualifiées comme « influencées » ou avec des données incertaines par la banque Hydro. De plus, 26 stations supplémentaires ont été considérées influencées par les prélèvements agricoles, d'après la méthode utilisée dans Explore2. Cette méthode consiste à vérifier si le volume prélevé issu de la BNPE (2012 à 2018), désagrégué à un pas de temps mensuel, ne dépasse pas 25% du 5^{ème} quantile de débit ou 5% du module à chaque station hydrologique.

Au final 149 stations hydrologiques constituent notre jeu de données de chroniques de débits peu influencées.

2.3. Stations hydrologiques et thermiques communes

La figure suivante présente les stations sélectionnées de températures de l'eau (646) et des débits (149) comme non influencées. Pour la plupart des stations, leur localisation est différente. Seulement 108 stations ont été considérées proches, sur un même cours d'eau (sans affluents) et distantes de moins de 5 km.

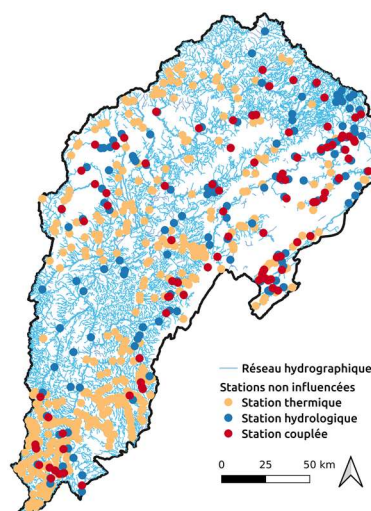


Figure 3. Stations thermiques et hydrologiques non influencées, ainsi que les stations couplées hydrologie/thermie constituant la base de données

2.4. Représentativité climatique, physiographique, pédologique et d'occupation du sol des stations

Le bassin versant de la Saône situé dans l'est de la France, présente une diversité de formations géologiques qui influencent ses caractéristiques hydrologiques et écologiques. Il bénéficie d'un climat océanique, sensible aux influences continentales, majoritairement pluvieux et peu enneigé. Les données de réanalyse atmosphérique SAFRAN, quadrillées à 8kmx8km publiées par MétéoFrance, donnent pour la période 1990-2020 des valeurs moyennes (quantiles 5% -95%) pour les températures atmosphériques : 10.4 (7.3-11.8), pour les précipitations annuelles : 1090 mm/an (813-1612), pour l'évapotranspiration potentielle : 672 mm/an (604-739). Le rapport entre précipitations et évapotranspiration potentielle est satisfaisant : 1.64 (1.12-2.45) montrant des valeurs proches de 1 ou légèrement inférieurs dans la partie aval du bassin. Le MNT quadrillé 25mx25m de la BD ALTI de l'IGN donne une altitude médiane de 298 m [min : 163 m – max : 1422 m]. La pente globale du bassin versant est faible, ce qui permet une utilisation à des fins de navigation sur les principaux chenaux, mais explique sa faible production hydroélectrique. Cette spécificité montre l'impact négligeable des barrages dans la modélisation hydrologique.

L'occupation des sols est issue de l'inventaire biophysique CORINE Land Cover millésime 2012 de l'IGN à travers 7 classes. Le bassin versant est majoritairement occupé par des espaces ruraux, avec 37% du territoire consacré à l'agriculture, 26% de forêts d'arbres feuillus, 22% de prairie, 5% de forêts de conifères et 3% de forêts mixtes. Les masses d'eaux les plus notables se situent au sud du bassin versant, dans la région des Dombes mais ne représentent que 1% de la surface totale. Enfin, une dizaine de pôles urbains le long des axes principaux de

navigation, et représentent 6% de la surface du BV. La classe agricole a été renseigné à partir du produit OSO du CESBIO (<https://www.cesbio.cnrs.fr/>), en 9 sous-classes d'agriculture différentes. L'agriculture présente sur le bassin versant se compose en majorité de céréales à pailles (blé, orge, etc...), puis de Maïs, de Colza, de Vignes, de Tournesol puis de Soja.

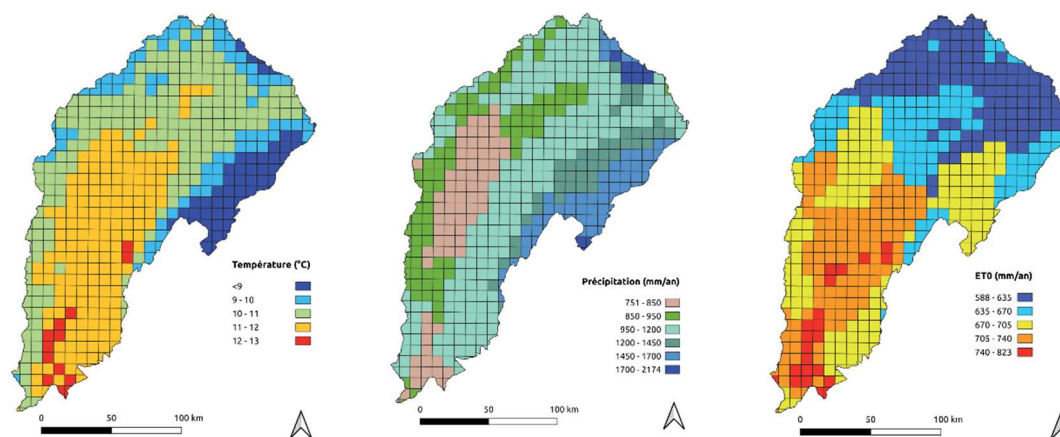


Figure 4. Carte des conditions hydroclimatiques moyennes du bassin de la Saône sur la dernière période de référence (1990-2020): températures atmosphériques (°C), précipitations totales annuelles (mm/an), évapotranspiration potentielle (mm/an)

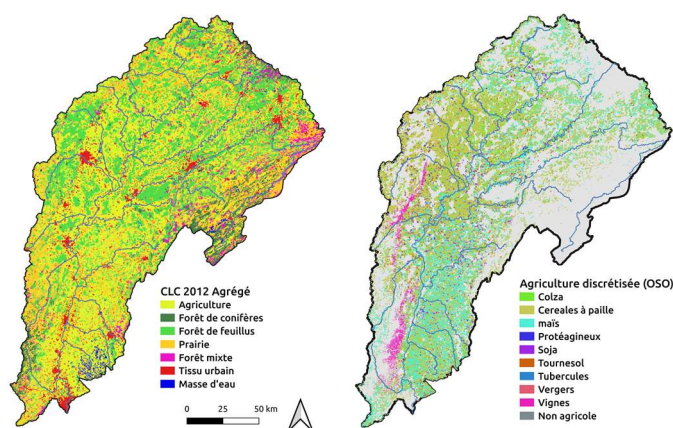


Figure 5. Cartes d'occupation des sols : à gauche à partir du référentiel Corine Land Cover, à droite à partir du produit OSO (<https://www.cesbio.cnrs.fr/>)

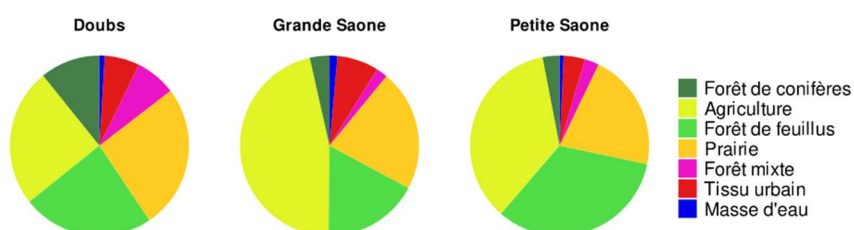


Figure 6. Distribution des classes d'occupation du sol suivant les territoires : Doubs, Grande Saône, Petite Saône

La pédologie a été renseignée par la Base de données Géographique des Sols de France (BDGSF) à 1/1000000 (INRA, 2018). Les travaux de (Bas, 2017) ont permis de déterminer sur chaque Unité Cartographique de Sol (UCS) le nom du sol dominant dans la nomenclature du World Reference Base of Soil Resources (2008). Ainsi, au droit du bassin versant de la Saône, les sols sont majoritairement constitués de Cambiosols (51%) qui se développent dans des matériaux de texture moyenne et fine dérivés d'une large gamme de roches, principalement dans des dépôts alluviaux, et de Luvisols (21%) constitué d'argiles. Ces sols sont souvent prisés pour des usages agricoles. On observe également des Calcisols (14%) avec une importante accumulation de calcaires et des Leptosols (10%) plutôt riche en fragment grossier (graviers). Enfin, le long de la nappe alluviale de la Saône, on retrouve les Fluviosols (12%) qui est un sol relativement jeune de dépôts alluviaux. De ces typologies, sont ressorties deux caractéristiques particulièrement intéressantes dans la suite de notre étude : la profondeur des sols et leur réserve utile. Ces données sont issues des data-sets « Carte de la profondeur du sol issue de la Base de Données Géographique des Sols de France » (Le Bas, 2021) et « Carte de la Réserve Utile en eau issue de la Base de Données Géographique des Sols de France » (Le Bas, 2018), basés sur l'European Soil Geographical Data Base of Europe. Le sol est ainsi relativement profond avec des 90 % du bassin ayant une profondeur de 50cm et plus, dont 32 % avec une profondeur de 200cm au droit de la plaine de la Bresse, mais avec des réserves utiles plutôt faibles, avec 73 % du bassin possédant moins de 100cm de RU notamment sur les secteurs montagneux et plus pentus. Une partie du bassin versant, notamment autour des métropoles de Lyon et Dijon, et le long du cours d'eau de la Saône et ses affluents, sont considérés comme non-sols.

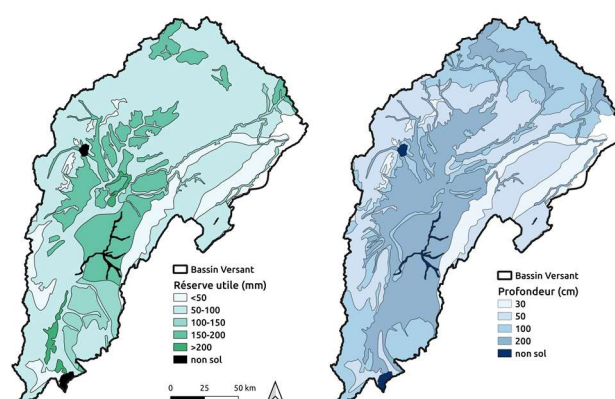


Figure 7. Entités pédologiques du bassin de la Saône (à gauche, la réserve utile, à droite, profondeur des sols). « Carte de la profondeur du sol issue de la Base de Données Géographique des Sols de France » (Le Bas, 2021) et « Carte de la Réserve Utile en eau issue de la Base de Données Géographique des Sols de France » (Le Bas, 2018), basés sur l'European Soil Geographical Data Base of Europe.

Ces conditions hydroclimatiques, d'occupation des sols, pédologiques ont été intégrés dans la modélisation hydrologique et thermique. Une considération critique se pose sur la représentativité des stations de suivis suivant les différentes classes lithologiques. Le *Tableau 2* illustre une température moyenne plus faible, pour la lithologie des calcaires, attribuée à l'altitude élevée de ces territoires. La classification lithologique et l'analyse des signatures hydrologiques et thermiques est sujette donc à quelques biais liés aux variations des conditions climatiques et géographiques de ces classes lithologiques, que nous avons analysé.

3. Signatures thermiques et hydrologiques

3.1. Métriques et signatures

Les températures des cours d'eau et les débits évoluent dans le temps (journée, saison, année) et le long des réseaux hydrographiques depuis les sources jusqu'à des embouchures ou des confluences.

Pour synthétiser les variations des chroniques journalières en un point donné, il est habituel de calculer quelques métriques comme la moyenne annuelle, la moyenne mensuelle d'un mois donné, la moyenne des variations journalières (pour la température de l'eau) pendant la période estivale, lorsque les variations sont les plus importantes. Ces **métriques**, représentent des composantes particulières des **régimes des températures et débits** de la station étudiée et peuvent avoir des effets sur les communautés écologiques. Les régimes des débits et des températures ont été introduits pour la première fois pour caractériser les variations saisonnières, estimées sur plusieurs années et caractérisant les variations de magnitude. Par la suite, d'autres caractéristiques de régime ont été introduites. On a maintenant l'habitude de caractériser les régimes à travers 5 composantes, chacune pouvant être évaluée à l'aide de différentes métriques : magnitude, fréquence, durée, moment d'occurrence, variabilité. La figure suivante présente la conceptualisation de ces métriques pour le régime des températures de l'eau.

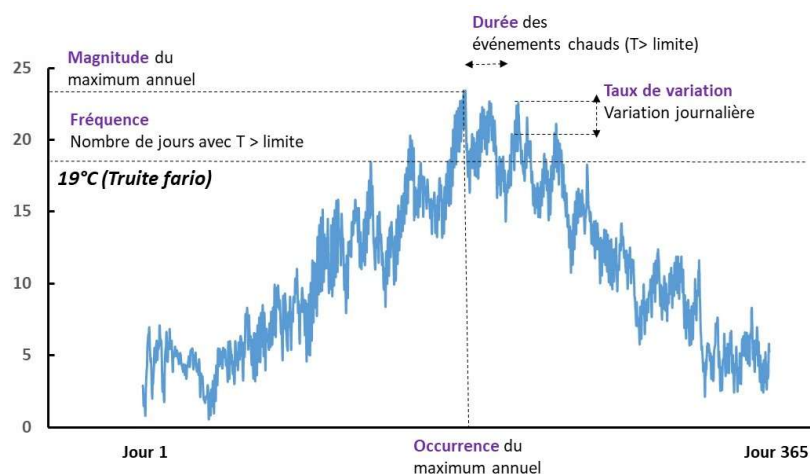


Figure 8. Composantes du régime thermique d'une rivière: magnitude, fréquence, durée, taux de variation, occurrence

Le concept de **signature** a été défini en hydrologie, pour désigner des métriques qui peuvent révéler des processus hydrologiques ou hydrogéologiques qui influencent les régimes, notamment par comparaison aux forçages atmosphériques sur les mêmes périodes de temps (Gupta, et al, 2008, McMillan et al., (2017, 2020, 2021, Horner 2020). Certaines métriques calculées à partir des chroniques de débit ou de température peuvent donc représenter des signatures pour certains processus hydrologiques ou énergétiques spécifiques. Ces signatures peuvent être utilisées pour analyser la variabilité spatiale des réponses des bassins versants aux différents forçages climatiques ou hydrogéologiques, ou simplement analyser la performance des simulations réalisées par des modèles. Dans ce dernier cas, elles permettront de mettre en évidence les processus mal représentés dans les modèles ou mal renseignés par les données.

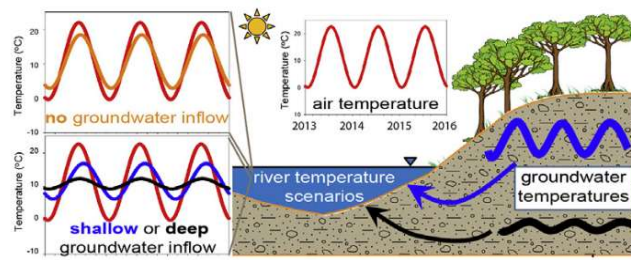


Figure 9. Schéma conceptuel de l'influence des signaux des flux de chaleur des aquifères sur la température en cours d'eau (Briggs et al, 2018)

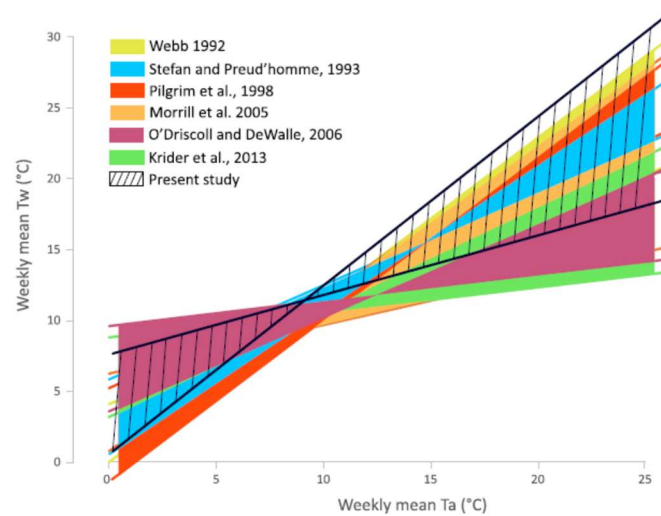


Figure 10. Exemples des régressions entre les températures hebdomadaires de quelques cours d'eau (axe des ordonnées) et les températures hebdomadaires atmosphériques (axes des abscisses) sur la base de la littérature. Les pentes les plus faibles désignent des apports importants de flux de chaleur provenant des aquifères

3.2. Signatures choisies

Dans le contexte du réchauffement atmosphérique, les eaux souterraines ont une importance majeure dans le soutien d'étiage et le maintien des températures plus froides l'été et plus chaudes l'hiver, compte tenu des différences de température et de dynamique entre les deux types de milieux (cours d'eau et aquifère). Il est donc indispensable de caractériser les stations, à l'aide de signatures caractéristiques.

3.2.1. Signatures hydrologiques

Cinq signatures hydrologiques ont été choisies pour caractériser l'influence des apports des aquifères aux cours d'eau et la génération des écoulements annuels ou pendant la période d'étiage. Il s'agit de :

- 1) Base flow index (BFI), rapport entre débit de base (déterminé par des méthodes de filtrage) et débit total, compris entre 0 et 1. Une valeur proche de 1 désigne une contribution importante des eaux souterraines ;

- 2) Base flow magnitude (BFmag), amplitude moyenne du débit de base, valeur comprise entre 0 et 1. Une valeur proche de 1 désigne une capacité faible de stockage d'eau des aquifères, ou/et une vidange rapide des aquifères.
- 3) Quantile 90 des débits journaliers (Q90), débit journalier dépassé 90 % du temps, caractéristique d'un débit d'étiage ;
- 4) Coefficient d'écoulement (RC pour runoff coefficient), rapport entre écoulement total et précipitation totale, désigne la capacité du bassin versant à transformer les apports de précipitation en écoulement fluvial ; Valeurs entre 0 et 1. Une valeur élevée de RC, montre une évapotranspiration plus faible, au profit de l'écoulement.
- 5) Indice de concavité, CI, basé sur la courbe des débits classés, déterminé comme le rapport des différences des quantiles inférieures et supérieures $(Q1 - Q10) / (Q10 - Q99)$. Valeurs entre 0 et 1. Une valeur proche de 1, désigne une courbe des débits classés peu variable, caractérisant une capacité importante de stockage d'eau dans le bassin versant, à travers les aquifères et/ou la neige et les glaciers. Une valeur proche de 0, désigne une courbe des débits classés, très variable, caractérisant l'influence d'un climat contrasté.

Ces signatures sont toutes calculées à partir de l'ensemble des chroniques disponibles aux stations, en valeurs interannuelles.

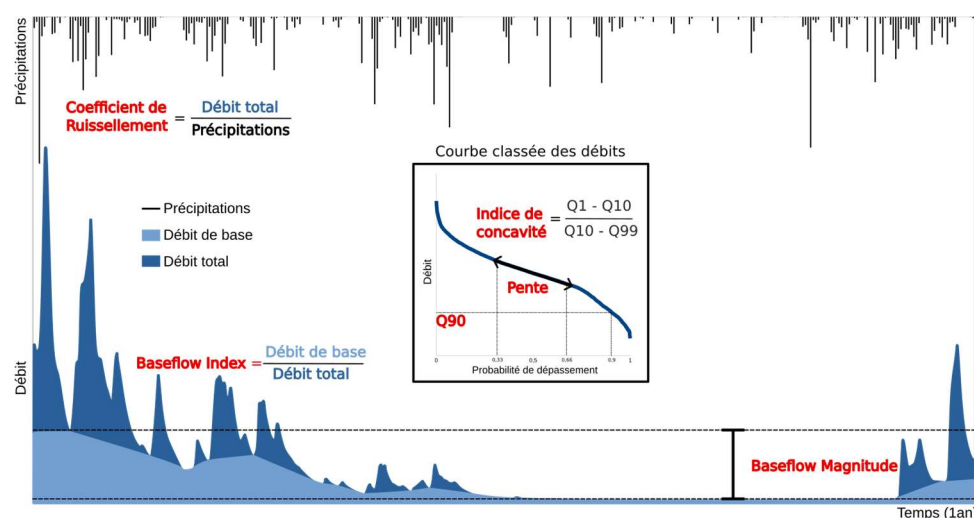


Figure 11. Schéma conceptuel des signatures hydrologiques retenues

3.2.2. Signatures thermiques

Huit signatures thermiques ont été sélectionnées, pour caractériser les cinq composantes du régime thermique et l'influence atmosphérique et des aquifères sur la température des cours d'eau. Il s'agit de :

- 1) Thermal Peak, Tw30, moyenne des 30 jours consécutifs les plus chauds. Une valeur élevée montre une atténuation faible de l'effet des radiations solaires (Beaufort et al, 2022).
- 2) Sensibilité thermique, TS, la pente des régressions entre la température de l'eau et de l'air (valeurs hebdomadaires) ; Valeur généralement comprise entre 0 (pas de relation avec la température de l'air, données de température provenant de sources d'eaux souterraines, O'Driscoll and DeWalle, 2006) et peut dépasser le

- 1 (lorsque la rivière est influencée par des seuils ou des retenues de faible profondeur, Seyedhashemi et al, 2021)
- 3) Intercepte, b , l'intercepte de la régression entre la température de l'eau et de l'air ; Il représente la température de l'eau lorsque la température de l'air est égale à zéro.
 - 4) Décalage temporel, Φ , entre les cycles annuels des températures de l'eau et de l'air. Plus ce décalage est important, plus la température de l'eau est influencée par des retenues de grande profondeur (Seyedhashemi et al, 2021), ou par des aquifères profonds (Hare et al, 2021).
 - 5) Taux d'atténuation, A_r , rapport entre les amplitudes des cycles annuels des températures de l'eau et de l'air, après ajustement de deux composantes saisonnières. Valeur comprise entre 0 et 1 ; Une valeur inférieure à 0.65 désigne une contribution importante des aquifères (Hare et al, 2021).
 - 6) Amplitude saisonnière, S_{mag} , différence entre les moyennes mensuelles de la température de l'air de juillet et de février. Elle désigne, la réponse à la variation long terme du climat.
 - 7) Nombre de jours avec des températures de l'eau au-dessus de 15°C , N_{day}
 - 8) Nombre de jours consécutifs avec des températures au-dessus de 15°C , $N_{consecday}$

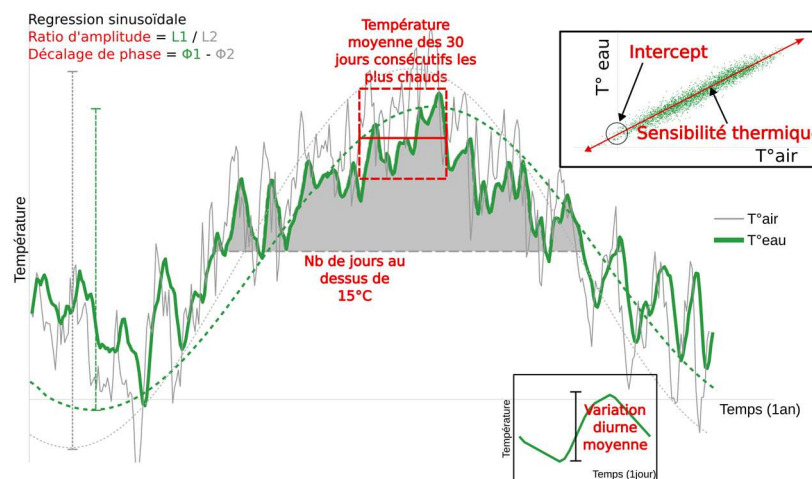


Figure 12. Schéma conceptuel des signatures thermiques retenues

4. Caractérisation de l'atténuation du réchauffement des cours d'eaux en fonction des classes lithologiques

Afin de caractériser la sensibilité des stations au réchauffement en fonction des signatures présentées ci-avant, nous avons procédé au calcul des 5 signatures hydrologiques et 8 signatures thermiques. Les signatures hydrologiques sont déterminées sur l'ensemble de la période retenue, les chroniques de débits étant complètes dans la majorité des cas. Les signatures thermiques sont calculées année par année (2010 à 2020), compte tenu de l'hétérogénéité de la base de données collectée. La représentativité des moyennes calculées sur des années spécifiques, a ainsi été étudié, pour s'assurer d'une analyse spatiale cohérente. Les tests statistiques utilisés (Wilcoxon test, Kruskal-Wallis test, Student test) ont permis d'assurer la robustesse des résultats et l'identification des signatures hydrologiques et thermiques permettant de discriminer les différentes classes lithologiques. Une analyse en composante principale, a aussi été réalisé pour étudier la complémentarité ou la collinéarité des signatures hydrologiques et thermiques pour classer les différentes classes lithologiques. Pour tenir compte des facteurs confondants, d'autres variables externes calculés au niveau de la station, ont été considérées dans l'étude : altitude, température de l'air, surface du bassin versant, précipitation inter-annuelle. Ces variables environnementales permettent d'isoler les effets de la lithologie, des autres effets climatiques ou physiographiques.

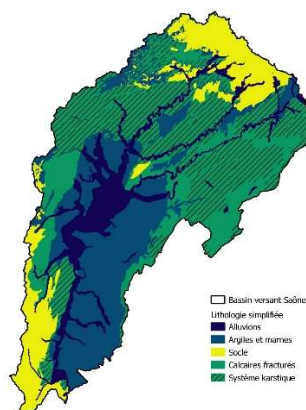
En conclusion, deux bases de données sont utilisées avec trois analyses distinctes : 91 stations hydrologiques avec 5 signatures hydrologiques en utilisant les tests Kruskal-Wallis et pair-wise Student t-test ; 342 stations de température de l'eau avec 8 signatures thermiques en utilisant les tests Kruskal-Wallis et pair-wise Student t-test ; et 44 stations couplées hydrologie et thermie avec 5 signatures hydrologiques, 8 signatures thermiques en utilisant une analyse en composante principale.

4.1. Classification des signatures suivant les classes lithologiques

La lithologie des bassins versants est décrite à partir de la base de données LISA du BRGM (<https://bdlisa.eaufrance.fr/>), en s'appuyant sur la nature des roches. Des regroupements de certaines entités ont conduit à la définition de quatre classes lithologiques : calcaires (roches carbonatées) ; argiles (argiles, marnes, sables, roches poreuses), roches cristallines/socle (roches métamorphiques et volcaniques) ; roches alluviales (graviers et galets). Chaque station est représentée par une seule classe lithologique, en considérant qu'au moins 40% de son bassin versant comporte une lithologie homogène. Dans le cas où il n'y a pas de lithologie dominante, une classe mixte a été définie. De même, du fait du nombre important de stations catégorisé en lithologie calcaire, nous avons pour certaines analyses divisé la classe en deux sous-classes : calcaire pur, contenant plus de 90% de calcaire, et calcaire mixte, pour les bassins ayant entre 40% et 90% de leur surface en calcaire. Le tableau suivant synthétise les caractéristiques géographiques et climatiques des stations dans chaque classe lithologique.

Tableau 2. Représentativité des conditions physiographiques et climatiques des stations thermiques et hydrologiques par classe lithologique

Lithology class		Alluvium	Clays	Pure limestone	Mixed limestone	Crystalline	Mixt	All
Hydrological station	Number of stations	0	12	33	19	25	2	91
	Elevation (m)	-	251	575	309	426	401	428
	Watershed area (km²)	-	24	35	113	81	64	67
	Precipitation (mm)	-	1011	1326	1008	1148	1125	1174
Thermal station	Number of stations	2	71	106	37	99	27	342
	Elevation (m)	192	250	621	320	475	280	435
	Watershed area (km²)	22	20	26	50	25	37	28
	Air temperature (°C)	11,7	11,6	9,3	11,2	11,3	11,5	10,8
Coupled	Number of stations	0	6	19	7	10	2	44



Signatures hydrologiques

Deux signatures hydrologiques montrent des différences significatives entre les classes lithologiques. Le CI, distingue la classe des argiles (médiane CI=0.29) et des calcaires purs (CI=0.37), montrant les stations de cette dernière classe avec un hydrogramme plus tamponnée. En effet, plus le CI est élevé, plus la courbe des débits classés est peu variable, caractérisant une capacité importante de stockage d'eau dans les aquifères du bassin versant. Le coefficient de ruissèlement, CR, montre une différence significative entre les stations drainant un substrat de socle (CR médiane = 0.52) et les stations drainant majoritairement des argiles (CR médiane = 0.37). Une valeur plus importante de cette signature pour les bassins de socle, montre probablement une évapotranspiration plus faible au profit d'un écoulement plus important. La variabilité plus importante des signatures CR et Q90 pour les stations à lithologie dominante calcaire, est attribuée aux caractéristiques inhérentes de ce type de lithologie, qui favorise les écoulements entre bassins, et qui conduit à des écoulements excédentaires ou déficitaires, non pris en compte par ce calcul.

Les trois autres signatures (BFmag, Q90 et BFI) présentent des différences moins significatives statistiquement entre les classes lithologiques. Cependant, ces signatures montrent que les stations drainant une lithologie dominante d'argiles, présentent des étiages plus sévères (médiane Q90 = 0,12 mm/h vs. médiane des autres stations = 0,17mm/h), une plus faible contribution des aquifères (médiane BFI = 0,33 vs. médiane des autres stations = 0,44). Ces résultats confirment l'influence de la lithologie sur la résilience hydrologique de ces territoires et l'influence prépondérante des aquifères dans le maintien des conditions d'étiage, mais ils ne sont pas aussi prédominants qu'on le pensait. Les signatures hydrologiques suggèrent que les territoires à argiles se distinguent nettement des autres, étant nettement plus susceptible de connaître des étiages sévères.

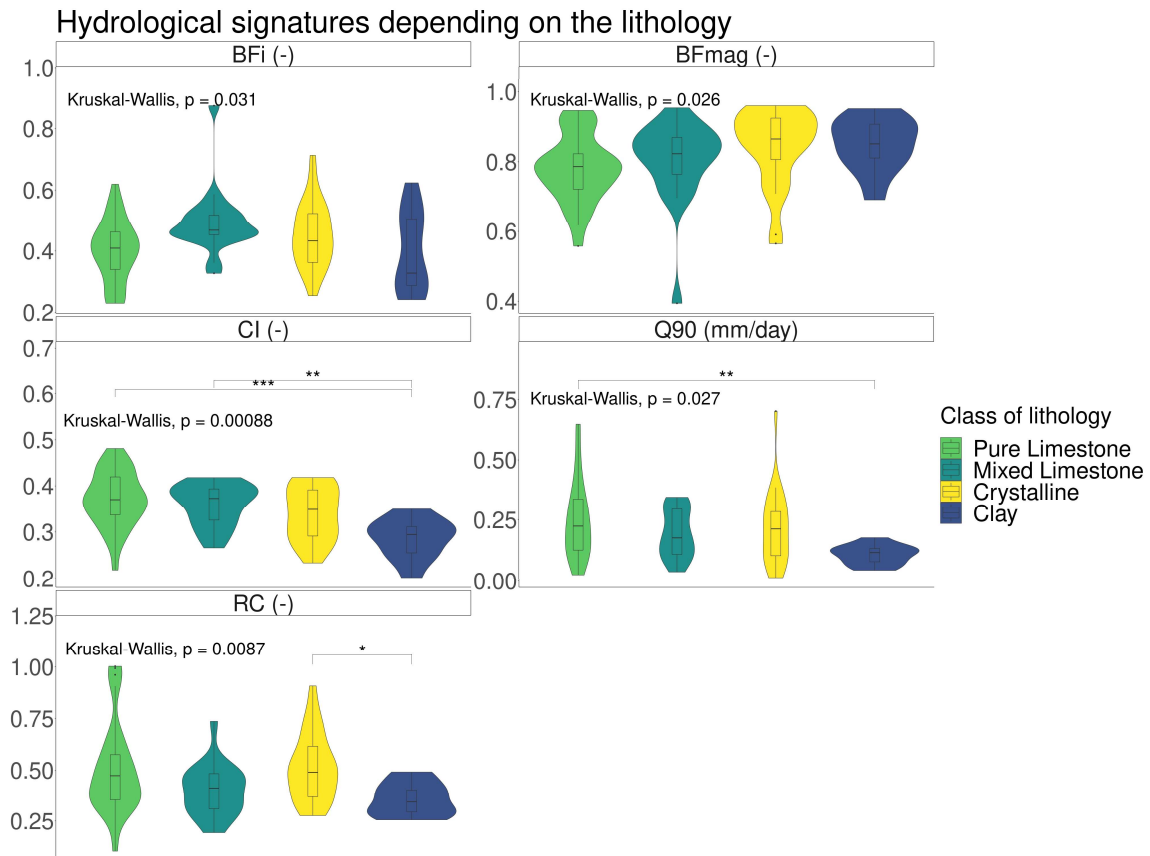


Figure 13. Classification des signatures hydrologiques suivant 4 classes lithologiques (calcaires purs (>90%), calcaires mixtes, roches cristallines, argiles et marnes) : les différences non-significatives ne sont pas figurées ; les symboles « * » designent une pvalue < 0.05, « ** », <0.01, « *** », <0.001, « **** », < 1e-4

Signatures thermiques

L'ensemble des signatures thermiques montrent des différences significatives ($p\text{-value} < 0.05$) entre les différentes classes lithologiques.

La classe lithologique des calcaires purs présente les différences statistiques les plus marquées par rapport aux autres classes, avec 18 cas de test t positif sur 24 comparaisons. En revanche, la classe Cristalline enregistre 14 cas de ce type, les argiles 12 cas et la classe calcaire mixte 10 cas.

Pour la classe des calcaires purs, les signatures thermiques de dépassement du seuil de 15°C (Nday et Nconsec-day) montrent des valeurs faibles (médianes de 48 et 17 jours) par comparaison aux autres classes lithologiques (médianes de 89 et 48 jours). Pour cette même classe lithologique, les signatures TS (médiane de 0.51, comparée à la médiane des autres classes de 0.64) et Ar (médiane de 0.54, comparée à la médiane des autres classes de 0.68), montrent une sensibilité thermique de l'eau moindre par rapport aux variations de températures atmosphériques, et probablement une influence plus importante des aquifères souterrains. Ces résultats sont appuyés par la signature intercepte Teau/Tair, b qui représente conceptuellement la température de l'eau lorsque la température de l'air oscille autour de 0°C. Par conséquent, dans des conditions hivernales, les stations drainant des terrains calcaires enregistrent des températures plus élevées (médiane 5.7°C tandis que la médiane de l'ensemble des signatures b sur les autres stations est de 4.1°C). Cela est à mettre en relation avec les températures

moyennes des aquifères de ces territoires, qui sont plus stables au cours de l'année, et de l'ordre de grandeur de la moyenne de la température de l'air (autour de 10°C, tableau x). De plus, une réduction notable de Smag est observée (médiane = 8.4°C contre 11.4°C pour les autres classes), ce qui désigne l'atténuation des fluctuations saisonnières par les aquifères.

En conclusion, pour toutes les signatures thermiques, à l'exception de Phi, la classe des calcaires purs présente des différences statistiques par rapport aux stations drainant des argiles, avec des p-values systématiquement inférieures à 1^e-4. Ces résultats suggèrent que la classe lithologique des Calcaires Purs possède des caractéristiques thermiques uniques qui la distinguent des autres classes lithologiques.

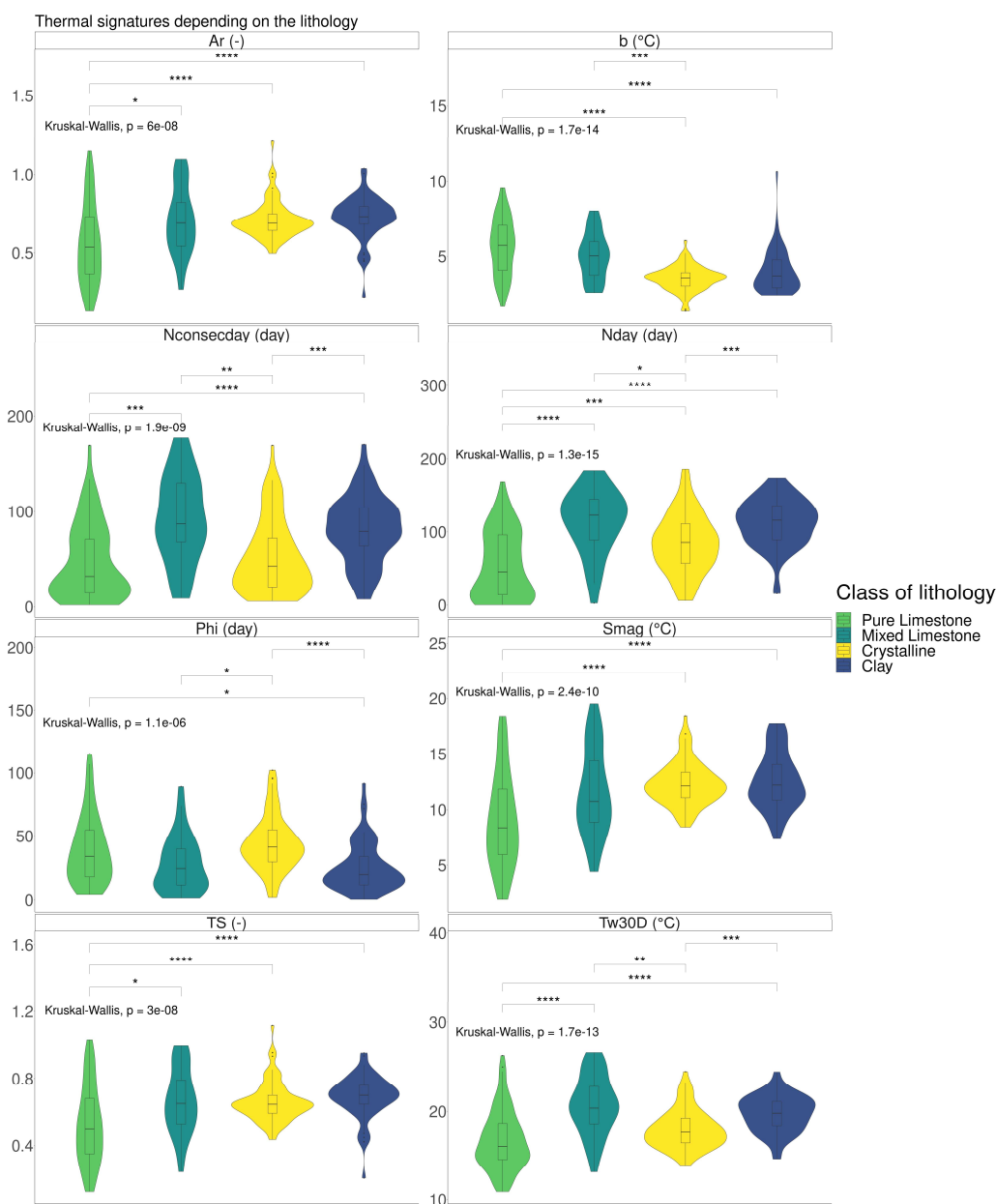


Figure 14. Classification des signatures thermiques suivant 4 classes lithologiques (calcaires purs (>90%), calcaires mixtes, roches cristallines, argiles et marnes) : les différences non-significatives ne sont pas figurées ; les symboles « * » designent une pvalue < 0.05, « ** », <0.01, « *** », <0.001, « **** », < 1e-4

4.2. Complémentarité des signatures hydrologiques et thermiques

Une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée sur le jeu de données, comprenant 44 stations disposant de chroniques de température et de débit sur des stations proches. Les résultats de cette analyse révèlent que l'axe principal d'inertie est principalement constitué de signatures thermiques (principalement TS, b, TW30D, Smag, Ar Nday et Nconsecday), expliquant 60,3 % de la variance globale du jeu de données. En revanche, les signatures hydrologiques (principalement CI, BFI, BFmag) constituent les principaux contributeurs au deuxième axe de l'ACP, représentant 18,1 % de la variance du jeu de données. 8,8 % de la variance est expliquée par le troisième axe, principalement dirigé par Phi, RC, Q90 et BFI.

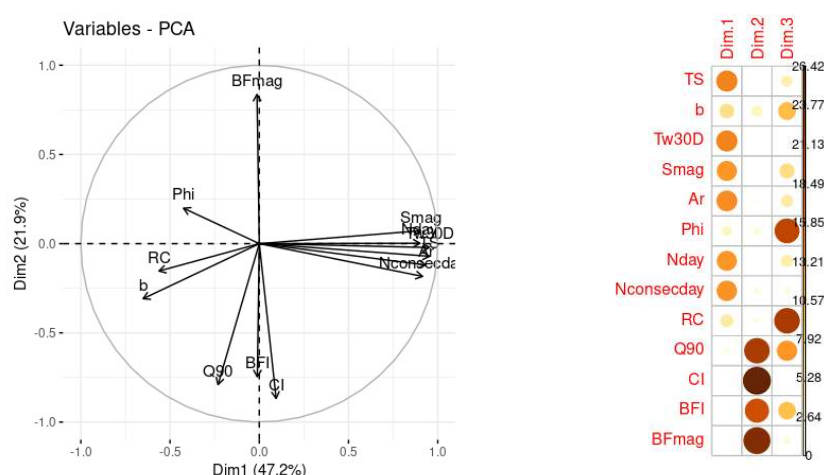


Figure 15. Analyse en composantes principales des 44 stations, avec des signatures hydrologiques et thermiques disponibles aux stations proches : à gauche, le cercle des corrélations sur les F1 et F2 (variance expliquée de 69% du nuage de points) ; à droite, la matrice de corrélation des signatures sur les 3 axes principaux.

La matrice de corrélation de l'ensemble des signatures, illustrée à la Figure 16, révèle une corrélation plus élevée entre les signatures thermiques (généralement supérieures à 0,8) que celles observées pour les autres indicateurs hydrologiques (généralement inférieures à 0,8). De plus, l'observation de Phi et de RC présente des coefficients de corrélation plus faibles lorsqu'elle est juxtaposée à d'autres signatures de nature similaire. Il est également surprenant de constater que le coefficient d'écoulement est généralement plus corrélé aux signatures thermiques qu'aux signatures hydrologiques.

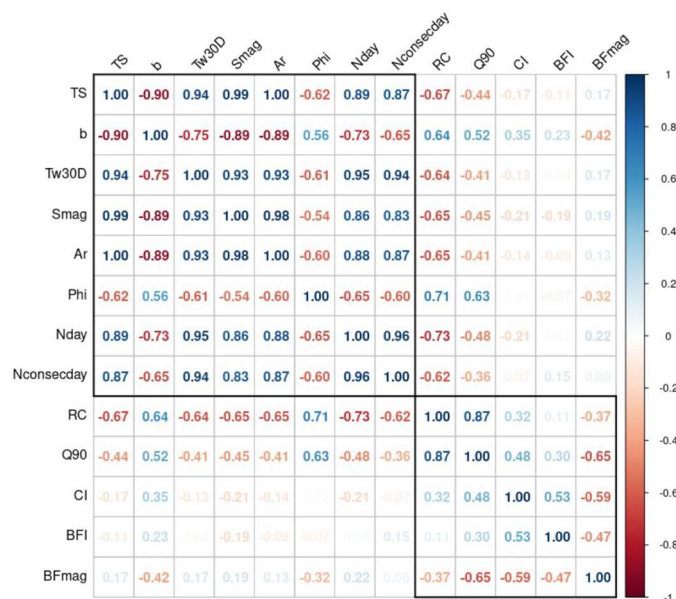


Figure 16. Matrice de corrélation des signatures hydrologiques et thermiques

L'examen de la manière dont les signatures hydrologiques et thermiques délimitent l'ensemble de variables le long de leurs axes d'inertie primaire et secondaire permet une comparaison pertinente avec la lithologie prédominante des bassins versants. Cette analyse fournit des informations précieuses sur l'influence de la lithologie sur les régimes thermiques et hydrologiques.

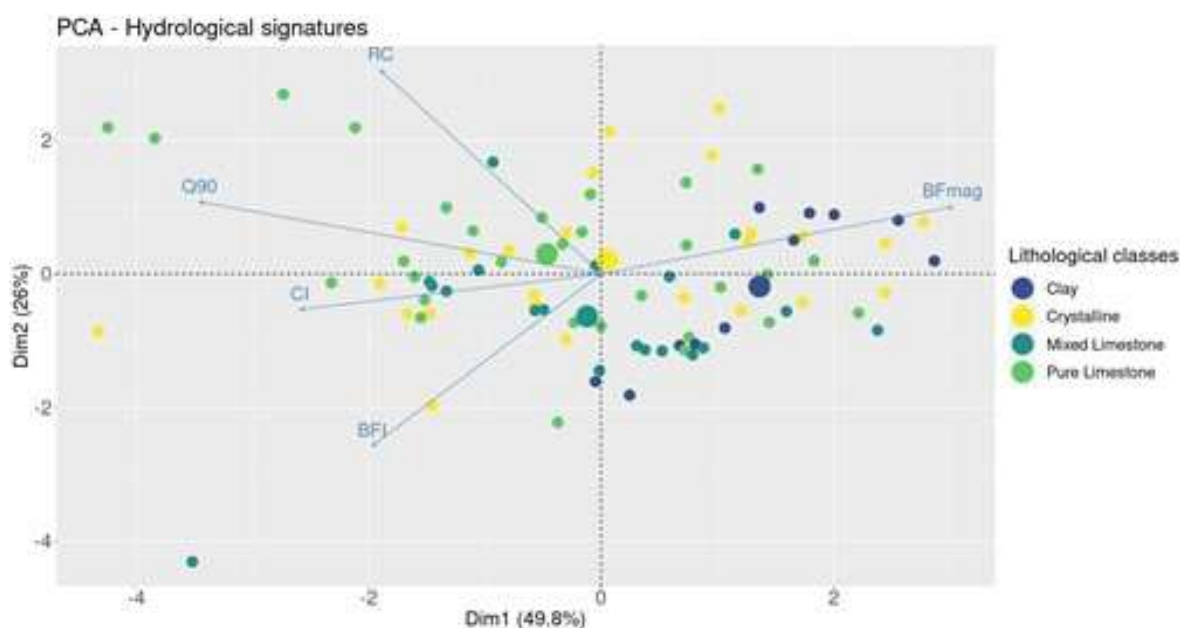


Figure 17. ACP des signatures hydrologiques. La variable explicative « lithologie » est figurée pour chaque station. Les stations avec une représentation faible dans les deux dimensions ($\cos^2 < 0.8$) ne sont pas figurées. Le centre de la classe lithologie est figuré par un point plus grand.

Au sein des quatre classes lithologiques prédominantes du bassin versant, les signatures hydrologiques contribuent à l'identification de comportements distinctifs, notamment illustrés par les argiles. Les stations drainant des terrains argileux se distinguent des autres le long du premier axe de l'analyse en composantes principales

(ACP). Cette distinction témoigne d'un profil hydrologique caractérisé par une variabilité accrue des débits, des étiages plus marqués et une composante d'écoulement souterrain moins prononcée. À l'inverse, la lithologie calcaire pure occupe le quadrant supérieur gauche de l'ACP, témoignant d'un profil hydrologique caractérisé par des étiages plus soutenus, un coefficient d'écoulement plus élevé et une variabilité moins marquée des régimes d'écoulement.

En revanche, les autres indicateurs hydrologiques présentent une séparation moins nette pour les classes mixtes, calcaires et cristallines. Ces classes présentent des centroïdes relativement plus proches du centre de l'analyse en composantes principales (ACP), ce qui indique une moindre représentation dans l'espace analysé. Par conséquent, les signatures hydrologiques pourraient ne pas refléter des différences de comportement aussi prononcées pour ces classes lithologiques particulières, suggérant une réponse hydrologique potentiellement plus complexe ou interconnectée au sein de ces régions.

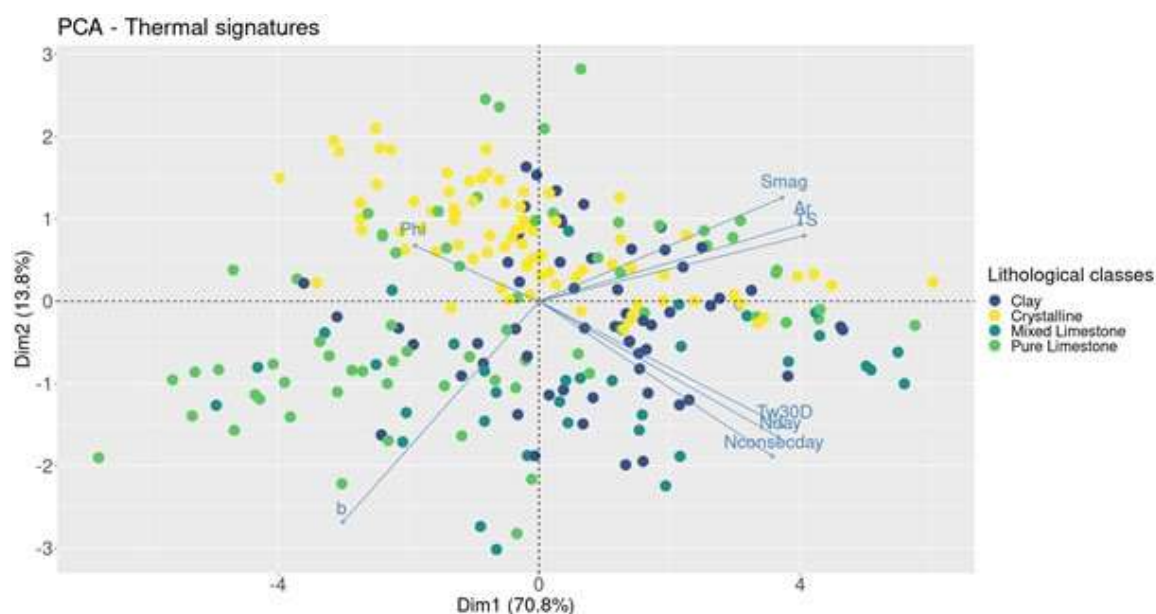


Figure 18. ACP des signatures thermiques. La variable explicative « lithologie » est figurée pour chaque station.

L'ACP des signatures thermiques révèle une nette amélioration de la séparation des familles lithologiques. Deux groupes principaux de signatures collinaires sont observés : le groupe 1, correspondant aux températures maximales et aux dépassements de seuils : Tw30D, Nday, Nconsecday ; et le groupe 2, correspondant aux variations saisonnières et aux températures appariées de l'air et des cours d'eau : Smag, Ar, Ts et b. Le quadrant supérieur gauche est dominé par les bassins versants à prédominance cristalline, caractérisés par le groupe 1, induisant des températures estivales plus fraîches. Dans le quadrant inférieur gauche, les stations à prédominance lithologique calcaire sont concentrées, distinguables du groupe cristallin, notamment par le groupe 2. Cette différenciation indique une température hivernale plus élevée que le groupe cristallin, en raison d'apports d'eaux souterraines plus importants en hiver ayant une température plus importante, d'une moindre variabilité saisonnière et donc d'une sensibilité thermique moindre. À droite de l'ACP, les classes argiles et calcaires mixtes sont positionnées, démontrant une séparation moins nette par rapport aux autres signatures thermiques. Ces classes correspondent à des stations situées à plus basse altitude, caractérisées par des températures atmosphériques plus élevées, et une sensibilité accrue à la température de l'air.

4.3. Apports et limites du travail sur les signatures

L'analyse des différentes composantes des régimes thermiques constitue une étape importante vers une meilleure compréhension des processus qui gouvernent les évolutions spatio-temporelles des températures des cours d'eau. Plusieurs études ont déjà proposé des classifications des régimes thermiques basées sur différentes métriques, certaines similaires à ce travail. Par exemple, Chu et al. (2010) ont regroupé 90 sites en Ontario en trois régimes thermiques, basés sur 13 signatures thermiques. Ils ont montré comment des facteurs locaux et régionaux, tels que la végétation riveraine, les flux d'eau souterraine et la température de l'air, peuvent produire des régimes thermiques différents. Daigle et al., 2019 ont utilisé la température maximale annuelle, la date du maximum annuel et la durée de la saison chaude pour caractériser le régime thermique de plus de 400 rivières au Québec. À l'échelle des États-Unis, Maheu et al. (2016) ont utilisé les relevés de température de 135 stations de mesure pour classer les cours d'eau en six catégories, en fonction de la température annuelle moyenne de l'eau ainsi que de l'amplitude et de la phase de la première harmonique du signal de température (équivalent de l'amplitude saisonnière, Smag, utilisé dans cette étude). Ils ont montré l'importance d'inclure les caractéristiques de variabilité (amplitude et temps) en plus de la magnitude pour discriminer les régimes thermiques à l'échelle continentale. Cependant, ils ont constaté l'absence de prise en compte de facteurs locaux tels que le rôle des eaux souterraines ou de la végétation riveraine. De même, en hydrologie, Praskievicz et Luo (2019) ont réalisé une classification non supervisée de 189 stations hydrologiques aux États-Unis avec cinq signatures hydrologiques adimensionnelles, aboutissant à six régimes différents. Ils supposent que les principaux processus influençant le régime sont l'infiltration et les échanges entre les eaux de surface et souterraines.

Cependant, toutes ces études se concentrent uniquement sur les paramètres hydrologiques ou thermiques. Nous n'avons trouvé que quelques études utilisant les deux types de signatures simultanément. (Jackson et al., 2007) ont étudié la variation du débit et de la température sur les communautés aquatiques. Ils ont utilisé 13 signatures hydrologiques et 11 signatures thermiques pour caractériser les régimes hydrologiques et thermiques de deux rivières d'Écosse. Ils ont conclu que le débit et la température expliquaient davantage la variabilité des communautés d'invertébrés qu'un large éventail de conditions environnementales. (Hare et al., 2021) ont caractérisé l'influence majeure de l'atmosphère, des barrages et des eaux souterraines sur les rivières, en distinguant l'influence des contributions des eaux souterraines et profondes, sur 1 729 sites répartis sur le territoire continental des États-Unis, en associant les signaux pluriannuels de température de l'air et des cours d'eau. Ils ont comparé la classification basée sur les données de températures aux données d'écoulement. Les sites soumis à un régime influencé par les conditions atmosphériques présentaient un BFI significativement plus faible que les sites influencés par les aquifères.

Plus récemment, Gresselin et al. (2023) ont comparé le comportement thermique de deux rivières en Normandie, déterminant les principaux facteurs régulant leur régime thermique. L'ACP de cinq signatures thermiques actives à sept stations a conclu que le ruissellement et l'écoulement de base sont les deux principaux facteurs de régulation secondaires. Relier ces signatures aux régimes et aux processus des eaux souterraines nous permet de tirer des conclusions sur l'importance de cette classification. Selon (Hare et al., 2021), une valeur $Ar < 0,65$ indique une influence marquée des eaux souterraines. De plus, les eaux souterraines profondes induisent un Φ compris entre 4 et 10 jours, tandis que les eaux souterraines peu profondes présentent un Φ compris entre 10 et 40 jours. Nos résultats concordent avec cette suggestion, soulignant que la seule lithologie clairement associée à une contribution des eaux souterraines peu profondes est le calcaire pur, avec une valeur Ar médiane de 0,54 et une valeur Φ médiane de 32 jours. Dans ce contexte, (Kelleher et al., 2012) ont souligné que la sensibilité de la température des cours d'eau à la température de l'air est contrôlée par la contribution du débit de base, suggérant qu'une valeur de TS inférieure à 0,45 peut indiquer une signature des eaux souterraines. Une fois de plus, la lithologie présentant la plus faible valeur est le Calcaire Pur, avec une valeur médiane de 0,51. Enfin, (Caissie, 2006) décrit une valeur de b supérieure à 5 °C comme une influence probable et prononcée des eaux souterraines. La classe Calcaire Pur satisfait cette condition, avec une valeur médiane de 5,7 °C.

Concernant les signatures hydrologiques, il est difficile de trouver des valeurs de référence dans la littérature, et la signature la plus utilisée est l'indice BFI, car il s'agit de l'une des rares méthodes actuelles permettant de quantifier les contributions des eaux souterraines à l'échelle régionale. Hare et al., 2021)

Les valeurs médianes de l'indice de base (BFI) pour la signature atmosphérique, la signature des eaux souterraines superficielles et la signature des eaux souterraines profondes sont respectivement de 0,69, 0,79 et 0,86. Ces valeurs sont significativement supérieures aux valeurs trouvées dans cette étude, tout en utilisant la même méthode de calcul, soit 0,42 pour le calcaire pur. Les signatures hydrologiques présentent une faible corrélation avec les signatures thermiques et sont orthogonales dans le plan des deux axes d'inertie principaux de l'ACP. Par conséquent, nous concluons que les signatures thermiques constituent un meilleur traceur des eaux souterraines que les signatures hydrologiques.

Ces résultats concordants étayent la conclusion selon laquelle les stations drainant des terrains dominants de calcaire pur présentent des caractéristiques distinctes indiquant une influence prononcée des eaux souterraines, ce qui concorde avec la perméabilité moyenne de ces roches fournies par BD LISA. Suivant le même raisonnement, nous pouvons également démontrer que la classe lithologique présentant les interactions les plus faibles avec les écoulements souterrains est celle des argiles, tandis que les autres lithologies présentent des signatures plutôt médianes. Ces hétérogénéités d'écoulement des eaux souterraines entraînent des conditions écologiques différentes. Nous montrons que plus la contribution des eaux souterraines est élevée, plus les valeurs Tw30D, Nday et Nconsecday sont faibles. Les flux d'eaux souterraines contribuent ainsi au maintien d'une température mensuelle maximale médiane de 16,2 °C, contre 20,3 °C pour les argiles. De plus, le nombre médian de jours où les rivières sont exposées à des risques pour les communautés de salmonidés diminue significativement, passant de 118 jours dans les argiles à 45 jours dans le calcaire pur pour Njour et de 81 jours dans les argiles à 17 jours dans le calcaire pur pour Njour consécutif.

De plus, dans les rivières connectées à des aquifères de calcaire pur, on observe des débits d'étiage plus soutenus, les Q90 des calcaires purs (0,25 mm/h) étant plus élevés que ceux des argiles (0,11 mm/h), et des variations de débit plus faibles, les CI étant respectivement de 0,38 et 0,29. Au-delà de ces différences, on observe également des caractéristiques distinctes entre les bassins versants majoritairement composés de calcaire pur, souvent organisés autour de réseaux karstiques et de rivières souterraines, et ceux où le calcaire est mélangé à d'autres lithologies.

Une considération critique se pose concernant la représentativité des classes lithologiques en fonction des conditions climatiques et topographiques inhérentes à la classification lithologique. Le **Tableau 2** illustre une température moyenne plus faible, attribuée à l'altitude élevée de la classe lithologique calcaires. Notre classification peut être sujette à des biais externes présumés sensibles, notamment en raison des variations des conditions météorologiques et géographiques selon la localisation de la lithologie. Nous avons donc examiné la distribution des superficies et des altitudes des bassins versants (tableau 1), ainsi que les précipitations et la température de l'air issues de la base de données SAFRAN, selon une grille régulière de 8 × 8 km (Vidal et al., 2010). La superficie du bassin versant n'est significativement corrélée à aucune signature, mais l'altitude et la température de l'air présentent une corrélation significative avec certaines signatures. La lithologie calcaire pure, par exemple, est caractérisée par des altitudes plus élevées que les régions présentant d'autres compositions lithologiques. Cette différence d'altitude contribue aux conditions climatiques et est significativement corrélée avec Tw30D, Nday et Nconsecday ($|R| > 0,5$). L'altitude elle-même a une influence plus marquée sur ces signatures que les variations de température de l'air ou de précipitations induites par les différences lithologiques.

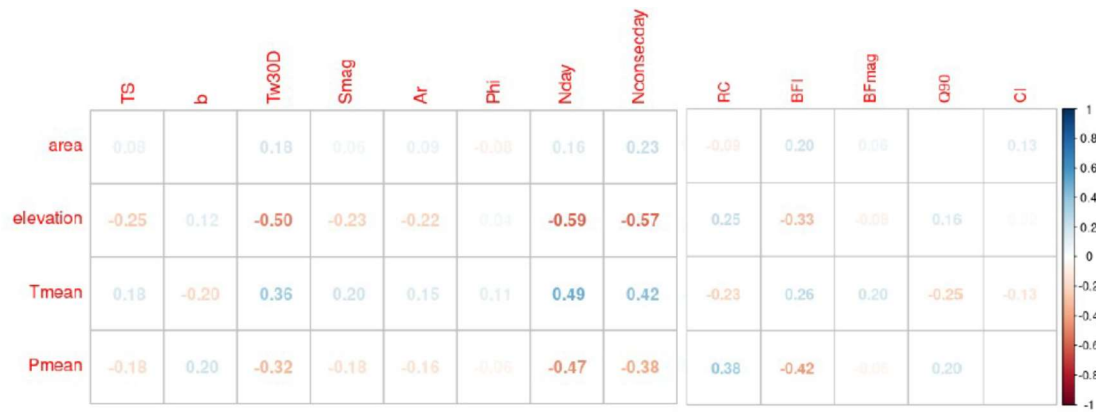


Figure 19. Coefficients de corrélation Pearson entre signatures hydrologiques et thermiques et les facteurs confondants (surface bassin versant, altitude, température moyenne atmosphérique, précipitation moyenne annuelle)

Concernant la robustesse des résultats, nous avons examiné la disponibilité des données de température de l'eau sur différentes années et évalué l'impact des conditions climatiques variables sur les signatures. Les signatures hydrologiques ne sont pas affectées par ce biais car les séries chronologiques sont complètes. La Figure 1 illustre l'hétérogénéité des séries chronologiques de température et révèle certaines tendances. Par exemple, les séries chronologiques de température pour les stations qui drainent des terrains de socle sont principalement mesurées avant 2014, tandis que celles des stations drainant des calcaires purs sont principalement observées après 2014. L'analyse de la climatologie des températures de l'air de 2010 à 2020 sur l'ensemble du bassin versant, comparée à la période de référence de 1990 à 2020, révèle que 2010 et 2013 sont des années plus froides. Après 2014, toutes les années affichent des températures supérieures à la valeur de référence. Il est important de noter que l'année de disponibilité des données peut influencer les valeurs de Tw30D, Nday et Nconsecday, qui sont fortement corrélées à la moyenne des températures atmosphériques, en particulier dans les zones de socle. Notamment, aucune de ces signatures ne reste constante de 1991 à 2020, affichant une tendance à la hausse au fil du temps. Cependant les autres signatures, notamment celles qui déterminent les contributions des aquifères (TS, b, Smag, Ar, Phi) sont peu sensibles aux conditions climatiques des années.

4.4. Analyse des signatures par profil longitudinal de rivière

Les figures suivantes montrent l'évolution longitudinale de quelques signatures thermiques permettant d'analyser la contribution plus ou moins importante des aquifères et la sensibilité de la température de l'eau au réchauffement atmosphérique. A partir des régressions entre les températures moyennes hebdomadaires de l'eau et de l'air pour chaque année d'observation, deux signatures sont extraites : la pente (TS, sans dimension) et l'intercepte (b, en °C), qui montre la température de l'eau lorsque la température de l'air est zéro. Ces deux signatures sont bien évidemment corrélées. Une valeur de TS proche de 1 et une valeur faible de b, montrent une influence importante des températures atmosphériques. Une valeur de TS proche de 0, et une valeur forte de b, montre une température de l'eau dont les valeurs sont indépendantes de la température de l'air. Les sections de

rivière avec un TS faible (b important), sont généralement influencées par les aquifères, qui tamponnent la température de l'eau. Aux sources, les températures de l'eau sont très peu variables (TS proche de zéro), et correspondent généralement aux moyennes annuelles de la température de l'air. La troisième signature choisie dans les figures suivantes est le Tw30, la moyenne de la température de l'eau des 30 jours consécutifs les plus chauds. Les sections des rivières avec un TS important (b faible), sont très sensibles à la température atmosphérique, ce qui engendre des températures estivales fortes. Pour des cours d'eau dans une zone climatique homogène, peu influencés par les aquifères, ces signatures augmentent (TS, Tw30) et diminuent (b) de façon continue de l'amont vers l'aval car la température de l'eau tend vers une température d'équilibre. Cependant des variations spatiales peuvent avoir lieu suivant les tronçons plus ou moins ombragés, la présence des affluents, des influences anthropiques. Cette évolution peut être visualisée pour les rivières Ardière, l'Oignon, le Dessoubre. Dans les zones calcaires ou karstiques, des arrivées ponctuels d'eau souterraine influencent fortement le profil en long des signatures, comme c'est le cas pour le Doubs, la Loue, et dans une moindre mesure le Drueon.

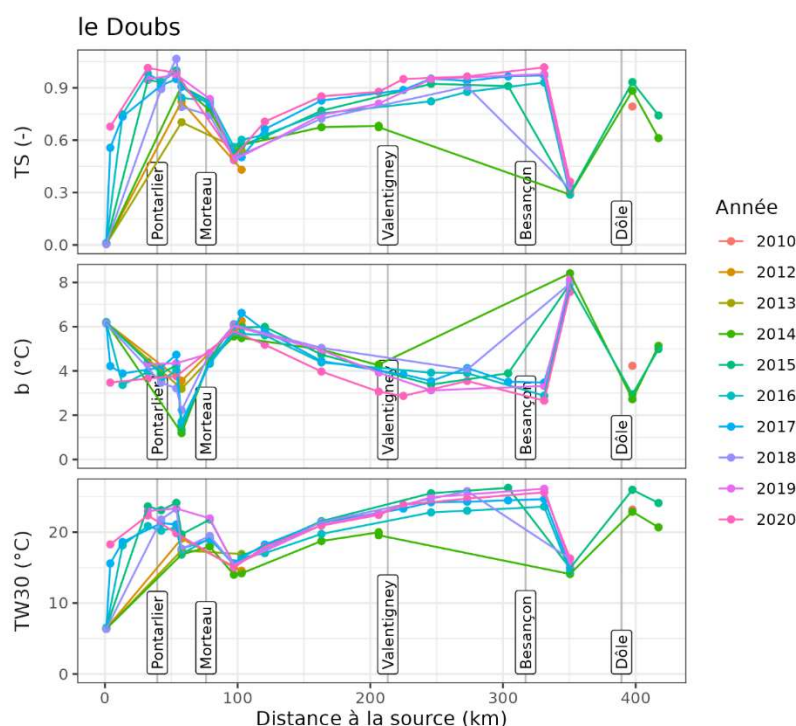


Figure 20. Profils en long des signatures thermiques du Doubs depuis la source. TS = pente de la régression entre température de l'eau et de l'air (moyennes hebdomadaires), b = intercepte de la régression entre température de l'eau et de l'air (moyennes hebdomadaires), Tw30 = moyenne des 30 jours consécutifs les plus chauds

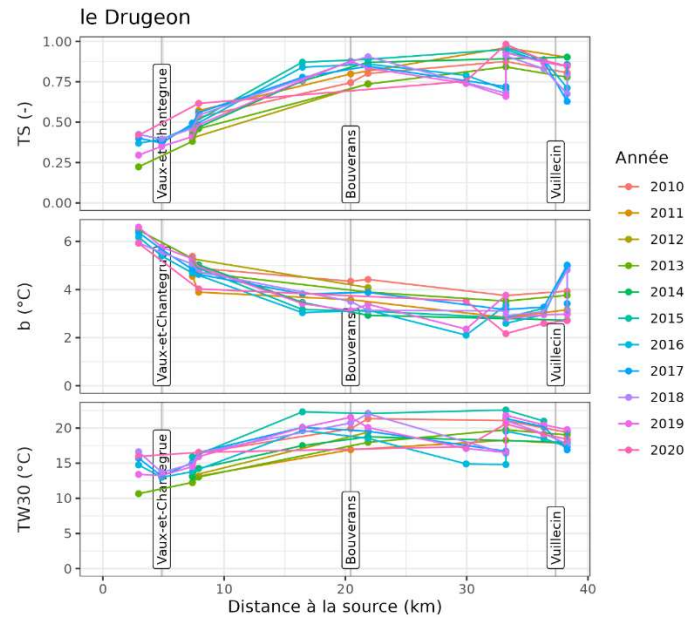


Figure 21. Profils en long des signatures thermiques du Drugeon depuis la source. TS = pente de la régression entre température de l'eau et de l'air (moyennes hebdomadaires), b = intercepte de la régression entre température de l'eau et de l'air (moyennes hebdomadaires), Tw30 = moyenne des 30 jours consécutifs les plus chauds

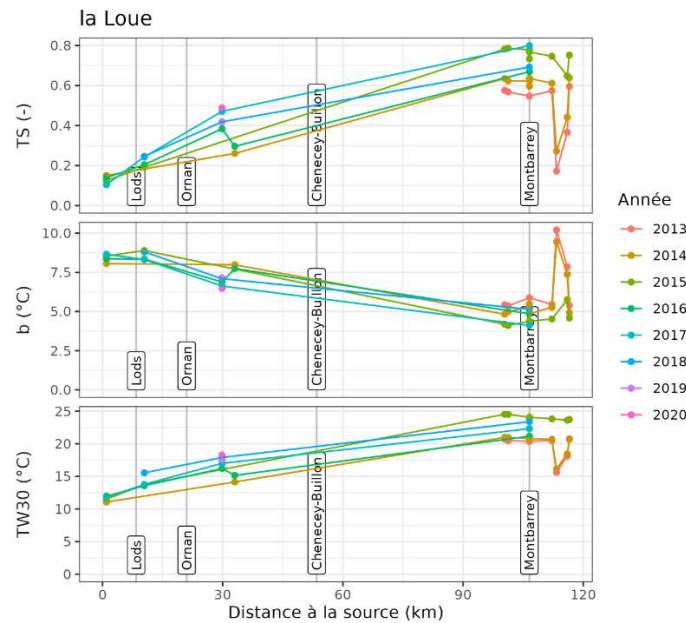


Figure 22. Profils en long des signatures thermiques de la Loue depuis la source. TS = pente de la régression entre température de l'eau et de l'air (moyennes hebdomadaires), b = intercepte de la régression entre température de l'eau et de l'air (moyennes hebdomadaires), Tw30 = moyenne des 30 jours consécutifs les plus chauds

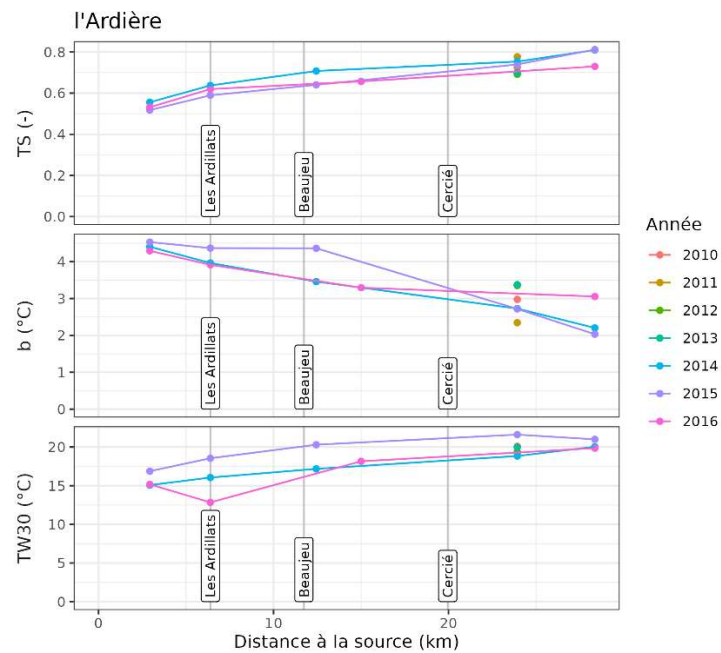


Figure 23. Profils en long des signatures thermiques de Ardière depuis la source. TS = pente de la régression entre température de l'eau et de l'air (moyennes hebdomadaires), b = intercepte de la régression entre température de l'eau et de l'air (moyennes hebdomadaires), Tw30 = moyenne des 30 jours consécutifs les plus chauds

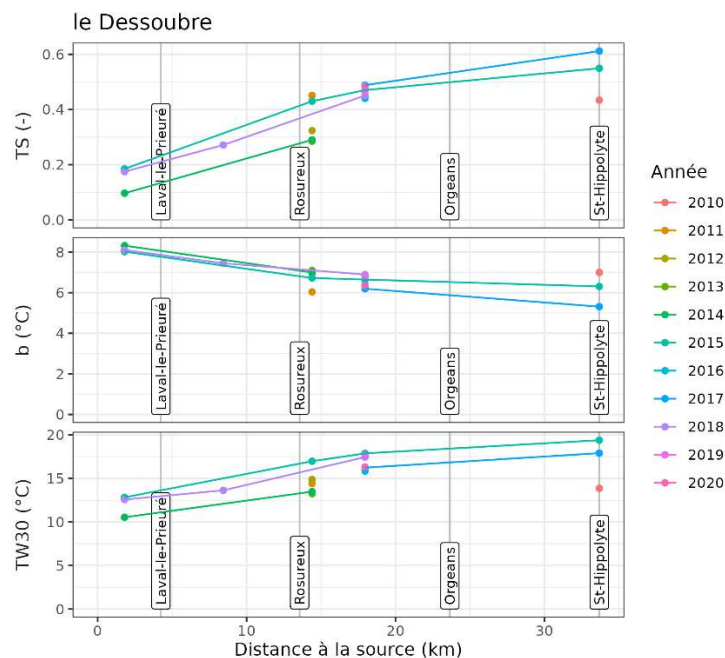


Figure 24. Profils en long des signatures thermiques du Dessoubre depuis la source. TS = pente de la régression entre température de l'eau et de l'air (moyennes hebdomadaires), b = intercepte de la régression entre température de l'eau et de l'air (moyennes hebdomadaires), Tw30 = moyenne des 30 jours consécutifs les plus chauds

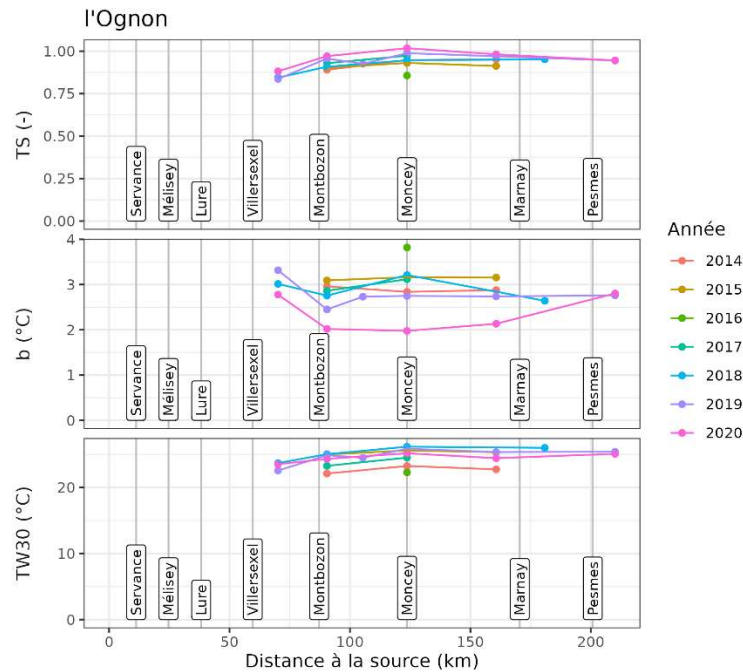


Figure 25. Profils en long des signatures thermiques de l'Ognon depuis la source. TS = pente de la régression entre température de l'eau et de l'air (moyennes hebdomadaires), b = intercepte de la régression entre température de l'eau et de l'air (moyennes hebdomadaires), Tw30 = moyenne des 30 jours consécutifs les plus chauds

5. Construction d'un modèle couplé hydrologie-thermie

5.1. Développement informatique pour l'application au bassin de la Saône

Le modèle T-NET (Beaufort et al, 2016) a été développé dans un premier temps pour une application au bassin de la Loire, et a été couplé au modèle hydrologique semi-distribué, EROS, du BRGM. Pour une application de T-NET au bassin de la Saône, par couplage au modèle hydrologique distribué, J-2000, il a été nécessaire de revoir les modalités d'association des débits simulés au réseau T-NET, les calculs de certains processus et les formats des fichiers échangés. Par exemple la redistribution des débits au niveau du réseau hydrographique et les calculs hydrauliques, incorporés initialement directement dans le code source de T-NET, ont été externalisés, pour un meilleur interfaçage avec différents modèles hydrologiques. Aussi, il a été décidé de transformer les fichiers d'entrée et de sorties sous la forme de netCDF, format qui permet de stocker des grands jeux de données scientifiques multidimensionnelles. Il est donc possible d'utiliser le format netCDF avec n'importe quel langage de programmation (R, Python, C++, etc.). Des fonctions ont été tout de même créées dans un nouveau package R, TnetRUI, afin de faciliter l'écriture et la lecture des données et des métadonnées relatives aux calculs réalisés (date d'exécution, fonction utilisée, paramètre de la fonction utilisé, historique de calcul, etc.). Cette étape a nécessité du

développement à la fois dans TnetRUI mais aussi dans T-NET pour rendre celui-ci compatible avec les fichiers NetCDF.

L'ensemble de ces développements informatiques ont été codés par des fonctions R et rassemblés dans un package R, dénommé TnetRUI. Ces développements permettent de concevoir la modélisation de la température de l'eau, plus modulable, permettant d'utiliser différents modules compte tenu des données d'entrée disponibles et des conceptualisations souhaitées. T-NET pourra ainsi dans un futur proche être couplé avec d'autres modèles hydrologiques, GRSD (modèle INRAE, de Lavenne et al, 2019), MORDOR (modèle EDF), et appliqué facilement à d'autres bassins versants.

5.2. Architecture du nouveau modèle couplé

La modélisation de la température de l'eau des réseaux hydrographiques réalisée par le code de calcul T-NET, écrit en C++, a été enrichie par deux modules de préparation des données d'entrée : TnetShape, pour la préparation des données spatiales sur le réseau hydrographique réel (BD Topage), qui est encore en cours de développement, notamment pour la partie végétation ; TnetRUI, pour la préparation des données de type séries chronologiques (débits simulés par J2000 et redistribution au niveau des tronçons, réanalyses météorologiques sur des mailles 8 kmx8km SAFRAN et association au prorata de la longueur du tronçon). Ce dernier module se présente sous la forme de plusieurs fonctions R, chacune ayant une tâche spécifique. L'enchaînement de ces fonctions permet l'exécution de l'ensemble des calculs nécessaires à la création des fichiers utilisés par T-NET.

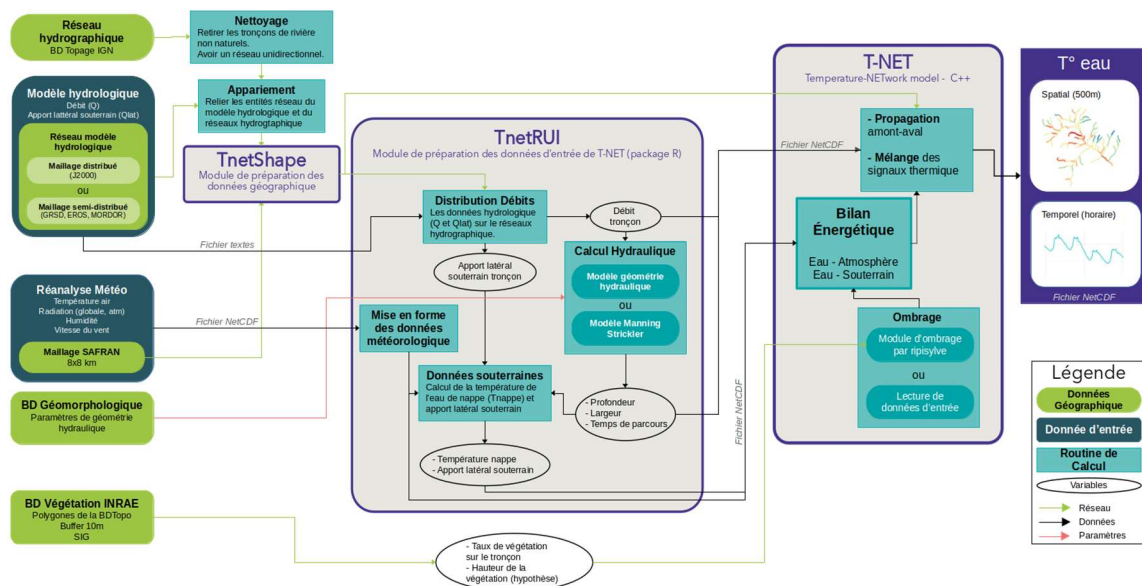


Figure 26. Schéma détaillé du fonctionnement de T-NET, TnetRUI, TnetShape et le lien avec le modèle hydrologique J2000

Les principales fonctions développées dans TnetRUI sont les suivantes :

- Distribution des débits simulés par le modèle hydrologique, pour chaque tronçon de calcul du modèle thermique. Le modèle hydrologique fonctionne généralement avec un réseau théorique, représenté par un réseau de thalwegs issus d'un modèle digital numérique de terrain, d'une certaine résolution spatiale. Or, les calculs du modèle T-NET se réalisent sur le réseau réel, observé sur le terrain à partir de

la photointerprétation, BD Topage, qui permet aussi d'associer une végétation et donc un ombrage spécifique à un tronçon donné. Ces deux réseaux ne coïncident pas précisément dans la plupart des cas. Les débits et les apports latéraux souterrains modélisés par le modèle hydrologique doivent donc être distribués sur le réseau réel.

- Calcul des caractéristiques hydrauliques des tronçons. Les débits journaliers simulés par le modèle hydrologique sont utilisés avec plusieurs équations de géométrie hydraulique pour estimer l'évolution dans le temps des largeurs et des profondeurs dans les tronçons. Ces estimations seront utilisées par le modèle T-NET pour déterminer les temps de parcours, et le bilan énergétique.

TnetShape, encore en cours de développement, permettra de calculer les informations suivantes :

- Nettoyage du réseau hydrographique et aide à l'appariement des réseaux,
- Effectuer un regroupement ou une découpe des tronçons déjà existants,
- Les informations nécessaires pour distribuer les débits simulés par le modèle hydrologique (de façon distribuée ou semi-distribuée) vers le réseau T-NET : i) Calcul des aires drainées de l'ensemble des tronçons, ii) Calcul de la longueur aval du réseau de l'ensemble des tronçons,
- Réaliser l'appariement entre le réseau hydrographique T-NET et les cellules de calcul de la réanalyse météorologique,
- Calculer la position et l'orientation des tronçons,
- Estimation de la géométrie de la ripisylve (hauteur, taux de végétation) ou de l'ombrage à partir des données LIDAR HD.

5.3. Construction de la modélisation hydrologique J-2000

5.3.1. Principes de J2000

Le modèle hydrologique J2000 a été développé à l'Université Friedrich-Schiller de Jéna (Allemagne) pour répondre aux enjeux de la Directive Cadre sur l'Eau (Krause et al., 2006), et est co-développé à INRAE Riverly depuis 2011. J2000 est un modèle totalement distribué, qui s'appuie sur un maillage irrégulier découpé en unités de réponse hydrologique (Hydrological Response Units, ou HRU) (Flügel, 1995) (Kumar et al., 2013), obtenues par croisement de couches d'informations géographiques décrivant le relief (MNT), la géologie, la pédologie et l'occupation des sols. Les différents processus hydrologiques y sont simulés dans des modules individuels interconnectés les uns aux autres. J2000 représente les processus hydrologiques principaux de manière simplifiée, tout en gardant un lien avec la physique des phénomènes, selon une approche « orientée processus » retenant les processus suivants : i) la partition des précipitations entre pluie et neige, ii) l'interception des précipitations par la végétation ; iii) l'évapotranspiration ; iv) les processus de fonte et d'accumulation de neige ; v) l'infiltration dans les sols ; vi) le ruissellement de surface ; vii) la recharge des nappes et le routage dans le réseau hydrographique (Figure 27). Le réseau hydrographique est interne au modèle, généré à partir du MNT lors de l'étape de création des HRUs.

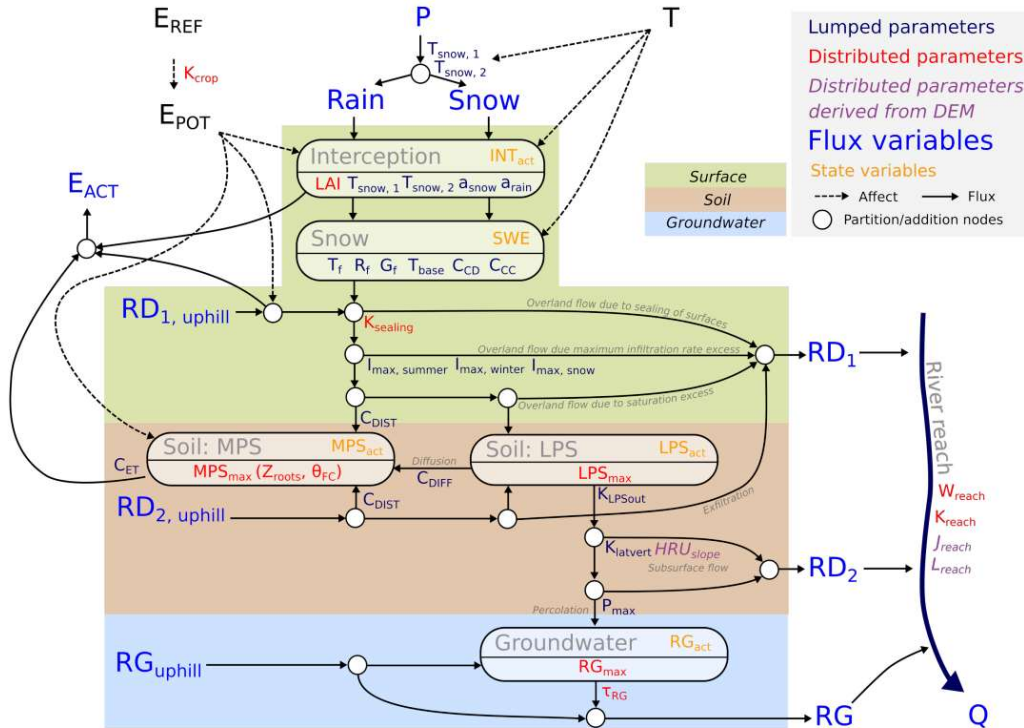


Figure 27. Diagramme descriptif des processus hydrologiques représentés dans J2000 (source : Horner, 2020)

Les variables climatiques en entrée du modèle sont la température de l'air, T , les précipitations totales, P , et l'évapotranspiration de référence, E_{ref} . Pour les calculs des variables d'état internes et des flux d'eau, le modèle possède des paramètres globaux (c'est à dire uniformes pour toutes les HRU ou tous les tronçons du réseau hydrographique), et des paramètres distribués (c'est à dire dont la valeur dépend de la HRU ou du tronçon). Le détail des calculs des processus de la Figure 27 peut être trouvé dans Horner (2020). A l'échelle d'une HRU, lors d'un évènement pluvieux, l'eau est partiellement interceptée par le couvert végétal s'il existe, en fonction de son indice de surface foliaire LAI ; le complément atteint le sol où une partie s'infiltrate et l'autre ruisselle. La partie non infiltrée constitue le ruissellement de surface $RD1$. Le modèle prévoit que le sol puisse former un écoulement de sub-surface ($RD2$), si la pente est importante ou le substrat peu infiltrant ; le complément percole vers un réservoir profond RG . L'écoulement d'eau généré sur une HRU est la somme du ruissellement, des écoulements de sub-surface et d'un écoulement lent depuis le réservoir profond. Ce dernier est régi par un coefficient de rétention k lié à la géologie du substrat. Les écoulements sont ensuite routés de HRU en HRU jusqu'à atteindre un tronçon du réseau hydrographique, selon la topologie déterminée lors de l'étape de création des HRUs. Dans le réseau hydrographique, l'acheminement de l'eau est simulé par une méthode d'onde cinématique simplifiée.

Pour la modélisation thermique, deux grandeurs simulées par le modèle hydrologique sont nécessaires : 1) le débit total, Q , nécessaire à l'advection du signal thermique dans le réseau hydrographique du modèle T-NET, et 2) la contribution du réservoir d'eau souterraine RG , permettant d'informer le flux de chaleur provenant de l'aquifère dans le calcul de la température d'équilibre.

5.3.2. Maillage et réseau hydrographique theorique

Le maillage en HRUs du modèle ainsi que sa topologie, c'est-à-dire le réseau de drainage qui correspond aux

liaisons entre HRUs, aux liaisons entre HRUs et tronçons ainsi qu'aux liaisons entre tronçons, sont obtenus via un outil de pré-processing appelé HRU-Delin. HRU-Delin a été développé en 2016 à INRAE à partir d'un outil pré-existant développé à l'Université d'Iéna. Il prend en compte la localisation des stations hydrométriques, le MNT et les couches raster des caractéristiques des sols, d'occupation du sol et de la géologie pour découper le réseau hydrographique aux bons endroits et bien délimiter les sous-bassins versants correspondants.

Le modèle numérique de terrain utilisé pour la mise en place de J2000 sur le bassin versant de la Saône est issu de la BD Alti 25m de l'IGN. Les données d'occupation du sol ont été transformées au format raster et sont classées en 16 catégories différentes d'après les bases de données Corine Land Cover 2012 et OSO THEIA (année 2018). Le sol est classifié selon 4 profondeurs de sol et en 5 classes de réserve utile issues de la base de données européenne European Soil Database. L'intersection des intervalles de profondeur et de réserve utile donne 10 classes différentes, dont une qui correspond à une classe de non sol. La classification de la géologie est issue de la BD LISA du BRGM à l'échelle locale. Le résultat de l'intersection entre les 3 propriétés de la BD LISA, Type (7 classes simplifiées en 5 classes principales : Poreux, Fracturé, Fissuré et Multi-Milieu), Nature (3 classes) et Thème (3 classes) donne 15 classes de géologie présentes sur le bassin versant. A noter qu'une partie de l'aire du bassin versant intersecte la Suisse (~2% de l'aire totale). Dans cette zone, le MNT et la BD LISA utilisés pour la partie française du bassin versant ne sont pas complets. Le MNT est fusionné avec celui du SRTM 30m de la NASA.

La surface minimale d'une HRU a été définie à 3km², soit 4800 pixels de 25*25m. Avec cette paramétrisation, nous obtenons 9841 HRUs de surface moyenne de 3,76km². La Figure 28 montre les HRUs ainsi générées et leur appartenance à chaque classe d'occupation des sols, de pédologie et de géologie.

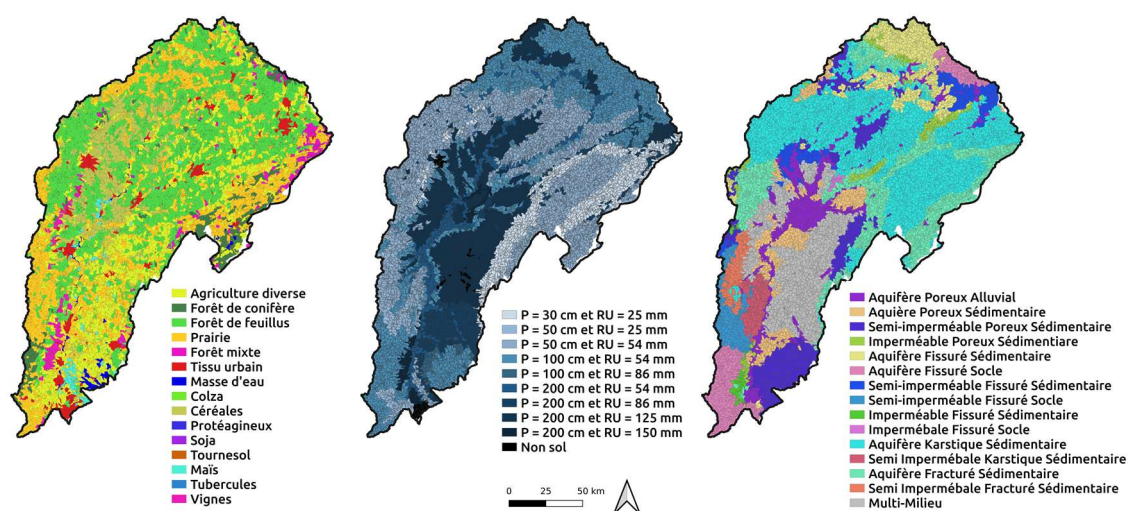


Figure 28. Appartenance des HRUs aux classes d'occupation des sols, de pédologie et géologie

Le réseau hydrographique obtenu à partir de HRU-Delin est purement théorique et basé sur l'analyse du MNT de résolution 25m*25m. Nous avons choisi de définir la naissance d'un tronçon sur chaque pixel collectant au moins 6000 pixels amont, soit 3,75 km². 87 stations hydrométriques sont prises en compte dans la définition du réseau. Ce paramétrage permet d'obtenir des débits sur 5106 tronçons drainant des bassins d'une surface allant de 3,75 km² à 29091 km² (voir Figure 29). A titre de comparaison, sur ce même secteur, le modèle J2000 Rhône compte 960 tronçons (Branger et al., 2016). Ce réseau étant basé uniquement sur la topographie, il ne prend pas en compte les particularités des secteurs karstiques. C'est pourquoi on observe sur ces secteurs un linéaire de cours d'eau qui n'existe pas dans la réalité, et des directions d'écoulement qui ne sont pas les directions d'écoulement réelles.

5.3.3. Prise en compte des usages de l'eau

L'usage de l'eau principal identifié sur le bassin versant de la Saône est l'irrigation. Le module irrigation de J2000, développé dans le cadre des projets MDR (Branger et al., 2016) et MDR-Usages (Branger et al., 2024) a donc été mis en place. Le principe du calcul de l'irrigation tient compte des besoins en eau des plantes, définis en fonction du type de culture, de l'indice foliaire, de la profondeur racinaire, de la période où l'irrigation est possible dans l'année, et du type d'irrigation (gravitaire, aspersion, goutte-à-goutte et de l'humidité du sol). Le besoin en eau de chaque plante est majoré en fonction de l'efficacité du type d'irrigation (le plus efficace étant le goutte à goutte et le moins efficace l'irrigation gravitaire). Pour chaque HRU irriguée, l'eau est prélevée dans un tronçon de cours d'eau ou dans le réservoir souterrain d'une HRU désignée comme source. Nous avons ici repris la paramétrisation du modèle du Rhône issue du projet MDR-Usages (Branger et al., 2024): une HRU est identifiée comme irriguée si elle appartient à un canton défini comme irrigué dans le Recensement Agricole 2010 (RGA 2010). L'attribution de l'irrigation a été faite aléatoirement sur les HRUs du canton de façon à respecter la surface irriguée du canton concerné. On obtient au total 17 HRUs irriguées pour une surface totale de 77 km² soit 0,26% de la surface totale du bassin (Figure 29).

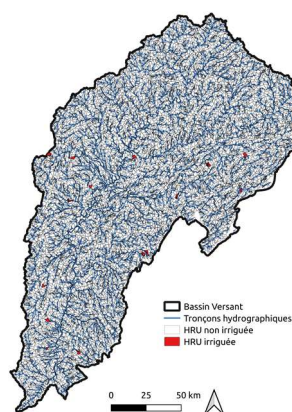


Figure 29. Réseau hydrographique J2000-Saône et unité de réponse hydrologique (HRU)

5.3.4. Paramétrisation initiale du modèle

La spécification des paramètres globaux de la modélisation initiale du modèle J2000-Saône est disponible dans le tableau suivant. Les valeurs des paramètres ont été largement inspirés des paramètres utilisés pour le modèle J2000-Rhône (Branger et al., 2016). De manière similaire, la spécification des paramètres distribués a été basée sur le modèle J2000-Rhône. Cependant, la paramétrisation a été adaptée, étant donné que les classes d'occupation du sol, de pédologie et géologie diffèrent. Pour le réseau hydrographique, la pente et la longueur sont dérivés directement du MNT. La largeur de chaque tronçon a été déterminée à partir d'une interpolation de 50 mesures réalisées sur orthophoto et balayant la gamme de variation des largeurs de tronçon, en utilisant les surfaces drainées.

Les tableaux suivants définissent et donnent les valeurs de chacun des paramètres distribués aux HRU utilisés dans J2000-Saône.

Variable	Description	Valeur
<i>a snow</i>	Capacité maximale de stockage d'interception par unité de LAI en cas de chute de neige.	1,5 km
<i>a rain</i>	Capacité maximale de stockage d'interception par unité de LAI en cas de pluie.	1 km
<i>T snow,1</i>	Température où il y a 50% de pluie et 50% de neige.	2 °C
<i>T snow,2</i>	Différence de température par rapport à <i>T snow,1</i> (resp. en dessous) où il n'y a que des précipitations (resp. uniquement des chutes de neige).	3 °C
<i>T base</i>	Température minimale à laquelle la neige fond	0 °C
<i>T f</i>	Facteur de température du modèle degré-jour de fonte des neiges.	1,84 mm.°C
<i>R f</i>	Facteur de précipitations du modèle de fonte des neiges en degrés-jours qui module l'effet de la chaleur provenant de l'apport de pluie sur la fonte des neiges.	0,0125 °C ⁻¹
<i>G f</i>	Facteur du sol du modèle de fonte des neiges en degrés-jours qui module l'effet de la chaleur du sol sur la fonte des neiges.	0 mm.°C
<i>C CD</i>	Densité critique de la neige. Lorsque la densité du manteau neigeux dépasse sa valeur, elle libère de l'eau.	0,7 g.cm ⁻³
<i>C CC</i>	Coefficient de teneur en froid qui module l'effet de la température dans l'augmentation de la température du manteau neigeux.	0,0012 -
<i>I max,summer</i>	Taux d'infiltration maximal du sol pendant les mois d'été (de mai à octobre).	40 mm.day ⁻¹
<i>I max,winter</i>	Taux d'infiltration maximum du sol pendant les mois d'hiver (de novembre à avril).	50 mm.day ⁻¹
<i>I max,snow</i>	Taux maximal d'infiltration du sol lorsque le sol est enneigé.	20 mm.day ⁻¹
<i>C DIST</i>	Coefficient modulant le débit entrant dans le réservoir MPS lors du processus d'infiltration.	0 -
<i>C DIFF</i>	Coefficient modulant le débit entrant dans le réservoir MPS dans le processus de diffusion, c'est-à-dire lorsque l'eau est diffusée des grands pores (réservoir LPS) vers les pores plus petits (réservoir MPS).	5 -
<i>K LPSout</i>	Coefficient contrôlant la facilité/rapidité avec laquelle le réservoir de LPS peut se vidanger	5 -
<i>K latvert</i>	Coefficient contrôlant le poids donné à la pente du HRU dans la partition de l'eau entre l'écoulement souterrain latéral et la percolation vers le réservoir d'eau souterraine.	1 -
<i>C ET</i>	Coefficient modulant la capacité des plantes à prélever de l'eau du réservoir MPS lorsque la saturation MPS est inférieure à cette valeur.	0,9 -
<i>P max</i>	Taux maximal d'afflux dans le réservoir d'eau souterraine (taux de percolation maximal).	20 mm.day ⁻¹

		Agriculture	Conifère	Faillu	Prairie	Forêt mixte	Urban	Masse d'eau	Colza	Céréales	Protégé	Soja	Tournesol	Mais	Tubercules	Vergers	Vignes	Base de donnée
K crop	Janvier	0,5	1	1	1	1	1	0,5	0,35	0,25	0,3	0,5	0,35	0,6	0,75	0,85	0,5	FAO (Allen et al., 1998)
	Février	0,5	1	1	1	1	1	0,5	0,35	0,25	0,3	0,5	0,35	0,6	0,75	0,85	0,5	FAO (Allen et al., 1998)
	Mars	0,5	1,1	1,1	1	1,1	1	0,5	0,35	0,25	0,3	0,5	0,35	0,6	0,75	0,85	0,5	FAO (Allen et al., 1998)
	avril	0,75	1,1	1,1	1	1,1	1	0,5	0,6	0,5	0,6	0,75	0,6	0,9	1	1	0,6	FAO (Allen et al., 1998)
	mai	1	1,2	1,2	1	1,2	1	0,5	1,15	1,15	1,1	1,15	1,15	1,2	1,15	1,2	0,75	FAO (Allen et al., 1998)
	juin	1	1,2	1,2	1	1,2	1	0,5	1,15	1,15	1	1,15	1,15	1,2	1,15	1,2	0,75	FAO (Allen et al., 1998)
	juillet	1	1,2	1,2	1	1,2	1	0,5	1,15	1,15	1,1	1,15	1,15	1,2	1,15	1,2	0,75	FAO (Allen et al., 1998)
	août	1	1,2	1,2	1	1,2	1	0,5	1,15	1,15	1,1	1,15	1,15	1,2	1,15	1,2	0,75	FAO (Allen et al., 1998)
	septembre	1	1,1	1,1	1	1,1	1	0,5	1,15	1,15	1,1	1,15	1,15	1,2	1,15	1,2	0,75	FAO (Allen et al., 1998)
	octobre	0,75	1,1	1,1	1	1,1	1	0,5	0,6	0,5	0,6	0,75	0,6	0,9	1	1	0,6	FAO (Allen et al., 1998)
	novembre	0,5	1	1	1	1	1	0,5	0,35	0,25	0,3	0,5	0,35	0,6	0,75	0,85	0,5	FAO (Allen et al., 1998)
	décembre	0,5	1	1	1	1	1	0,5	0,35	0,25	0,3	0,5	0,35	0,6	0,75	0,85	0,5	FAO (Allen et al., 1998)
LAI	Janvier	1	2	2	1	2	1,5	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	ECOCCLIMAP
	Février	1,5	2,5	2,5	1	2,5	1,5	0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	ECOCCLIMAP
	Mars	2	3	3	1,5	3	1,5	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	ECOCCLIMAP
	avril	2,5	3,5	3,5	2	3,5	1,5	0	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	ECOCCLIMAP
	mai	3	4	4	2,5	4	1,5	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	ECOCCLIMAP
	juin	4	4	4	3	4	1,5	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	ECOCCLIMAP
	juillet	4	4	4	3	4	1,5	0	4	4	4	4	4	4	4	4	4	ECOCCLIMAP
	août	3	4	4	2,5	4	1,5	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	ECOCCLIMAP
	septembre	2,5	3,5	3,5	2	3,5	1,5	0	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	ECOCCLIMAP
	octobre	2	3	3	1,5	3	1,5	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	ECOCCLIMAP
	novembre	1,5	2,5	2,5	1	2,5	1,5	0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	ECOCCLIMAP
	décembre	1	2	2	1	2	1,5	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	ECOCCLIMAP
Z roots	Profondeur des racines	30	15	15	15	15	7,5	0	16	30	10	14	15	30	5	30	30 dm	FAO
K sealing	Proportion de surface étanche	0,3	0,05	0,05	0,1	0,05	0,6	0	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	Adaptation du calage de J2000-Rhône

	Profondeur (cm) Réserve utile (mm)	30 25	50 25	50 54	100 54	100 86	200 54	200 86	200 125	200 150	non sol non sol	unité	Base de donnée
θ_{FC}	Capacités au champ des tranches du sol (couches de sol de 10 cm d'épaisseur)	8	5	11	5	9	3	4	6	8		mm.dm ⁻¹	European Soil DataBase (Le Bas ; 2018, 2021)
LPS_{max}	Capacité maximale de stockage du réservoir LPS, correspondant à la capacité en air ou à la porosité du sol	130	130	140	180	180	250	250	250	250		mm	European Soil DataBase (Le Bas ; 2018, 2021)

	Type Nature Thème	Poreux Aquifère Alluvial	Poreux Aquifère Sédimentaire	Poreux Semi-imperméable Sédimentaire	Poreux Imperméable Sédimentaire	Fissuré Aquifère Sédimentaire	Fissuré Aquifère Socle	Fissuré Semi-imperméable Sédimentaire	Fissuré Semi-imperméable Socle	Fissuré Imperméable Sédimentaire	Fissuré Imperméable Socle	Karst Aquifère Sédimentaire	Karst Semi-imperméable Sédimentaire	Fracturé Aquifère Sédimentaire	Fracturé Semi-imperméable Sédimentaire	Multi milieu Semi-imperméable Sédimentaire		
RG_{max}	Capacité maximale de stockage du réservoir d'eau souterraine	1000	700	170	100	200	250	200	390	160	385	300	300	250	250	350	mm	Adaptation du calage de J2000-Rhône
τ_{RG}	Temps de vidange du réservoir d'eau souterraine	20	70	40	30	30	20	40	6	20	25	10	20	20	30	30	jours	Adaptation du calage de J2000-Rhône

5.3.5. Calibration du modèle hydrologique

Les simulations de J2000-Saône ont été réalisées au pas de temps journalier, de 1970 à 2021. Les 20 premières années sont éliminées du calcul des critères de performance ou des signatures car étant considérées comme faisant partie de l'initialisation du modèle, notamment des processus de stockage et déstockage (neige et réservoirs souterrains). Les débits de sortie sont sauvegardés à 87 stations hydrologiques considérées précédemment comme hydrologie naturelle, avec au moins 50 % de données disponibles sur la période.

La version finale de J2000-Saône a été construite en plusieurs étapes afin d'améliorer la performance du modèle et sa capacité à représenter les processus hydrologiques du bassin, notamment pour affiner la représentation des écoulements souterrains. Trois versions successives du modèle ont été calibrées manuellement et évaluées selon divers critères et indicateurs calculés à partir des chroniques de débits simulés et observés.

La première version, appelée version initiale, a été réalisée en utilisant directement les sorties de HRU-Delin ainsi que les paramètres distribués issus du modèle J2000 Rhône et de la littérature et présentés précédemment. Cette version initiale a permis de générer une première simulation des débits, mais elle a révélé certaines lacunes, notamment liées à des erreurs topologiques dans le réseau hydrographique, des défauts dans le paramétrage du routage, ainsi que des cumuls de débits supérieurs aux observations.

La deuxième version du modèle, appelée version de référence, a intégré des améliorations substantielles basées sur la correction de ces erreurs à l'aide de critères de performance classiques, tels que le Kling-Gupta Efficiency (KGE), le Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), et le biais global, ainsi que le biais spécifique à la période estivale (JJA), afin de mieux capter les dynamiques hydrologiques saisonnières. Nous avons affiné les paramètres de routage, augmenté la valeur de coefficients culturels afin de corriger les biais observés, et optimisé la représentation du réseau hydrographique à partir d'une critique visuelle.

Enfin, une dernière version du modèle a été développée en ajoutant un niveau d'analyse plus approfondi basé sur les signatures hydrologiques. Ces signatures, telles que le Quantile90 des débits (Q90), le Runoff Coefficient (RC), l'indice de concavité (CI) et l'indice de débit de base (Baseflow Index, BFI), ont permis d'améliorer la représentation des processus hydrologiques sous-jacents, notamment en ce qui concerne la modélisation des écoulements souterrains (paramètres contrôlant la taille des réservoirs de sol, du sous-sol, ainsi que le temps de vidange du réservoir souterrain). Dans cette dernière version, on obtient un biais médian de +2%, un biais sur la saison estivale (JJA) de -2%, ainsi qu'un KGE et un NSE médians de 0,63 et 0,50 respectivement, contre +22%, +54%,

à 46 et 0,38 pour ces mêmes critères, respectivement, pour la simulation initiale, et -4%, -8%, 0,59 et 0,49, respectivement, pour la simulation dite de référence. La Figure 30 montre la carte des critères de performance KGE et NSE pour cette dernière version du modèle, pour les 87 stations hydrométriques de contrôle. Globalement, le modèle présente de bonnes performances. Les stations présentant les KGE les plus faibles sont également celles qui posent problème du point de vue du NSE et correspondent principalement au secteur karstique du Doubs amont, ainsi qu'au secteur aval du bassin versant et en particulier le secteur des Dombes dont l'hydrologie est très particulière (et fortement influencée par la gestion des étangs). On peut considérer la performance du J2000-Saône comme satisfaisante du point de vue de l'hydrologie.

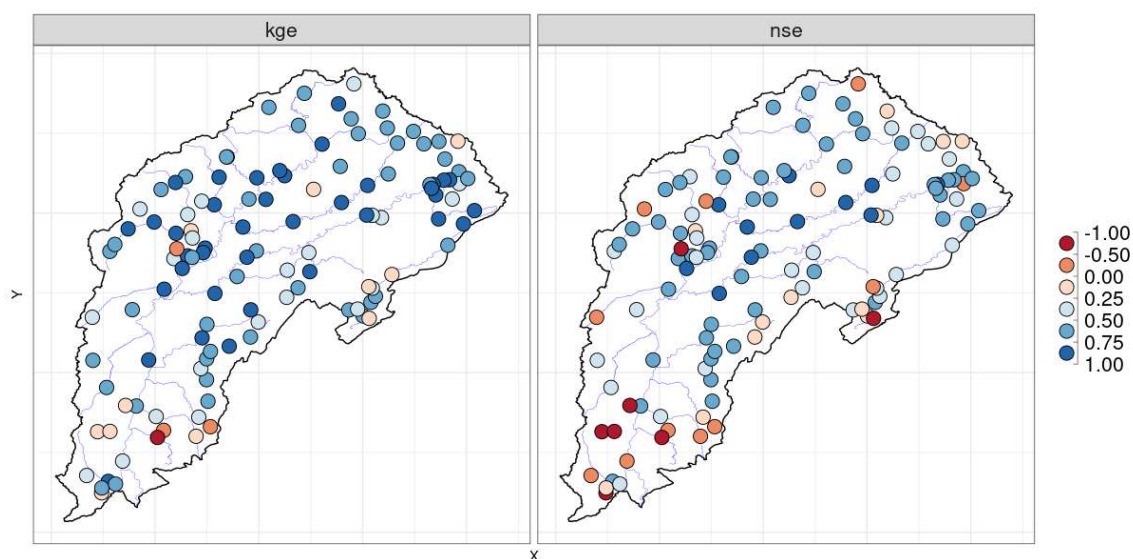


Figure 30. Performance du modèle hydrologique amélioré J2000 Saône

5.4. Construction du modèle thermique T-NET, couplé au modèle J-2000

5.4.1. Principe du modèle T-NET et données d'entrée

Le modèle thermique T-NET (Temperature-NETwork) est un modèle physique basé sur les processus, développé par (Beaufort et al., 2016) et (Loicq et al., 2018). T-NET simule la température de l'eau au pas de temps horaire en fonction des forçages météorologiques, des débits journaliers et de nappe simulés par un modèle hydrologique; Il tient compte également des caractéristiques géométriques et de végétation du réseau hydrographique (Figure 31).

Le calcul est réalisé en trois étapes. La première consiste à simuler la température d'équilibre (T_e) et du coefficient d'échange thermique (K_e) par résolution du bilan énergétique. Dans un deuxième temps, la variation longitudinale de la température de l'eau est simulée par une approche lagrangienne entre chaque nœud amont et aval d'un tronçon, en tenant compte de la vitesse à laquelle la température de l'eau converge vers la température d'équilibre (K_e). La troisième étape consiste au mélange des températures aux confluences de tronçons, en fonction de leurs débits respectifs afin de déterminer la température du nœud final du tronçon aval. La rédaction qui présente ces trois étapes est basée sur la thèse de Aurélien Beaufort, 2014.

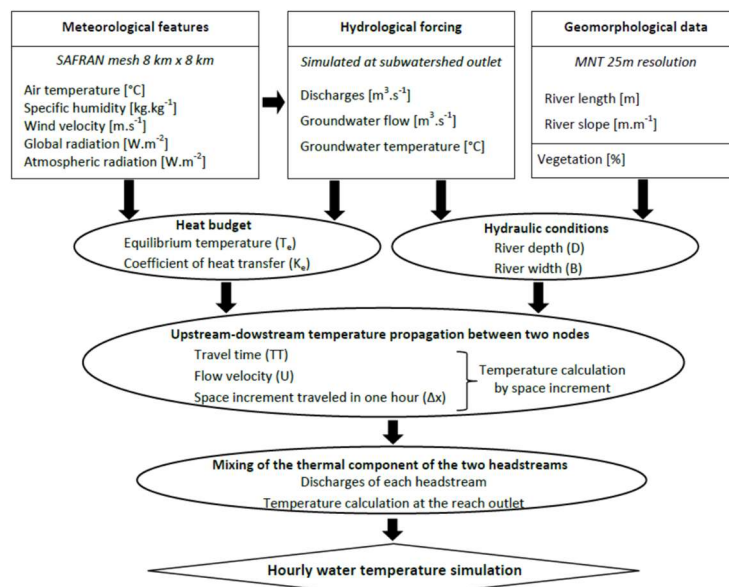


Figure 31. Principe du modèle T-NET et données d'entrée du modèle (d'après Beaufort, 2014)

Calcul du bilan énergétique, concept de température d'équilibre et température approche stationnelle

En faisant l'hypothèse que les phénomènes de diffusion sont négligeables et pour un écoulement permanent et uniforme, à l'échelle des bassins régionaux, l'équation de chaleur 1D s'écrit :

$$A \frac{\partial T_w}{\partial t} + Q \frac{\partial T_w}{\partial x} = \frac{B \sum H_i(t)}{\rho_w C p_w} \quad \text{Eq. 1}$$

Avec A la section en travers du cours d'eau [m²], Q, débit volumique [m³.s⁻¹], T_w la température de l'eau [°C], B la largeur du cours d'eau [m], C_{p_w} la chaleur spécifique de l'eau, ρ_w la densité volumique de l'eau et H_i la somme des flux énergétiques intervenant aux limites de la masse d'eau. En approche stationnelle, le terme d'advection de l'équation de transport de la température au sein d'un cours d'eau est négligé. Cette équation peut alors s'écrire sous la forme :

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} = \frac{\sum H_i(t)}{\rho_w C p_w D} \quad \text{Eq. 2}$$

Avec D la profondeur (m).

Le bilan énergétique prend en compte les échanges énergétiques aux interfaces eau/atmosphères et à l'interface eau/sédiments.

Les échanges thermiques à l'interface eau/atmosphère sont composés par :

- Les transferts par rayonnement : rayonnement solaire ondes courtes (H_{ns}), le rayonnement atmosphérique ondes longues (H_{la}), rayonnement émis par la masse d'eau ondes longues (H_{lw}),
- Les transferts de chaleur latente par évaporation et condensation à la surface de la masse d'eau (H_e),
- Les transferts de chaleur sensible entre la masse d'eau et l'atmosphère par conduction et convection (H_c).

A l'interface eau/sédiments, un sixième flux énergétique associé aux échanges nappe/rivière (H_g) est inclus dans le bilan énergétique. Compte tenu de la difficulté à estimer les flux de chaleur résultant de la conduction entre les sédiments et l'eau ainsi que des échanges entre les eaux de surface et les eaux hyporhéiques à une échelle régionale, ces termes ont été négligés.

$$\sum_i H_i = H_{ns} + H_{la} - H_{lw} + H_c - H_e + H_g \quad \text{Eq. 3}$$

Les équations et l'ensemble des paramètres nécessaires pour le calcul des 6 flux énergétiques sont détaillés dans le Tableau 3. Leurs formulations sont issues des travaux de Bustillo *et al.* (2014) pour les échanges à l'interface eau/atmosphère et des travaux de Herb et Stefan (2011) pour les apports énergétiques provenant des nappes.

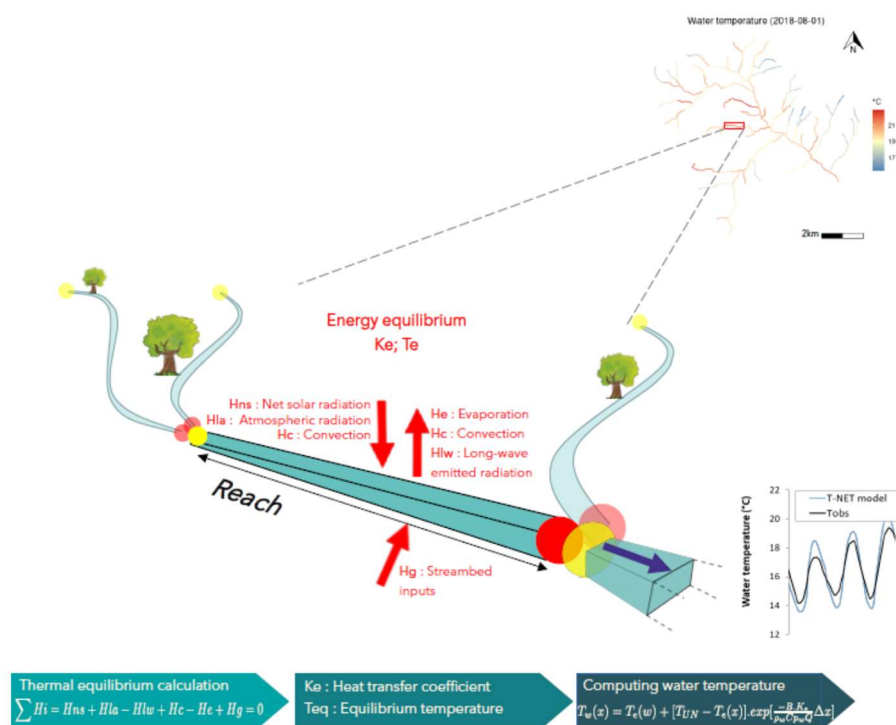


Figure 32. Bilan énergétique, température d'équilibre, coefficient d'échange thermique et propagation

Flux énergétiques (W.m ⁻²)	Formulations	Paramètres	Hypothèses
Ray. ondes courtes (H_{ns})	$H_{ns} = (1 - Alb) \cdot Rg \cdot (1 - SF)$	Alb : Albédo de la surface de l'eau Rg : Ray. global [W.m ⁻²] SF : Coefficient d'ombrage	Alb = 0.06
Ray. ondes longues (H_{la})		Donnée disponible dans la base SAFRAN (réanalyses atmosphériques)	Ou elle peut être calculée avec les formules ci-après
	$H_{la} = \varepsilon_a \cdot \sigma \cdot (T_a + 273.15)^4 \times (1 + 0.22 \cdot Cld^{2.75})$	ε_a : Emissivité de l'atmosphère σ : Constante de Boltzmann T_a : Température de l'air [°C] Cld : Fraction de couverture nuageuse	$\varepsilon_a = \text{constant}$ $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$
Ray. ondes longues réémis (H_{lw})	$H_{lw} = \varepsilon_w \cdot \sigma \cdot (T_w + 273.15)^4$	ε_w : Emissivité de l'eau T_w : Température de l'eau [°C]	$\varepsilon_w = 0.97$ $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$
Convection (H_c)	$H_c = B \cdot f(w) \cdot (T_a - T_w)$	B : Coefficient de Bowen $f(w) = aw + b$: fonction de vent w : vitesse du vent à 2 m [m.s ⁻¹]	$a = 4$; $b = 7.4 \text{ [W.m}^{-2} \cdot \text{mb}^{-1}]$ $B = 0.62 \text{ mbar.K}^{-1}$
Evaporation (H_e)	$H_e = f(w) \cdot (e_s - e_a)$	e_a : Pression de vapeur d'eau dans l'air [mb] e_s : Pression de vapeur saturante pour T _w [mb]	Approximation de Magnus-Teten: $e_s = 6.11 \cdot \exp\left(\frac{17.27 \cdot T_w}{273.3 + T_w}\right)$
Flux de chaleur des aquifères (H_g)	$H_g = \rho_w C_p \frac{Q_G}{A} (T_g - T_w)$	T _g : Température de nappe [°C] ρ_w : Densité de l'eau [kg.m ⁻³] C _p : Capacité thermique de l'eau [J.kg ⁻¹ .°K ⁻¹] Q _G : Débit de nappe [m ³ .s ⁻¹] A : Aire d'échange entre la nappe et la rivière [m ²]	

Tableau 3. Formulations et paramètres utilisés pour le calcul des flux énergétiques

Le concept de température d'équilibre repose sur deux variables centrales : la température d'équilibre (T_e) et le coefficient d'échange thermique (K_e) et suppose que le bilan énergétique est proportionnel à la différence entre la température de l'eau et la température d'équilibre. La température d'équilibre est définie comme étant la température de l'eau qui serait atteinte en régime stationnaire c'est-à-dire lorsque la somme des échanges entre les flux énergétiques intervenant aux limites de la masse d'eau est nulle ($\sum H_i = 0$). Ce flux peut être linéarisé en établissant que le taux d'échange énergétique est proportionnel à l'écart entre la température de l'eau et la température d'équilibre (Edinger et al, 1968) :

$$\sum_i H_i = K_e (T_e - T_w) \quad \text{Eq. 4}$$

Le coefficient d'échange thermique correspond à la vitesse à laquelle la température de l'eau va répondre aux différents processus d'échanges thermiques et est exprimé en $[W/m^2/K]$. D'après les travaux de Poulin (1980) et de Bustillo et al. (2014), il peut être déterminé à partir d'une formule théorique correspondant à la somme des dérivés partielles des flux énergétiques (H_i) par rapport à la température d'équilibre (T_e) soit :

$$K_e = - \sum_i \partial H_i / \partial T_e \quad \text{Eq. 5}$$

En substituant les termes de Eq.4 dans Eq. 2 on peut alors calculer la température en fonction du temps selon l'équation de température, dite « approche stationnelle ». Le principe de l'approche stationnelle simule la température au pas de temps journalier ou horaire de façon locale sans tenir compte des conditions thermiques amont. Tout d'abord les forçages météorologiques (maille 8 km x 8 km) et hydrologiques sont intégrés pour calculer la température d'équilibre par résolution du bilan énergétique au pas de temps journalier ou horaire. Les équations de géométrie hydraulique (Morel et al, 2020) permettent de déterminer la profondeur et la largeur en fonction du débit simulé par le modèle J2000 au pas de temps journalier.

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} = \frac{K_e}{\rho_w C p_w D} \times (T_e - T_w) \quad \text{Eq. 6}$$

Cette équation indique que la vitesse à laquelle la température de l'eau s'approche de la température d'équilibre varie proportionnellement à $K_e/D(t)$. Cette formule est l'équation fondamentale des modèles basés sur le concept de température d'équilibre et différents modèles varient en fonction de la façon de déterminer le K_e .

Coefficient d'échange thermique K_e

Dans la continuité des travaux de Edinger et al, 1968, le coefficient d'échange thermique K_e est déterminé avec la formule théorique issue de la dérivée des flux énergétiques par rapport à la température de l'eau (Bustillo et al, 2014, Beaufort et al, 2016)

$$K_e(t) = 4\varepsilon\sigma(T_w(t) + 273.15)^3 + f(w) \left(0.62 + 6.11 \cdot \frac{17.27 \times 237.3}{(237.3 + T_w(t))^2} \right) \exp \left[\frac{17.27 \times T_w(t)}{237.3 + T_w(t)} \right] + \rho_w C p_w \frac{Q_g(t)}{A} \quad \text{Eq. 7}$$

Où $f(w)$ est la fonction de vent, Q_g le débit provenant de la nappe et alimentant la rivière ($m^3.s^{-1}$), A est la surface d'échange entre la nappe et la rivière (m^2) et Q_g/A représente l'écoulement de nappe ($m.s^{-1}$).

En conclusion, la température journalière en mode stationnel, est déterminé par l'équation suivante :

$$T_w(t) = T_e(t) + [T_w(t - \Delta t) - T_e(t)] \cdot \exp\left[\frac{-K_e(t)}{\rho_w C p_w D(t)} \Delta t\right] \quad \text{Eq. 8}$$

Cette équation est utilisée pour le premier tronçon des ordres de strahler 1.

Calcul de la température – approche par propagation

Le principe de l'approche par propagation consiste à calculer l'évolution de la température de manière lagrangienne (c'est-à-dire en se déplaçant avec la masse d'eau qui change son bilan énergétique) le long du réseau hydrographique. Pour cela on tient compte d'une dimension temporelle et d'une dimension spatiale longitudinale. Ce calcul est effectué en deux grandes étapes que nous allons détailler. La première consiste à calculer l'évolution de la température lors de son parcours sur un tronçon unitaire entre le nœud amont et le nœud aval. La seconde étape est effectuée au niveau des confluences entre deux tronçons et consiste à mélanger les flux thermiques calculés à l'exutoire des deux tronçons « père » (sur le nœud aval) en tenant compte du débit respectif des deux masses d'eau. Ce mélange permet de déterminer la température sur le nœud amont du tronçon « fils » formé par la confluence des deux tronçons « père ». En combinant ces deux étapes, la température de l'eau est calculée au pas de temps horaire en parcourant l'arborescence du réseau hydrographique d'amont en aval sur chaque nœud de l'ensemble des tronçons jusqu'à l'exutoire final.

Calcul de la température lors du parcours d'un tronçon

Cette étape consiste à calculer l'évolution de la température initiale du nœud amont (T_{amont}) d'un tronçon lors de son trajet jusqu'au nœud aval pour déterminer une température aval (T_{aval}). La température du nœud amont (T_{amont}) de chaque tronçon d'ordre 1, constituant les points source du réseau, est calculée via les équations de la modélisation stationnelle en appliquant l'équation Eq. 8 .

Si les variables temporelles restent constantes lors de l'écoulement de l'eau, l'équation Eq. 1 peut être transformée pour décrire le taux de changement de la température en fonction de la distance parcourue, dû aux échanges énergétiques aux interfaces eau/atmosphère et eau/sédiments.

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{B \sum H_i(t)}{\rho_w C p_w Q} \quad \text{Eq. 9}$$

Les paramètres de l'équation Eq. 9 peuvent être réécrits en utilisant les équations Eq. 4 dérivées du concept de température d'équilibre ce qui conduit à l'équation suivante :

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{K_e B}{\rho_w C p_w Q} (T_e - T_w) \quad \text{Eq. 10}$$

La variation longitudinale de la température de l'eau est résolue via l'équation suivante :

$$T_{aval}(x) = T_e + [T_{amont} - T_e] \cdot \exp\left[\frac{-B \cdot K_e}{\rho_w C p_w Q} \Delta x\right] \quad Eq. 11$$

Avec t : temps en heure, $\sum Hi$: somme des flux énergétiques, Q : débit du cours d'eau ($m^3 \cdot s^{-1}$), B : Largeur (m) et Δx : pas d'espace (m). Il est nécessaire que toutes les variables en entrée du modèle (météorologie, hydrologie, géomorphologie et végétation) soient constantes pour permettre le calcul de l'évolution de la température via l'équation 8.

Pour calculer la température au nœud aval (T_{aval}) d'un tronçon à un instant (t), le temps nécessaire à la masse d'eau pour effectuer le trajet du nœud aval au nœud amont est déterminé en tenant compte de la vitesse du courant (U) et de la longueur du tronçon (L). De ce fait, si le temps (tp) nécessaire pour parcourir un tronçon j est **inférieur à une heure** alors les forçages météorologiques et hydrologiques (vitesse et profondeur) sont constants. On peut donc appliquer l'équation 11 pour calculer T_{aval} . Dans ce cas de figure le pas d'espace (Δx) est égal à la longueur du tronçon.

Dans le cas de figure où le temps (tp) nécessaire pour parcourir le tronçon j est **supérieur à une heure** alors le signal thermique de T_{amont} va évoluer toutes les heures lors de son trajet en fonction des conditions météorologiques. Un pas d'espace (Δx) est donc déterminé en tenant compte du temps de parcours (tp) et de la longueur du tronçon (L) et correspond à la distance parcourue par l'eau transitant dans le tronçon en une heure, ce qui correspond à la résolution temporelle des données météorologique issues du forçage SAFRAN.

$$\Delta x = \frac{L}{tp} \quad Eq. 12$$

Avec L : Longueur du tronçon [m], tp : temps de parcours [h] et $\in N$. On définit donc un nombre d'incrément d'espace (n_{max}) pendant lequel le temps de parcours sera d'une heure pour que les données météo soient constantes dans chaque pas d'espace : $n_{max} = tp$

Ceci permet de calculer l'évolution de la température toutes les heures par une succession de simulations « court-terme » où les caractéristiques météorologiques et hydrologiques sont constantes. Pour calculer l'évolution de la température du nœud amont prise à l'instant $t = t - tp$, il faudra procéder à une suite de simulations indépendantes jusqu'au $n^{ième}$ incrément d'espace selon l'équation suivante :

$$T_w(x) = T_e(x) + [T_{amont}(x - \Delta x) - T_e(x)] \cdot \exp\left[\frac{-B \cdot K_e}{\rho_w C p_w Q} \Delta x\right] \quad Eq. 13$$

Le bilan énergétique est recalculé lors de chaque incrément d'espace Δx . Une fois que tous les incréments d'espaces sont parcourus on obtient la température du nœud amont prise à l'instant $t - tp$ qui a évolué lors du trajet le long du tronçon jusqu'à l'incrément d'espace n_{max} correspondant au nœud aval :

$$T_{aval} = T_w(n_{max}) \quad Eq. 14$$

Mélange à la confluence de deux tronçons

Sur le tronçon suivant ($j+1$), la température du nœud amont à l'instant t (T_{amont}) correspond au mélange des

températures calculées au même instant t au nœud aval des 2 tronçons entrants pondérées par leur débit respectif.

$$T_{\text{amont}_3}(t) = T_{\text{aval}_1} \times \left(\frac{Q_{\text{aval}_1}(t)}{Q_{\text{amont}_3}(t)} \right) + T_{\text{aval}_2} \times \left(\frac{Q_{\text{aval}_2}(t)}{Q_{\text{amont}_3}(t)} \right) \quad \text{Eq. 15}$$

Avec Q_{aval_1} = débit à l'aval du tronçon entrant n°1 [$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$], Q_{aval_2} = débit à l'aval du tronçon entrant n°2 [$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$], débit à l'amont du tronçon sortant n°3 [$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$].

5.4.2. Couplage des réseaux hydrographiques théorique et observé

T-NET utilise un réseau hydrographique basé sur la BD TOPAGE 2022, qui est le réseau de référence français. Ainsi les résultats de T-NET sont facilement transférables vers d'autres études ou vers les acteurs de terrain. Cependant, le réseau utilisé par J2000 est différent, étant donné qu'il est généré à partir d'un modèle numérique de terrain par l'outil HRU-DELIN. L'objectif de la correspondance des réseaux est ainsi de faire correspondre chaque tronçon J2000 avec un tronçon de la BD TOPAGE.

Le réseau modélisé dans J2000 Saône comporte 5,000 tronçons pour une longueur de rivière modélisée de 12,700 km. Le réseau de la BD TOPAGE a été nettoyé des fossés agricoles, des tronçons non connectés, des boucles, et des canaux artificiels. Puis chaque tronçon initialement identifié entre deux confluences, a été découpé en tronçons d'une taille maximale de 500 m. Le réseau T-NET compte au final 34,000 tronçons représentant un linéaire de 22,900 km de rivières.

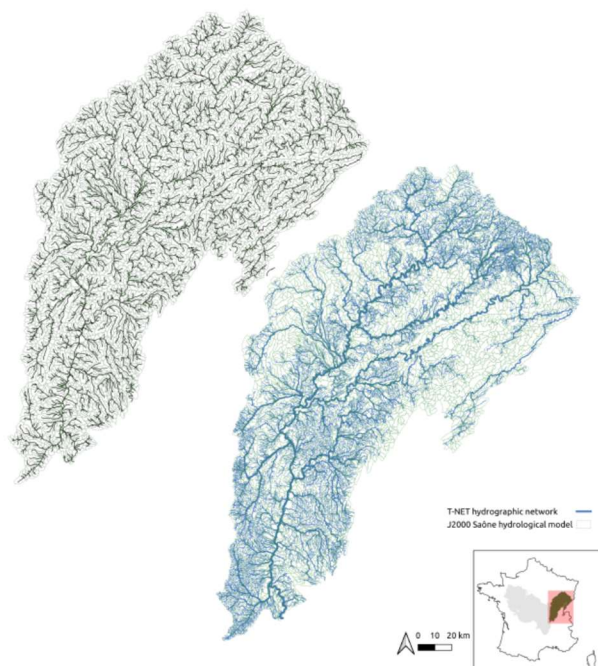


Figure 33. Réseaux hydrographiques des deux modèles : J2000, réseau théorique, à gauche ; TNET, réseau BD Topage, à droite

La construction du réseau T-NET basé sur la BD TOPAGE est basée sur la couche « Tronçons hydrographiques », et s'est effectuée en 4 étapes :

Etape 1 : Tri à partir des champs de la table attributaire. Sont conservés les tronçons dont le « StatutOH » = Validé et « BrasTH » = [Principal ou secondaire]; et sont supprimés ceux dont « NatureTH » = [Canal, Conduit forcé, Aqueduc, Inconnue]. Puis les tronçons sont fusionnés entre chaque confluence, les tronçons non connectés au réseau principal sont supprimés, et enfin les boucles sont supprimées.

Etape 2 : Les tronçons sont découpés de façon à respecter une longueur minimale de 500m.

Etape 3 : Appariement entre le réseau hydrographique de T-NET et le réseau J2000 Saône issu de HRU-Delin. L'appariement entre les deux réseaux se fait en trouvant pour chaque sous-bassin versant rattaché à un tronçon du réseau J2000 Saône, le tronçon du réseau T-NET qui en est son exutoire. Il est ainsi possible que plusieurs tronçons T-NET soit appariés à un unique tronçon J2000. Cet appariement est d'abord automatique, de l'amont (ordre de Strahler 1) vers l'aval du réseau. Il est basé sur l'intersection de la surface des bassins-versants J2000 Saône, au tracé des tronçons de la BD TOPAGE. Puis une étape de vérification visuelle est nécessaire pour corriger les erreurs de l'appariement automatique.

Etape 4 : Calcul des aires drainées sur la BD TOPAGE pour redistribuer les débits sur chaque tronçon. Etant donné que le nombre de tronçons est très différent entre les deux réseaux, de nombreux tronçons de T-NET n'ont pas de tronçon appareillé dans J2000 Saône. Ainsi, pour pallier à ce problème, les débits sont redistribués à partir du tronçon appareillé le plus à l'aval, en fonction des rapports des surfaces des bassins versants. Les surfaces et bassins versants rattachés aux tronçons n'étant pas disponibles dans la BD TOPAGE 2022, nous les avons calculés. Pour se faire, il faut préalablement effectuer un « burn » du réseau hydrographique sur un MNT, de résolution 10m, de façon à ce que l'emprise des bassins versants issus du MNT soit en raccord avec le tracé du réseau. Le burn a été réalisé avec la fonction « FillBurn » du plugin QGIS « WhiteToolBox », puis le calcul des aires drainées est calculé sur chaque nœud final de tronçon à partir de la fonction GRASS « r.water.outlet ».

Cette étape permet donc d'obtenir des débits journaliers sur la période 1970-2021, sur le réseau BD TOPAGE. La longueur moyenne des tronçons dans le modèle TNET est de 680 m et 84% des tronçons ont un ordre de Strahler inférieur à 3. On observe des différences importantes entre le réseau BD TOPAGE et J2000, dans les vallées du Doubs et de la Loue à l'Est et de l'Ouche et de la Tille à l'Ouest. Ces secteurs karstiques ne présentent qu'un chevelu très peu dense dans la BD Topage, car ils n'ont pas de réseau hydrographique superficiel, alors que le réseau J2000 présente un réseau des thalwegs bien identifié par le modèle numérique de terrain.

5.4.3. Paramétrisation de la géométrie hydraulique

Dans le cadre de cette étude, nous avons conservé les valeurs des paramètres pour les équations de géométrie hydraulique proposés dans l'étude de (Morel et al., 2020) qui ont été calibrés sur 1327 tronçons en France et en Nouvelle Zélande. Ces équations et valeurs de paramètres sont donnés ci-après.

Reach scale equations (empirical)
(Morel et al. 2020, Damiani et al, 2021)

$$B(t) = ad.Q_{mean}^{bd} \times \left(\frac{Q(t)}{Q_{mean}}\right)^b$$

$ad = 7.482, bd = 0.477, b = 0.148$

$$D(t) = cd.Q_{mean}^{fd} \times \left(\frac{Q(t)}{Q_{mean}}\right)^f$$

$cd = 0.340, fd = 0.259, f = 0.292$

Les paramètres ad , bd , b , cd , fd et f , ont été calibrés sur des petits cours d'eau (en France, base de données Carhyce), et sont moins performants pour des cours d'eau larges. Afin de mieux intégrer la variabilité des largeurs des grands cours d'eau, nous avons également utilisé la couche « surface en eau » fournie par la BD Topage. Cette base de données permet de déterminer la largeur des différents tronçons ($L_{transect}$) des cours d'eau les plus importants du bassin. L'équation décrivant l'évolution de la largeur, $B(t)$, a donc été modifiée pour tenir compte de la largeur provenant de la BD Topage et d'un débit caractéristique. Nous avons remplacé le débit moyen par le quantile du débit Q99, qui correspond mieux à la largeur mesurée d'après différents tests réalisés avec des quantiles allant de Q75 à Q99.

$$B(t) = L_{transect} \left(\frac{Q(t)}{Q99}\right)^b$$

5.4.4. Calcul et paramétrisation de la végétation et de l'ombrage

5.4.4.1. Calcul du coefficient d'ombrage variable

En milieu tempéré, l'ombrage issu de la végétation rivulaire peut avoir une plus forte influence sur la variabilité de la température en période estivale correspondant à un indice foliaire maximal. En hiver, avec la senescence des feuilles des arbres, l'ombrage est beaucoup plus réduit. De ce fait il apparaît intéressant de calculer un coefficient d'ombrage variable pouvant évoluer chaque jour de l'année. Il est défini ici comme le pourcentage de la surface d'un cours d'eau recouvert par l'ombre projetée par la végétation rivulaire. Ce coefficient d'ombrage est donc fonction de plusieurs facteurs : la hauteur et la présence de végétation rivulaire, l'orientation du tronçon dans le plan horizontal, la position relative du soleil et la surface du tronçon.

L'orientation du tronçon dans le plan horizontal est calculée à partir de Eq. 16, notamment utilisée par les topographes pour calculer le gisement d'un point de mesure. La valeur obtenue (ϕ) correspond à l'angle formé, dans l'intervalle $[0-360^\circ]$, entre le tronçon et la direction sud-nord. Afin de simplifier les calculs, chaque tronçon est considéré comme un segment rectiligne à partir de son nœud initial A ($X_A; Y_A$) jusqu'à son nœud final B ($X_B; Y_B$) :

$$\phi = \frac{(X_B - X_A)}{\sqrt{(X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2 + (Z_B - Z_A)^2}} \quad \text{Eq. 16}$$

Pour estimer le pourcentage d'ombrage de chaque cours d'eau suivi, nous nous sommes appuyés sur les travaux de Li *et al* (2012) qui proposent une méthode de calcul de **l'ombre projetée** par la canopée sur le cours d'eau. Leurs travaux prennent en compte **la position relative du soleil** (altitude, azimuth et déclinaison), les caractéristiques géométriques du tronçon (orientation, largeur), la section (largeur, hauteur de berges) et les caractéristiques géométriques de la canopée (hauteur, distance du bord, surplomb). Pour calculer la position du soleil au pas de temps horaire, il est nécessaire de déterminer l'angle d'élévation solaire Ψ (en radians) selon la formule suivante :

$$\sin \Psi = \sin \alpha \sin \beta - \cos \alpha \cos \beta \cos \omega \quad \text{Eq. 17}$$

Avec α est l'angle de déclinaison solaire, β est la latitude du point d'étude (en radians), ω est la vitesse angulaire de la Terre (exprimé en $2\pi/\text{jour}$), et t , le temps solaire réel qui correspond au temps entre deux passages successifs du soleil au méridien local à 12h précise.

La longitude (λ) et la latitude (β) des centroides de chaque tronçon sont données en degrés selon les coordonnées WGS 84 (World Geodetic System 1984). L'angle de déclinaison solaire se calcule suivant la formule (Bourges, 1985 ; Garg and Datta, 1993) :

$$\alpha = 23.45 \frac{\pi}{180} \sin \left(\frac{2\pi(N + 284)}{365.25} \right) \quad \text{Eq. 18}$$

Le temps solaire réel (t) est l'addition entre l'EOT (Equation of Time) et le MST (Mean Solar Time) :

$$t = MST + EOT \quad \text{Eq. 19}$$

Le MST est le temps solaire moyen indiqué par une horloge et peut être calculé avec la formule :

$$MST = T_{\text{Local_clock_time}} + \frac{\lambda^\circ - \text{TimeZone} \times 15^\circ}{361^\circ} \quad \text{Eq. 20}$$

Le MST et $T_{\text{Local_clock_time}}$ sont exprimés en jour numérique (ex : 0 = minuit ; 0,5 = midi). λ est la longitude (en degrés) du lieu. La TimeZone correspond au fuseau horaire (GMT +1 ou +2 pour la France) et elle est multipliée par 15° . Cet angle correspond à l'écart angulaire pour une heure. Sachant que la Terre tourne d'environ 361° en 24h, pour une heure nous aurons : $361/24 \sim 15$.

L'EOT est l'équation de temps, c'est la différence entre le temps solaire réel (t) et moyen (MST) et se calcule selon la formule (Garg and Prakash, 2000) :

$$EOT = \frac{9.87 \sin 2B - 7.53 \cos B - 1.5 \sin B}{60 \times 24} \quad \text{Eq. 21}$$

Où :

$$B = \left(\frac{2\pi}{364} \right) \times (N - 81) \quad \text{Eq. 22}$$

L'EOT est en jour numérique ; N est le nombre de jour dans l'année. A partir de ces équations, il est désormais possible de déterminer l'angle d'élévation solaire Ψ . L'azimut solaire (Φ) est l'angle mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre entre le Nord géographique et la projection du soleil sur une surface plane. Il se mesure en radians et se calcule grâce à l'équation suivante (Li, 2006) :

$$\Phi = \frac{\pi}{2} \pm \arccos \frac{\cos \alpha \times \sin \omega t}{\cos \Psi} \quad \text{Eq. 23}$$

Dans cette équation, le signe "+" sera utilisé quand le soleil se déplacera de l'azimut 90° à 270° et le signe moins s'appliquera quand le soleil se déplacera en dessous de l'azimut 90° et au-delà de l'azimut 270° . Cela correspond à un déplacement durant la journée et le signe devient négatif lorsque l'azimut sera supérieur à 270° c'est-à-dire pendant la nuit. A partir de cette formule, nous disposons de l'évolution journalière de l'azimut du soleil. Nous allons maintenant pouvoir associer l'orientation du cours d'eau à cet azimut. En calculant l'angle entre l'azimut du soleil et l'orientation du cours d'eau, il sera possible de déterminer si l'ombrage efficace se situe au niveau la surface de l'eau ou, à l'opposé, sur la rive. Pour cela, ce calcul se divisera en deux parties : une partie en rive droite et l'autre en rive gauche.

Pour la rive droite, il faut tout d'abord calculer la différence entre l'azimut du soleil Φ et l'orientation du cours d'eau ϕ calculée :

$$\delta = \Phi - \phi \quad \text{Eq. 24}$$

Si cette différence est négative il faut appliquer la formule suivante :

$$\delta = \pi + \text{mod}(|\delta|, 2\pi) \quad \text{Eq. 25}$$

Ensuite, le résultat devra être modulé par 2π tel que :

$$\delta = \text{mod}(\delta, 2\pi) \quad \text{Eq. 26}$$

δ représente l'angle entre le bord de la rive et l'ombrage effectif, exprimé en radians, pour la rive Est (Figure 35).

Pour l'autre rive, il suffit d'inverser le résultat. C'est-à-dire il faut soustraire la valeur de π au résultat obtenu. Si $\delta > \pi$ alors $\delta = \delta + \pi$, autrement $\delta = \delta - \pi$.

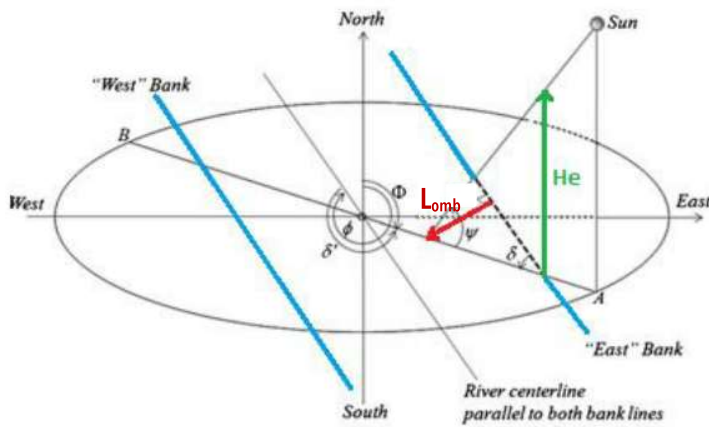


Figure 34. Représentation de l'ombrage en fonction de la végétation rivulaire (modifiée, d'après Li et al., 2012).

Une fois que les valeurs des angles pour la rive Est et Ouest sont déterminés, la **longueur d'ombre perpendiculaire à chaque rive** (L_{omb}) peut être calculée à l'aide de la formule suivante :

$$L_{omb} = S_a \times \sin \delta = H \times \cot \Psi \times \sin \delta$$

Avec S_a : la longueur réelle d'ombre (m) et H : hauteur de la canopée (m). Nous n'avons cependant pas la possibilité à notre échelle d'étude d'avoir un degré de précision géométrique aussi fin au niveau de la caractérisation de la canopée. Nous avons donc choisi de considérer la ripisylve comme un « rideau d'arbres » dont on peut faire varier la hauteur, notée H et fixée sur l'ensemble du bassin à 15 mètres (Recommandations IRSTEA). Un algorithme est alors implémenté permettant de calculer au pas de temps horaire, en tenant compte du jour de l'année, la longueur d'ombre projetée (L_{omb} en mètre) à la surface de chaque tronçon. Les longueurs de chaque tronçon de rivière (L) sont données par la **BD CARTHAGE®**. Les largeurs (B) sont calculées via les équations provenant de « ESTIMKART ». La surface de chaque tronçon (A_t en m^2) est donc déterminée : $A_t = L \times B$

Connaissant la longueur d'ombre projetée (L_{omb}) et la longueur du tronçon (L) il est donc possible de calculer la surface d'ombre (A_{omb} en m^2) sur l'ensemble du tronçon : $A_{omb} = L_{omb} \times L$

Cette surface d'ombre (A_{omb}) correspond à une surface lorsque le feuillage des arbres est maximal. Cependant la végétation du bassin de la Loire est composée en grande partie de forêts de feuillus ce qui implique que l'indice foliaire (LAI) suit une dynamique saisonnière où le peuplement passe d'un stade hivernal sans feuille à une phase progressivement feuillée au printemps jusqu'à atteindre un maximum en été. L'énergie solaire incidente sera ainsi davantage captée par les feuilles de la végétation en période estivale plutôt qu'en période hivernale. Plusieurs études montrent que pour les forêts de feuillus, l'indice foliaire suit 3 étapes principales : i) pousse des feuilles et augmentation rapide du LAI jusqu'à atteindre un maximum en juillet ; ii) période de LAI stable ; iii) période de sénescence des feuilles avec une diminution du LAI jusqu'à devenir quasiment nul en novembre (Figure 35).

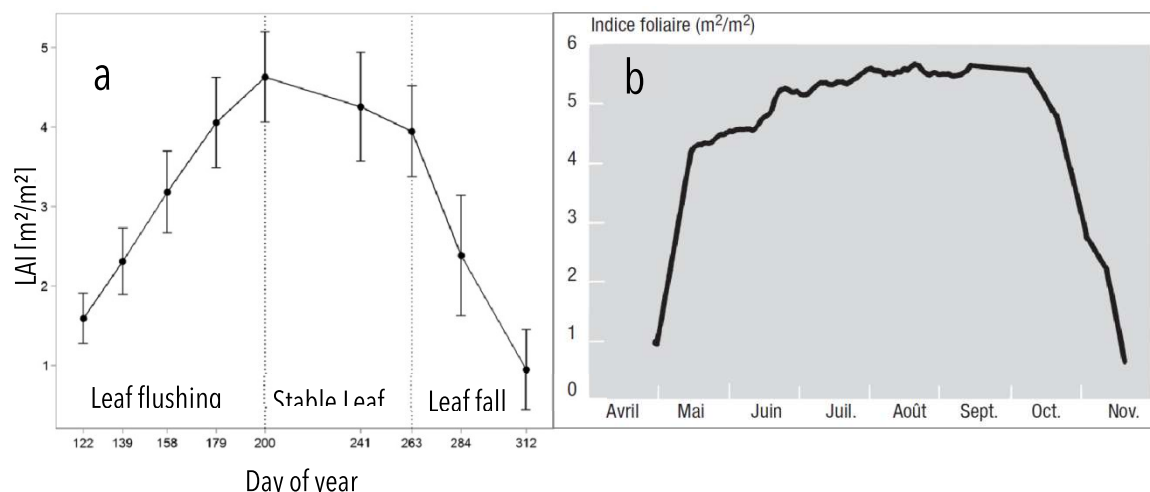


Figure 35. Exemples de variations saisonnières d'indice foliaire pour (a) un aulne noir (Tillack et al., 2014) et (b) et dans une chênaie (Bréda, 1999) (d'après Beaufort, 2014).

Pour simuler cet effet, des formules ont été développées et prennent en compte le LAI mesuré ainsi qu'un coefficient d'atténuation dépendant de l'épaisseur de canopée traversée par les rayons et de la position du soleil (Sridhar et al., 2004). Cependant l'indice foliaire et l'épaisseur de canopée restent très difficilement mesurables sur chaque cours d'eau du bassin de la Loire et leur dynamique saisonnière dépend des espèces arborées présentes (Bréda, 1999). Compte tenu du peu de données disponibles concernant ces facteurs et afin de simplifier la prise en compte de la variabilité de l'indice foliaire, nous avons choisi d'intégrer uniquement un coefficient

d'atténuation linéaire (k) basé sur la dynamique saisonnière du LAI des feuillus, b) qui permet de pondérer la surface ombrée (A_{omb}) en fonction du mois de l'année.

Mois de l'année	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Coefficient d'atténuation k	0	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1	0.8	0.6	0.3	0

Coefficient d'atténuation (k) de la surface ombrée en fonction du mois de l'année.

Le coefficient d'ombrage (SF en %) peut donc être déduit comme étant le rapport entre la surface ombrée du cours d'eau pondérée par le coefficient d'atténuation (k) et la surface totale :

$$SF = \frac{A_{omb} \cdot k}{A_t} \quad \text{Eq. 27}$$

Suivant l'orientation et la largeur de chaque tronçon, le coefficient d'ombrage peut être sensiblement différent. En effet sur l'exemple présenté sur la Figure 36, les paramètres liés à la végétation sont constants avec un taux de recouvrement de végétation rivulaire (T_{veg}) de 100% et une hauteur de canopée fixée à 15 m. Pour une orientation du cours d'eau similaire (environ 80°) entre les graphiques (Figure 36a) et (Figure 36c), on remarque que le facteur d'ombrage est plus important sur le cours d'eau de plus petite largeur. Cependant, les minima sont synchrones et correspondent au passage du soleil « dans l'axe » du cours d'eau concerné soit lorsque son azimut est égal à l'orientation du tronçon. Pour des tronçons de largeurs semblables (Figure 36a) et (Figure 36b), et (Figure 36c) et (Figure 36d), l'ombrage journalier moyen est globalement plus important pour les cours d'eau ne bénéficiant que d'un seul passage du soleil « dans leur axe » (*i.e.* un seul minima pour les graphiques (b) et (d)) que pour ceux présentant deux minima quotidiens. Le coefficient d'ombrage variable tient compte de l'orientation propre de chaque segment de rivière et de ce fait il ne peut être calculé qu'individuellement sur chaque tronçon.

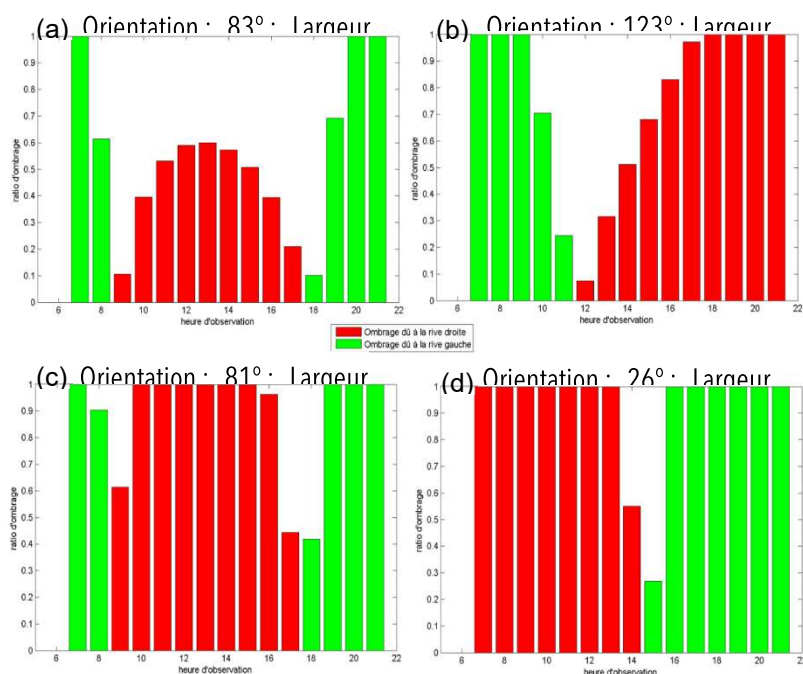


Figure 36. Exemples d'évolutions horaires (de 7h à 21h) de l'ombrage dû aux positions relatives du cours d'eau et du soleil. Cas du 15 juillet, végétation fixe prise à 100% de couverture et une hauteur de canopée égale à 10 m (Beaufort, 2014)

5.4.4.2. Paramétrisation de la hauteur d'arbres et de la densité sur le tronçon

Les hauteurs d'arbres ainsi que la densité de végétation sont données à partir des zones forestières (Zone de végétation) de la BD TOPO 2023, utilisée comme proxy de la végétation. Elle permet d'avoir accès à l'espèce de végétation et à la longueur attenante à la rive, dans un rayon de 10 mètres autour du tronçon, en rive droite et gauche (van Looy and Tormos, 2013). La densité de végétation (v_c) est ainsi calculée comme le ratio entre la longueur de végétation et la longueur totale du tronçon.

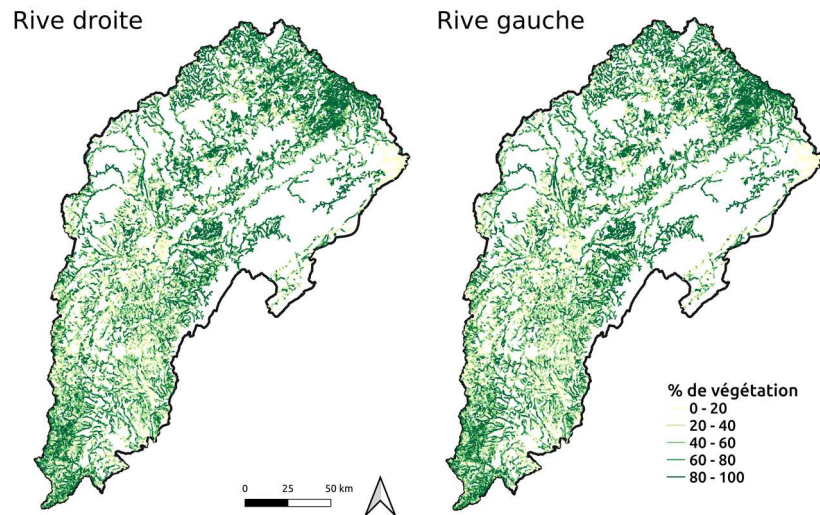


Figure 37. Densité de végétation (v_c) sur chaque rive de tronçon modélisé dans TNET

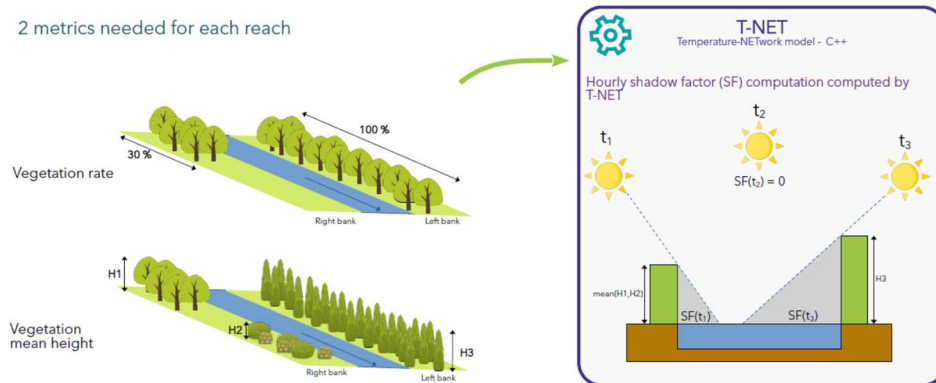


Figure 38. Schéma conceptuelle de l'intégration de la ripisylve et de l'ombrage dans la modélisation T-NET

La hauteur des espèces végétales est estimée à partir de valeurs issues de littérature spécialisée (tableau ci-après). Dans le cas de présence de plusieurs espèces différentes sur le même tronçon, la hauteur de la végétation est moyennée, au prorata des longueurs. Enfin, la transmissivité pendant les mois sans feuilles (janvier, février, novembre et décembre), les mois de croissance des feuilles (mars et avril) et les mois avec feuilles pleines (mai-septembre) est fixée à 0,3, 0,2 et 0, respectivement, selon (Hutchison and Matt, 1977). Considérer ce type de

phénologie semble logique, car les espèces végétales sempervirentes (forêt de conifères) représente une faible proportion de l'occupation du sol du bassin ($\approx 5\%$). De plus, la régulation de l'ombrage riverain est plus importante en période estivale pour laquelle une transmissivité nulle pour toutes sortes d'espèces (y compris les espèces sempervirentes) est considérée.

NATURE	Hauteur (m)	NATURE	Hauteur (m)
Bois	25	Haie	15
Forêt fermée de conifères	25	Lande ligneuse	0
Forêt fermée de feuillus	25	Peupleraie	25
Forêt fermée mixte	25	Zone arborée	20
Forêt ouverte	20		

6.Diagnostic du modèle couplé

6.1. Performance globale sur 246 stations de température

L'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le biais, liés aux écarts entre simulation et observation, ont été calculés au pas de temps journalier au droit de chaque station thermique, puis agrégées sur la période 2010-2010. Globalement, le modèle T-NET présente un biais médian de +0.15°C et un RMSE médian de 2°C sur la base de 246 stations thermiques avec au moins 365 jours d'observations, drainant des bassins versants de plus de 5 km², (Figure 39).

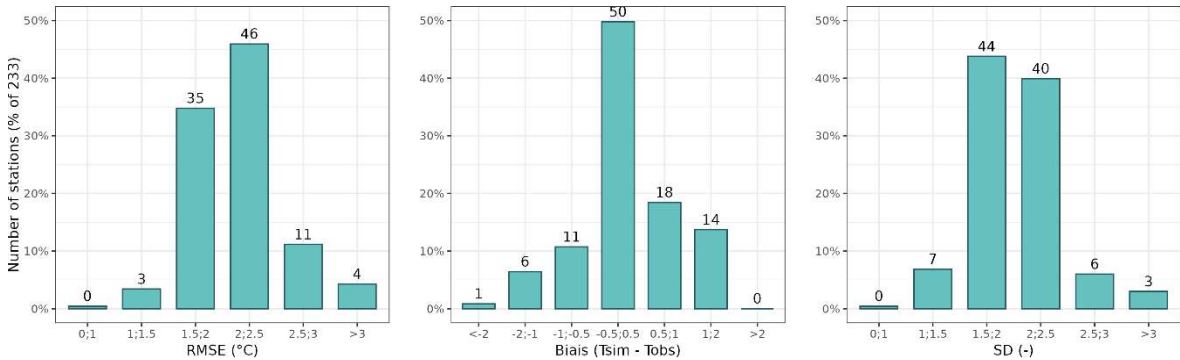


Figure 39. Distribution statistique des erreurs du modèle T-NET suivant les classes d'erreurs (RMSE, Biais et SD) : Tsim-Tobs ; valeur positive du biais implique une surestimation de la valeur observée

On remarque aussi qu'environ 50 % des stations ont un biais proche de zéro, 32 % des stations ont un biais positif et 18 % un biais négatif. De plus 84 % des stations ont un écart type compris entre 1,5 et 2,5°C. Il en résulte que 38 % des stations ont un RMSE inférieur à 2°C. Si l'on compare avec les performances du modèle TNET obtenues dans le bassin versant de la Loire, où 81 % des stations avaient un RMSE inférieur à 2°C (Beaufort et al, 2016), on peut en conclure que le modèle T-NET couplé au modèle hydrologique J2000 dans le bassin Saône est moins performant que le modèle T-NET couplé au modèle hydrologique EROS dans le bassin de la Loire.

La répartition spatiale des biais et des RMSE montre des performances différentes suivant les territoires. Ainsi, les stations drainant des surfaces de bassin versant plus importantes présentent des performances moins bonnes, avec des RMSE > 2°C. Cela peut se visualiser à travers les points dans la *Figure 40* qui sont d'autant plus grands que la taille du bassin versant est grande et sur la *Figure 41*.

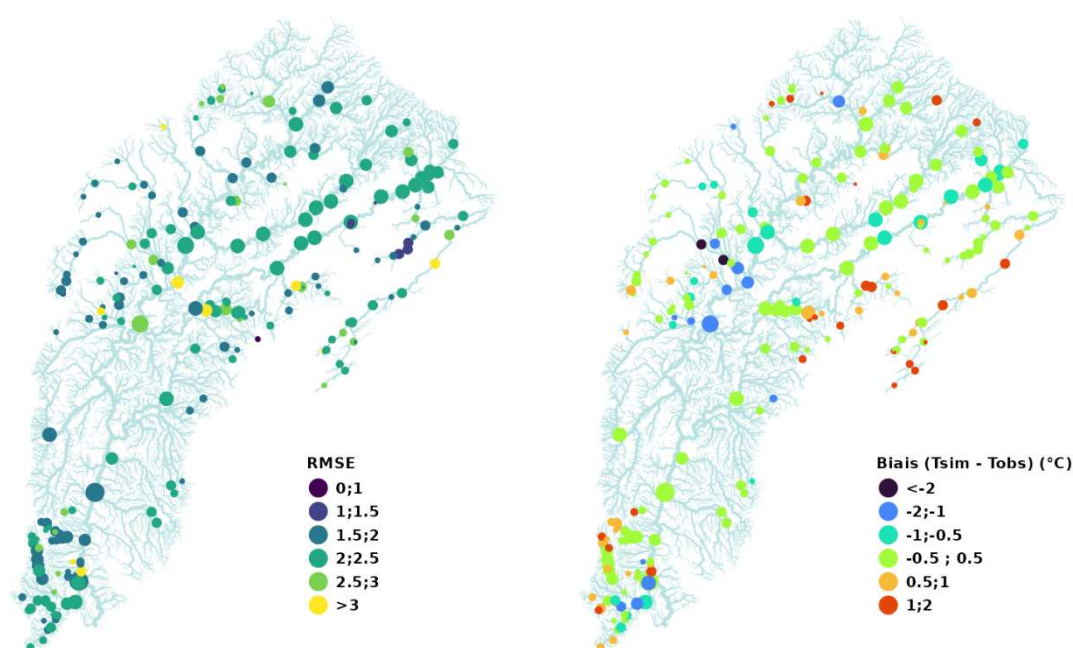


Figure 40. Carte des erreurs (RMSE et biais) de simulation de la température des cours d'eau du bassin de la Saône. Les biais sont satisfaisants entre -0.5 et +0.5°C ; Les biais > +0.5 montrent des valeurs simulées plus chaudes que les valeurs observées ; Les biais < -0.5 montrent des valeurs simulées plus froides que celles observées

6.2. Performance saisonnière

Les biais et les RMSE moyens pour chaque mois ont été représentés dans la Figure 41. On remarque que le modèle T-NET appliqué au bassin versant de la Saône a tendance à surestimer les températures en hiver (janvier – mars) et les sous-estimer au printemps (avril – mai) et en automne (septembre – novembre). En été, les températures modélisées semblent surestimées par rapport aux observations pour les stations en tête de bassin, et sous-estimées au niveau des stations plus en aval, même si on reste proche d'un biais nul. On remarque aussi que les biais sont plus négatifs au fur et à mesure que la taille des bassins drainés augmente, ce qui indique globalement des valeurs simulées plus faibles que dans la réalité.

Si on compare avec les résultats du bassin de la Loire, on remarque que plus les stations sont à l'aval, plus les biais sont proches de zéro, ce qui ne s'observe pas dans le bassin de la Saône où les biais augmentent et deviennent plus négatifs avec la taille des aires drainées.

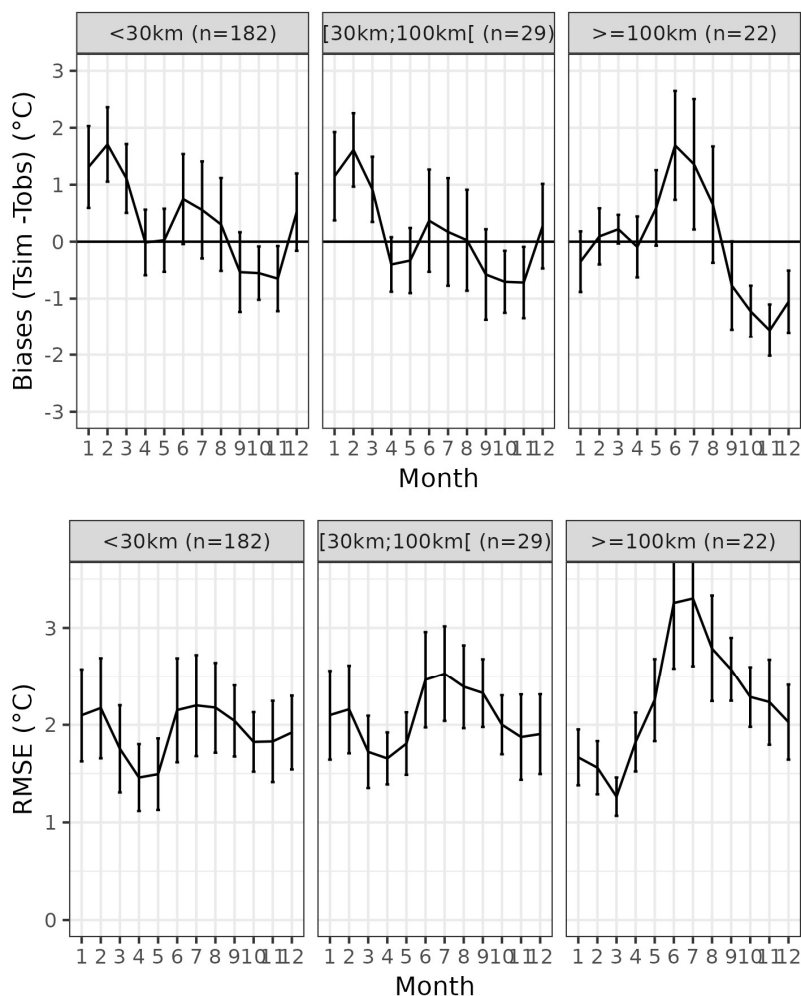


Figure 41. Evolution mensuelle des erreurs de simulation (biais en haut, RMSE en bas) par catégorie de type de station – station en tête de réseau hydrographique (distance <30km depuis la source), station intermédiaire (distance entre 30 et 100 km), station aval (distance > 100 km depuis la source)

A titre d'exemple, les simulations pour deux tronçons sont comparées aux valeurs observées dans la Figure 42 : La Saône à Macon et l'Ardière à Cercié. Pour les deux rivières, on remarque les dynamiques simulées de la température de l'eau beaucoup trop variables par rapport aux observations, probablement à cause des profondeurs trop faibles dans les rivières et/ou des temps de parcours trop importants dans le réseau hydrographique. Pour la Saône, l'influence des échanges avec les aquifères alluviaux, mal prise en compte dans la modélisation, est aussi à prendre en compte.

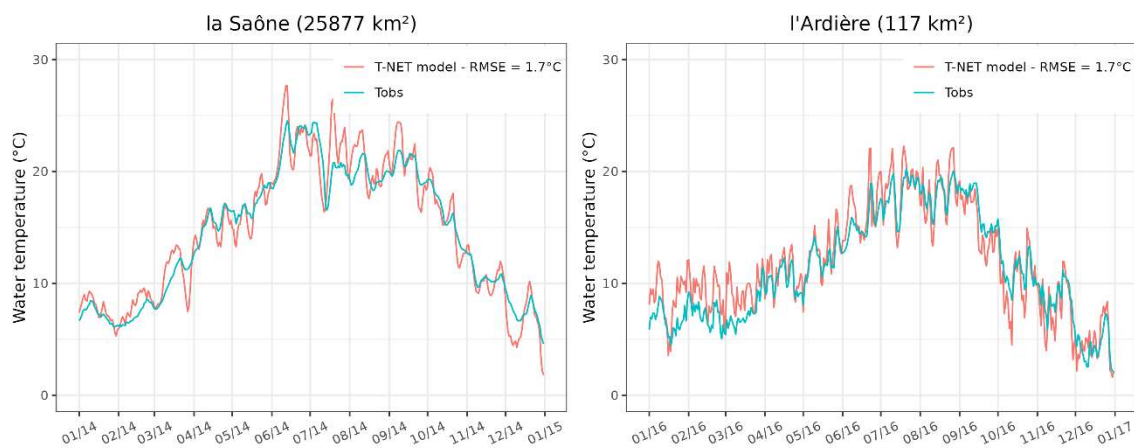


Figure 42. Exemples de comparaison des simulations de température de l'eau aux observations pour deux rivières contrastées (la Saône aval, Ardère à Cercié)

6.3. Analyse de sensibilité aux différentes entrées

Pour mesurer l'impact sur la température de l'eau simulée, des variables d'entrées dans le modèle T-NET dans le bassin de la Saône, une étude de sensibilité a été réalisée. Ces variables d'entrée sont les suivantes : le facteur d'ombrage (SF), le débit (Q_{aval}), la largeur du tronçon de rivière (B_m), la hauteur d'eau dans le tronçon de rivière (H), le temps de parcours dans le tronçon de rivière (TPS), les apports latéraux souterrains ($Q_{\text{lat_ms}}$) et la température d'eau souterraine (T_g).

Chacune des variables étudiées a été augmentée et diminuée de 50 % indépendamment des autres variables et comparée avec une simulation de référence pour étudier les conséquences sur la modélisation de température. Les résultats obtenus sur les 246 stations sont présentés Figure 43 et sont comparés avec les résultats obtenus pour le bassin versant de la Loire de Beaufort et al. (2016) (Figure 44).

On remarque que la diminution du facteur d'ombrage (SF) peut avoir le même impact sur les moyennes annuelles dans le bassin de la Saône comparé au bassin de la Loire. Cependant dans le bassin de la Saône, les différences été/hivers sont plus contrastées que sur la Loire. On peut aussi noter sur le bassin versant de la Saône que l'augmentation de l'ombrage a un impact moindre par rapport à sa diminution, contrairement au bassin de la Loire où les impacts de l'augmentation et de la diminution du facteur d'ombrage sont identiques en valeur absolue. Ceci est peut-être dû à un bassin versant de la Saône déjà très végétalisé, menant ainsi à un ombrage proche de 100 % dans la modélisation de références et donc à un impact moindre sur la modélisation de la température d'une augmentation du facteur d'ombrage par rapport à sa diminution.

L'une des plus grosses différences entre le bassin de la Saône et le bassin de la Loire est au niveau de la température de l'eau souterraine (T_g , noté T_{w_head} sur la Figure 44). Dans le bassin de la Loire, cette variable a un impact de 0.5°C sur la moyenne annuelle de la température de l'eau, contre 1.5°C pour le bassin de la Saône. Ceci allant même jusqu'à 2.75°C de différence sur la moyenne des mois de janvier et février. On remarque aussi pour le bassin de la Loire qu'une augmentation (diminution) de la température de l'eau souterraine entraîne une diminution (augmentation) de la température moyenne modélisée en été, ce qui n'est pas le cas pour le bassin de la Saône, où la diminution (augmentation) de la température de l'eau souterraine entraîne une diminution (augmentation) de la température de l'eau modélisée.

On remarque aussi que la hauteur de l'eau dans les tronçons des rivières du bassin de la Saône (H) n'a aucune incidence sur les résultats de modélisation de température. Enfin, les changements induits dans les variables largeur des tronçons des rivières (Bm) et des débits (Qaval) semblent avoir des réponses opposées dans le bassin de la Saône vis-à-vis du bassin de la Loire. Par exemple, une augmentation des débits de 50 % l'hiver fait diminuer la température simulée par T-NET dans le bassin de la Loire d'environ 0.5°C mais augmente de 0.5°C dans le bassin de la Saône. Ces questions, ne peuvent pas être expliquées totalement à l'heure actuelle et des investigations futures sont nécessaires dans les modifications du code C++ de T-NET réalisées ces dernières années.



Figure 43. Changements dans la simulation de la température en fonction des variations dans les données d'entrée

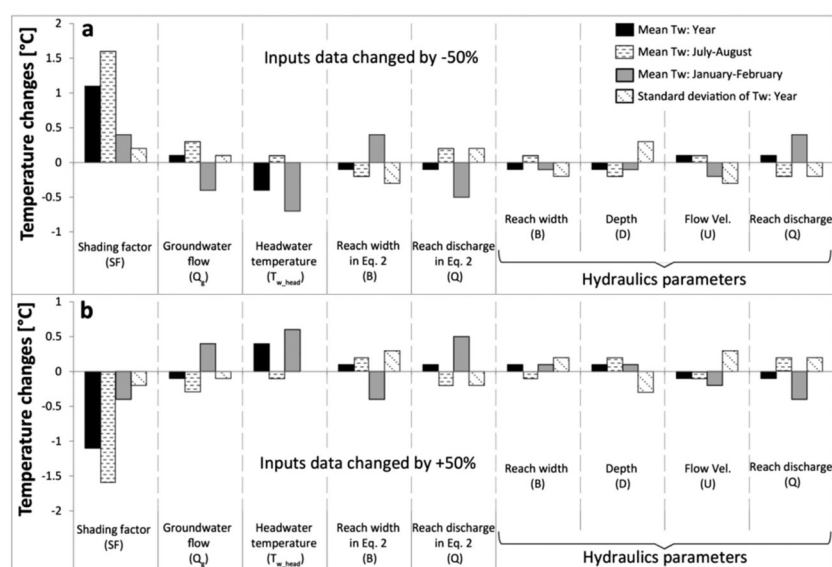


Figure 44. Résultats de l'analyse de sensibilité du couplage TNET/EROS, réalisée pour le bassin de la Loire par Beaufort et al, 2016. Distribution des différences moyennes de température des rivières et de la variabilité de la température de l'eau en fonction des variations de la profondeur des rivières, du débit des eaux souterraines, du facteur d'ombrage, des conditions aux limites, de la largeur des rivières, du débit des rivières et de la vitesse d'écoulement de (a) - 50 % et (b) + 50 % calculées dans les 128 stations entre 2008 et 2012.

6.4. Comparaison des performances en fonction de la lithologie

La comparaison des performances suivant les classes lithologiques, montre des températures simulées plus faibles par rapport à l'observation pour les grands cours d'eau qui drainent des aquifères alluviaux. On observe aussi que les stations drainant des lithologies de calcaires et socle, présentent des températures simulées plus importantes par rapport aux observations, probablement à cause d'une mauvaise estimation de la contribution des aquifères (Figure 45).

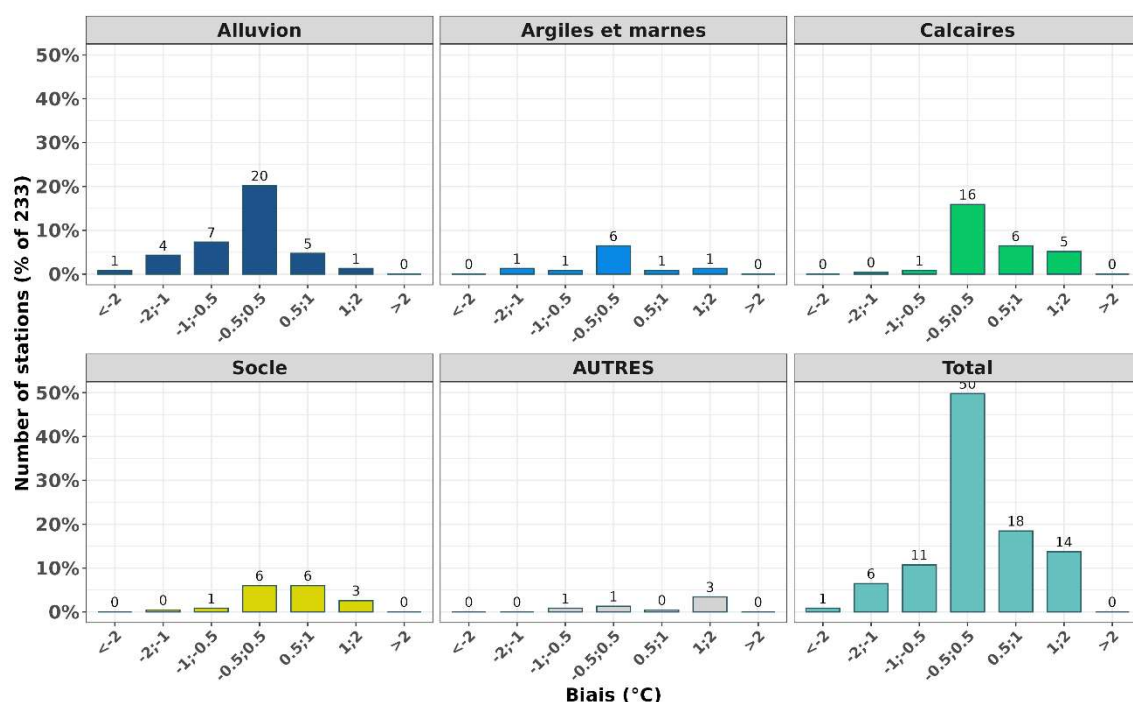


Figure 45. Distribution des Biais de modélisation de la température au niveau des stations, en fonction de la classe lithologique dominante du bassin versant

6.5. Comparaison des performances en fonction des signatures thermiques

La Figure 46 présente le lien entre les biais des simulations des différentes stations et les signatures thermiques calculées aux mêmes endroits, à partir des observations et caractérisant l'influence des aquifères. L'ensemble de ces liens sont significatifs d'un point de vue statistique. Les régressions entre biais et TS, Tw30, Nc15, N15 ont les plus fortes variances expliquées (R^2 entre 0.14 et 0.36).

Plus la pente des régressions entre les températures de l'eau et de l'air, TS, est faible (qui désigne une contribution importante des aquifères) plus le biais de modélisation est fort et positif. De même quand les stations présentent des températures estivales faibles (faibles valeurs de Tw30, Nc15, N15), on observe également un biais de modélisation fort et positif.

Cela indique que les températures simulées sont plus importantes que les températures observées, ce qui incite à penser qu'une intégration dans la modélisation d'une contribution plus importante des aquifères pourrait améliorer la modélisation.

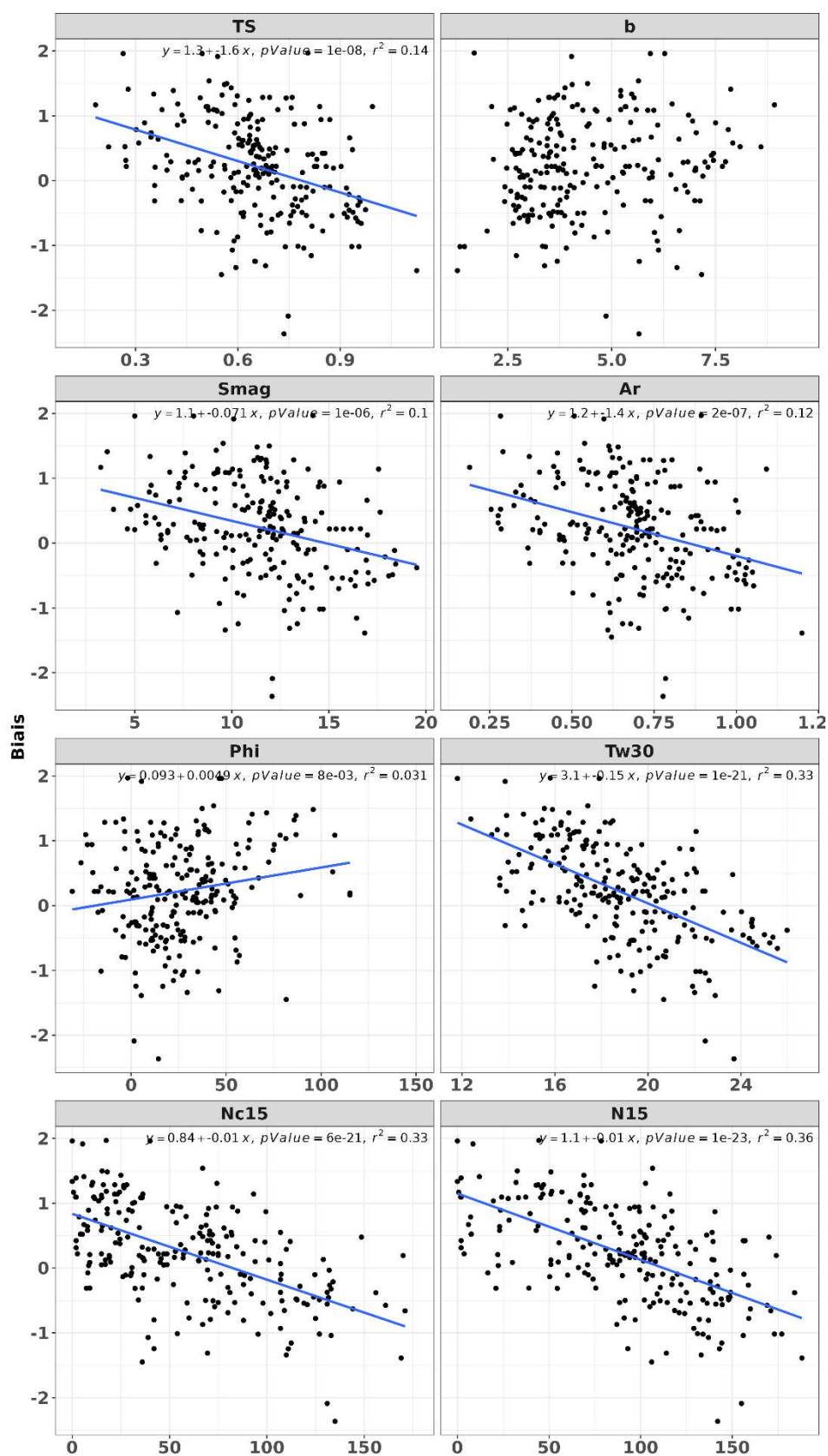


Figure 46. Relation entre les biais de modélisation et les signatures thermiques aux stations

6.6. Éléments de diagnostic des apports latéraux

D'après les analyses précédentes, la contribution des aquifères issue du modèle J2000 semble sous-estimée. De façon à investiguer cette question de façon plus approfondie, nous avons réalisé des tests supplémentaires. Le premier test est une comparaison des apports latéraux souterrains simulés d'une part par J2000 sur la Saône, et d'autre part par le modèle EROS du BRGM sur la Loire. Le couplage entre EROS et T-NET sur la Loire ayant donné d'assez bons résultats (RMSE moyen de 1.6°C sur 128 stations) (Beaufort et al., 2016), et le modèle EROS ayant été calé à la fois sur les débits et les niveaux piézométriques, nous faisons l'hypothèse que les ordres de grandeur des apports souterrains simulés par EROS sont une référence. Même si les bassins-versants diffèrent, ils ont des parties limitrophes, avec des climats proches et des lithologies similaires. Le second test a consisté à implémenter plusieurs modes de calcul des apports latéraux souterrains dans le modèle Saône à partir des sorties J2000, et à comparer leur influence, à la fois sur les apports latéraux souterrains simulés, et sur la température de l'eau.

Comparaison Loire/Saône

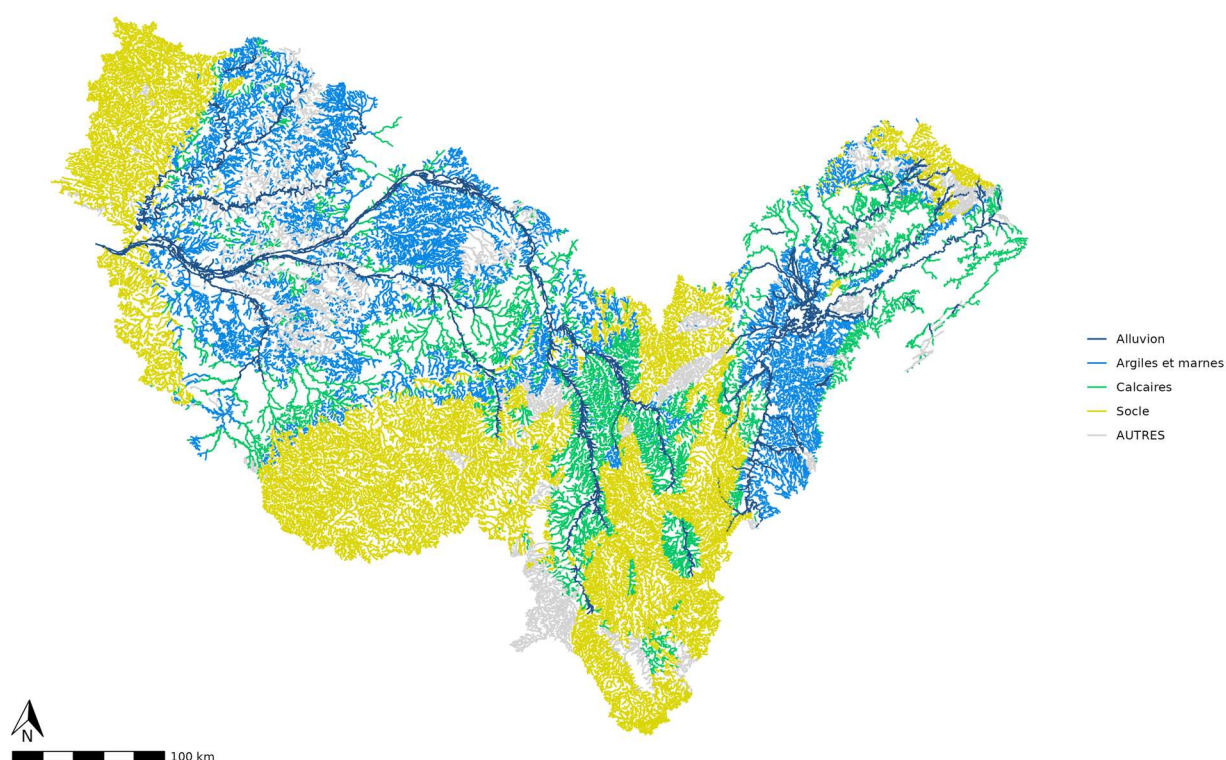


Figure 47. Carte des lithologies des tronçons des bassins de la Saône et de la Loire suivant 5 classes principales

Pour pouvoir comparer les différents ordres de grandeurs des apports latéraux souterrains sur la Loire et la Saône, nous avons décidé classer les tronçons de cours d'eau suivant 5 classes lithologiques principales : Alluvions, Argiles et Marnes, Calcaire, Socle et Autre (Figure 47). Les résultats sont présentés dans la Figure 48, qui présente

des boxplots des débits latéraux souterrains moyens mensuels pour deux mois contrastés de l'année 2012 : le mois de janvier (hiver, période de hautes eaux) et le mois d'août (été, période de basses eaux). On peut constater que si les débits latéraux sont assez similaires (et en tous cas du même ordre du grandeur) en période hivernale sur les deux bassins, il y a une grande différence en période estivale. Les apports latéraux simulés en été sur la Saône sont beaucoup plus faibles que ceux simulés sur la Loire, pour toutes les lithologies. Il faut noter que sur la Loire, les débits latéraux sont environ deux fois plus faibles en été qu'en hiver ; alors que sur la Saône, ils s'effondrent d'un ordre de grandeur, voire sont quasi nuls, en partie pour la classe Argiles et Marnes.

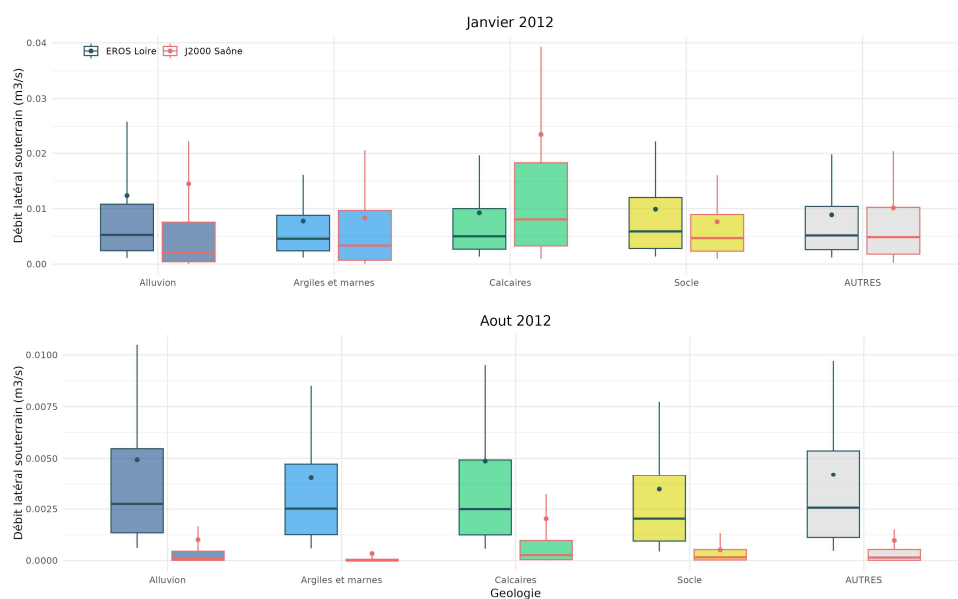


Figure 48. Débits latéraux souterrains moyens simulés sur les bassins de la Loire et de la Saône, pour les mois de janvier et août 2012, selon les mêmes classes lithologiques

Influence du mode de calcul des apports latéraux (Saône)

Une analyse plus approfondie de ces débits latéraux nuls nous a montré que sur certains tronçons du bassin de la Saône, les débits souterrains simulés par J2000 étaient nuls quasi en permanence, notamment sur les sous-bassins urbains du modèle, imperméables, dans lesquels il n'y pas d'infiltration possible de l'eau dans le sol, et donc de percolation vers la nappe. Sur les tronçons correspondants, l'apport souterrain latéral mis en entrée de T-NET était donc nul. Nous avons donc testé une méthode différente pour régionaliser les débits souterrains simulés par J2000, en agrégeant les débits souterrains simulés par J2000 par sous-bassin hydrogéologique et en les redistribuant le long des tronçons de ces sous-bassins en fonction de leur longueur. Les sous-bassins hydrogéologiques ont été définis à partir de la BD LISA et sont présentés Figure 49.

HRU avec la colonne to_reach renseigné

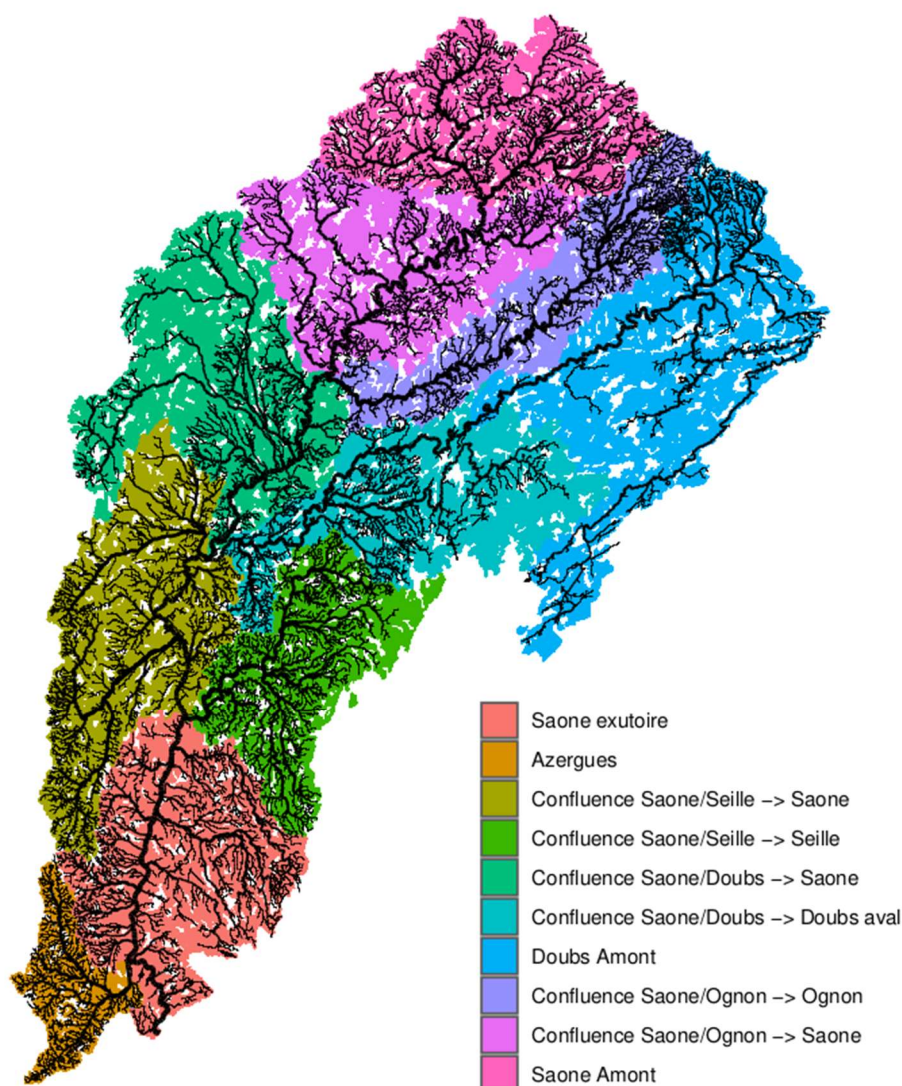


Figure 49. Définition de sous-bassins hydrogéologiques sur le sous-bassin de la Saône pour la redistribution des apports latéraux souterrains.

Deux modes de calcul à partir de sorties différentes de J2000 ont ensuite été testées. Les résultats pour les apports latéraux sont présentés Figure 50 pour un échantillon de sous-bassins de la Saône. On peut voir que la régionalisation des apports latéraux souterrains par sous-bassin hydrogéologique modifie des flux par rapport au calcul original, avec une augmentation significative des apports pour des bassins comme celui de la Veyle, l'Ardière, la Morte, et au contraire une diminution pour d'autres bassins. Il n'y a pas de différence marquée entre les deux modes de calcul des apports régionalisés. D'une manière générale, la régionalisation permet d'obtenir des apports latéraux plus lissés spatialement. Cependant, la variabilité saisonnière des apports latéraux reste toujours très forte, avec des valeurs environ 10 fois plus basses pendant l'été que pendant l'hiver. Assez logiquement, l'influence de la régionalisation sur le calcul de température de l'eau est quasi nulle (Figure 51).

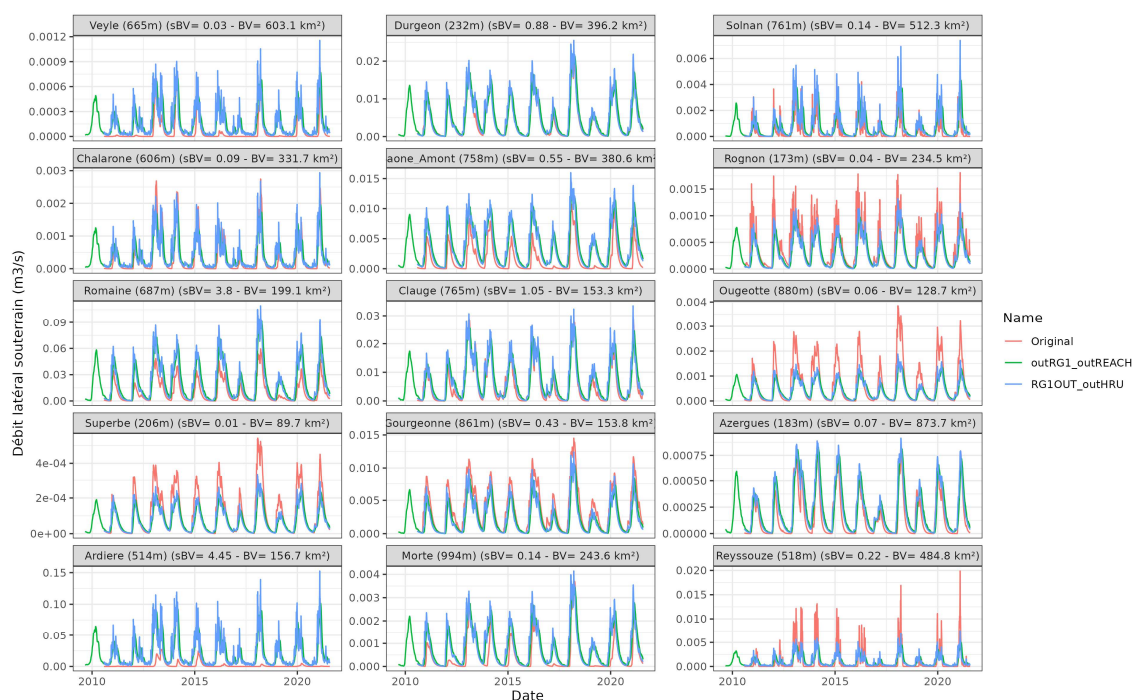


Figure 50. Comparaison de plusieurs méthodes de calcul des apports latéraux souterrains à partir des sorties J2000 sur la Saône.

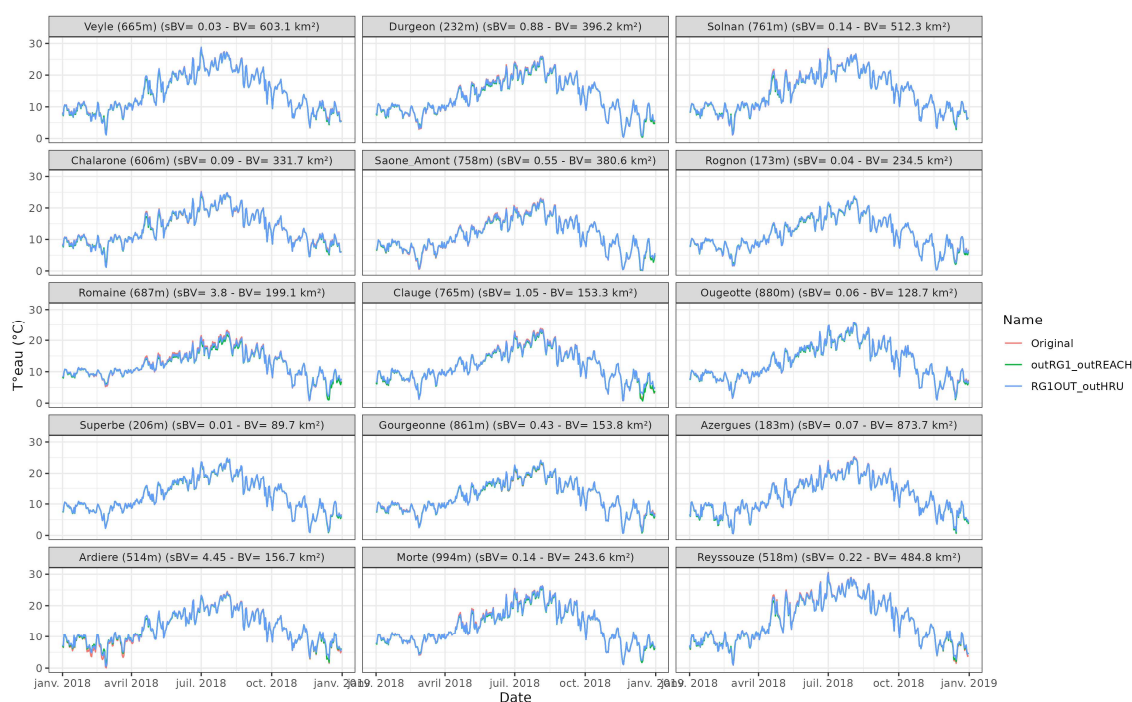


Figure 51. Influence de la régionalisation des apports latéraux souterrains par sous-bassin hydrogéologique sur la température de l'eau simulée par T-NET sur la Saône.

En conclusion, ces analyses complémentaires confirment bien que les contributions souterraines simulées par le modèle J2000 sur la Saône sont vraisemblablement sous-estimées en été, du fait d'une variabilité saisonnière très forte. Il est possible de retravailler la calibration du compartiment souterrain de J2000, comme cela a été

réalisé récemment sur le bassin du Rhône (Le Philippe, 2025). Cependant, cela fait appel à des données piézométriques qui sont rares sur le secteur de la Saône. Des travaux de recherche complémentaires sur la quantification des apports latéraux souterrains aux rivières restent nécessaires.

7. Evolution des températures saisonnières simulées (1980-2021)

7.1. Confrontation des simulations aux observations pour la Saône à Macon

La confrontation des tendances simulées et observées des moyennes saisonnières pour la Saône à Macon (chronique EDF), montre une bonne restitution des tendances, surtout lorsqu'on les compare sur la période commune (2000-2021).

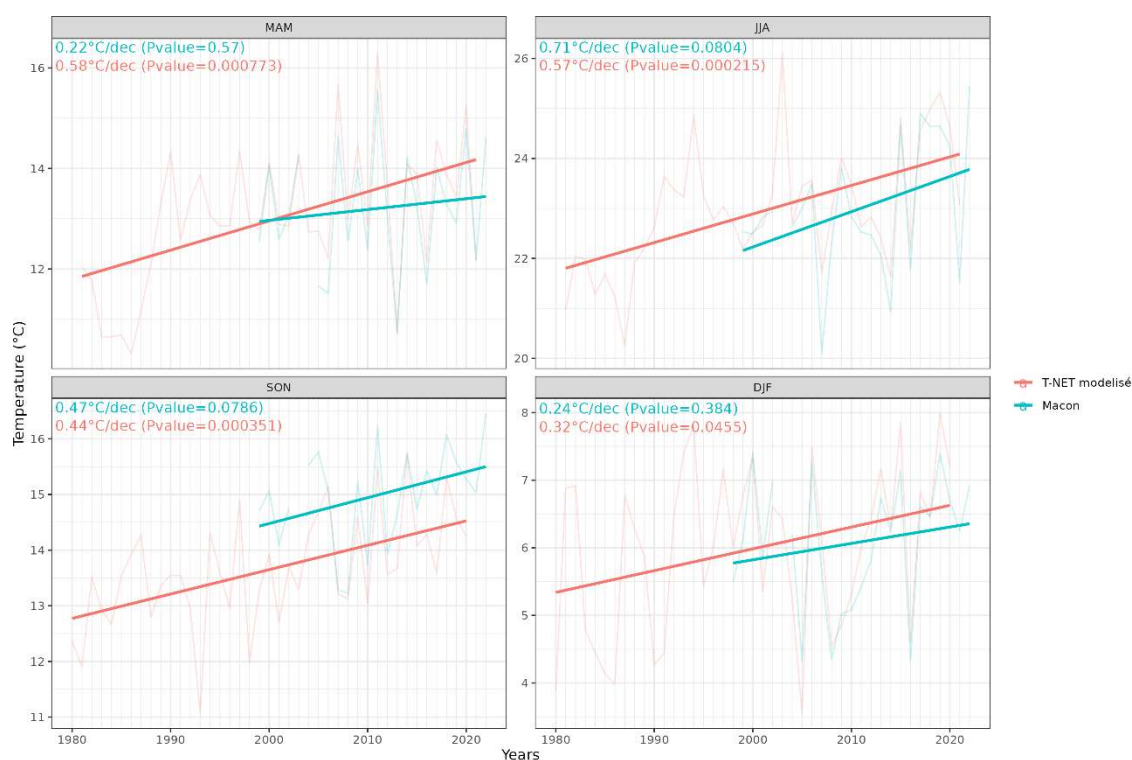


Figure 52. Tendances observées et simulées de températures saisonnières de l'eau de la Saône à Macon (simulation : 1980-2021 ; observation : 2000-2021, chronique EDF)

7.2. Tendances basées sur les simulations

D'après les simulations, les températures saisonnières de la Saône à Macon, ont toutes augmentés : + 0.47°C

/décennie (moyenne mars à mai), $+0.54^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$ (moyenne juin à août), $+0.42^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$ (moyenne septembre à novembre), $+0.31^{\circ}\text{C}/\text{décennie}$ (moyenne décembre à février).

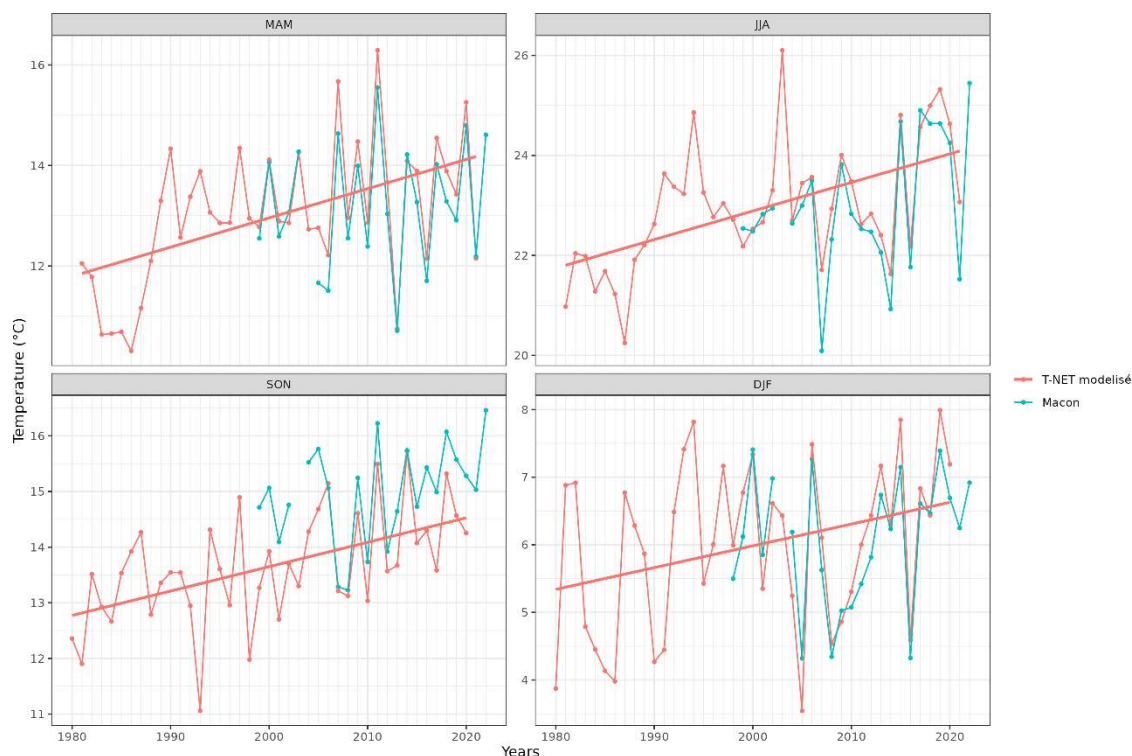


Figure 53. Tendances observées et simulées de températures saisonnières de l'eau de la Saône à Macon (observations EDF)

8. Analyse des scénarios de plantation de ripisylve

Afin de tester la sensibilité au réchauffement et les possibilités d'atténuation de ce réchauffement, nous avons étudié plusieurs scénarios de restauration de la végétation rivulaire en les simulant grâce au modèle T-NET.

Cette étude a été menée sur 15 bassins versants tests dans le bassin de la Saône (Figure 54). Ces bassins versants sont de taille intermédiaire (entre 80 et 884 km²), ce qui correspond à une échelle spatiale pertinente de gestion/restauration de la ripisylve et d'étude la thermie. Différents contextes géomorphologiques, géologiques sont représentés, ainsi qu'un gradient de présence de végétation rivulaire (cf tableau 4).

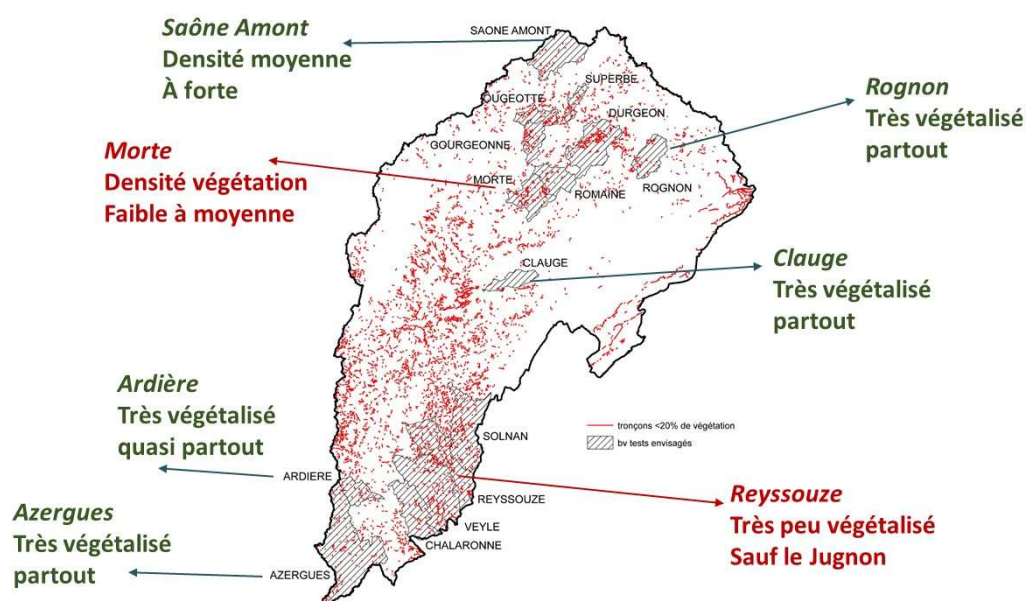


Figure 54. Localisation des 15 sous-bassins versants étudiés pour l'analyse de scénarios de restauration de la végétation rivulaire à partir du modèle T-NET

Tableau 4. Caractéristiques des bassins versants étudiées ; Régime thermique caractérisée d'après la signature TS (sensibilité thermique), spatialisée à l'échelle de la France (www.thermie-rivieres.inrae.fr)

Nom	Surface en km ²	Régime thermique Beaufort et al, 2020, page 47	Caractéristiques de la végétation
DURGEON	413	Majoritairement en 1 et 2 mais cours moyen en 4	Densité de végétation moyenne à forte, faible sur le chevelu
GOURGEONNE	150	Majoritairement en 1	Densité moyenne de végétation
ROMAINE	199	Majoritairement en 1 et 2	Densité moyenne de végétation
MORTE	258	Majoritairement en 1 mais quelques affluents en 4	Densité de végétation faible à moyenne
ROGNON	220	Majoritairement en 2 et 1 mais aval du cours d'eau principal en 4	Très végétalisé quasiment partout
CLAUGE	145	Majoritairement en 2	Très végétalisé quasiment partout
REYSSOUZE	494	Majoritairement en 1 mais extrême aval en 4	Très peu végétalisé sauf le Jugnon
VEYLE	671	Majoritairement en 1 et 2 mais le tiers aval en 4	Densité de végétation moyenne à faible
CHALARONNE	342	Majoritairement en 1 et un peu en 2	Densité de végétation moyenne entre 40 et 80%
ARDIERE	152	Majoritairement en 2 et un peu en 1	Très végétalisé quasiment partout
AZERGUES	885	Majoritairement en 2 et 1 mais amont et aval du cours d'eau principal en 4	Très végétalisé partout
SOLNAN	524	Majoritairement en 1, mais aval en 4 et chevelu amont en 3	Peu végétalisé dans son cours moyen, plus végétalisé à l'amont et l'aval
SAONE AMONT	382	Majoritairement en 2 et 1 mais quelques secteurs en 4	Densité végétation moyenne à forte
OUGEOTTE	131	Majoritairement en 1 et 2	Densité de végétation forte à l'amont mais faible à l'aval
SUPERBE	80	Majoritairement en 1 et un peu en 2	Densité de végétation moyenne à faible

3 scénarios de restauration de la ripisylve ont été simulés dans le modèle T-Net et comparés à la température modélisée de l'état actuel :

- 100% : simuler une ripisylve continue sur les 2 berges de l'ensemble des tronçons des bassins versants. C'est le scénario maximaliste.
- +40% : Ajouter à chaque tronçon une longueur de ripisylve équivalente à 40% de la longueur du tronçon sur les 2 berges, sachant que le taux de 100% ne peut pas être dépassé.
- 20-80% : cibler les tronçons qui ont une ripisylve très faible, moins de 20% de la longueur du tronçon couverte, et restaurer, sur ceux-ci, un taux de ripisylve à 80%. C'est le scénario minimaliste.

Comme le montre l'exemple de la Reyssouze (Figure 55), il y a une atténuation croissante de la température moyenne (illustrée par le nombre de tronçons dans les différentes tranches thermiques) du scénario minimaliste jusqu'au maximaliste.

Dans l'ensemble des cas, tous les scénarios entraînent une baisse de la température. Mais l'importance des gains est très variable selon les bassins versants.

Logiquement le scénario à 100% de végétation est celui qui simule les gains les plus importants, même s'ils peuvent être limités dans les bassins déjà fortement boisés (la Clauge par exemple). Dans 12 bassins sur 15, l'atténuation de température dépasse les 2°C de température moyenne sur l'ensemble des tronçons (cf Figure 57).

Pour le scénario +40%, il y a une différence marquée entre les bassins selon leur taux de végétation initial. Dans les bassins déjà fortement boisés, les gains sont très proches du scénario à 100%, alors qu'ils sont beaucoup plus limités dans les bassins avec peu de ripisylve.

Comparaison des scénarios +40% et 20-80% : Sauf dans quelques rares cas où la végétation rivulaire initiale est très peu présente comme la Reyssouze et le Solnan, le scénario 20-80% n'apporte que peu d'améliorations thermiques : moins de 0,5°C en moyenne sur l'ensemble des tronçons pour plus de la moitié des bassins (cf figure). Cela démontre qu'une amélioration générale de la couverture rivulaire est beaucoup plus efficace pour la régulation thermique que le comblement sporadique de ruptures importantes dans la ripisylve.

Plus globalement, dans les bassins versants avec une ripisylve développée, les rivières sont moins sensibles au réchauffement. La restauration de la végétation rivulaire, notamment à large échelle, est un vecteur important pour limiter la hausse des températures, voire de la réduire fortement.

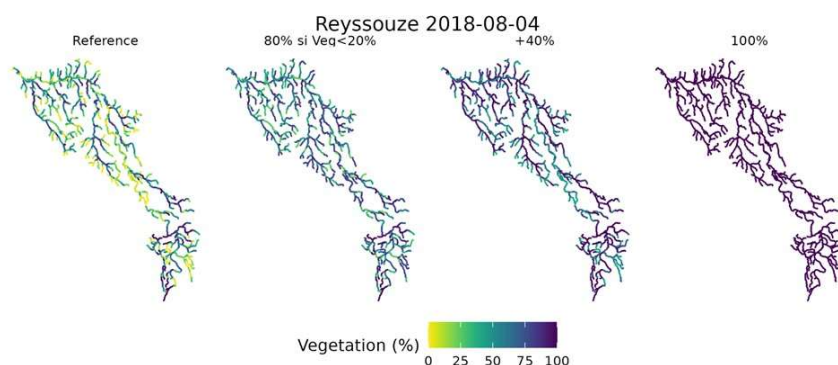


Figure 55. Cartographie du taux de végétation actuel (moyenne rive gauche et rive droite) par tronçon de calcul T-NET (bassin Reyssouze) et des taux de végétation pour trois scénarios

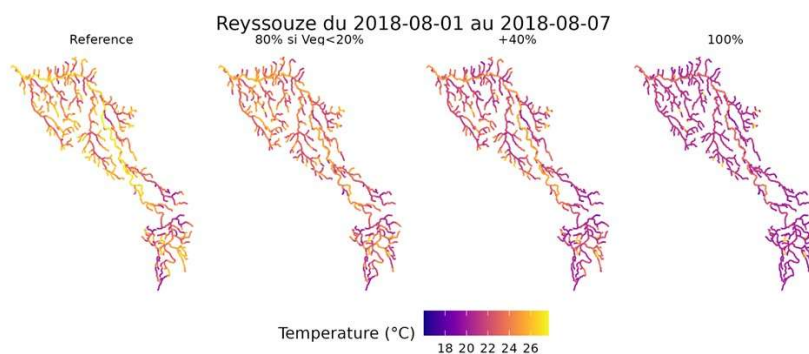


Figure 56. Cartographie de la température des tronçons de calcul T-NET (bassin Reyssouze) avec la simulation de référence et avec les trois scénarios de restauration de la ripisylve

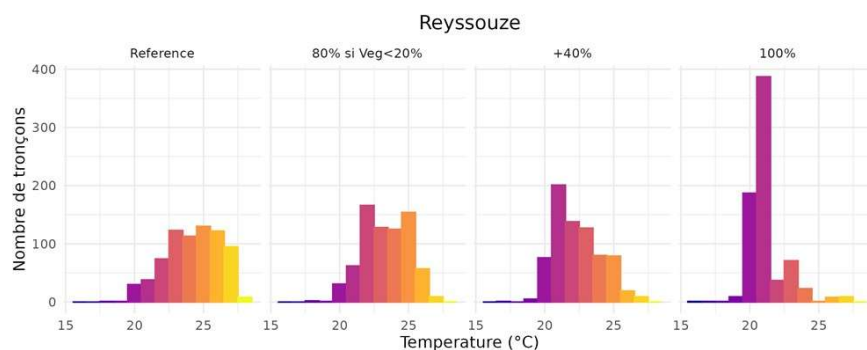


Figure 57. Distribution statistique des températures simulées au niveau des tronçons du bassin de la Reyssouze (simulation de référence et simulations avec 3 scénarios de restauration de la ripisylve)

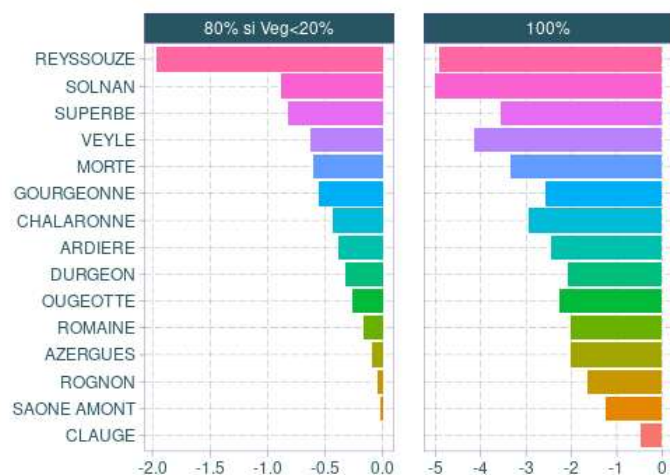


Figure 58. Hiérarchisation des gains de refroidissement obtenus par bassin versant et pour deux scénarios contrastés de restauration de la ripisylve

9. Limites de la modélisation

Globalement le modèle hydrologique présente de bonnes performances, lorsqu'il est évalué sur les débits journaliers des 87 stations hydrométriques. Les stations présentant les KGE les plus faibles sont également celles qui posent problèmes sur NSE et correspondent principalement au secteur karstique du Doubs amont, ainsi qu'au secteur aval du bassin versant et en particulier le secteur des Dombes dont l'hydrologie est particulière (et fortement influencée par la gestion des étangs).

Cependant, l'analyse des débits latéraux provenant du réservoir souterrain, montre une sous-estimation de ces contributions, notamment en période estivale. Il est donc impératif de tester d'autres approches pour intégrer des débits latéraux ou les flux de chaleur souterrains plus cohérents dans la modélisation thermique. Ils pourraient être intégrés par spatialisations des estimations réalisées avec le modèle hydrogéologique Modflow sur des sous-bassins tests, représentatifs des classes lithologiques analysées dans ce travail. Des approches empiriques issues des observations (jaugeages différentiels dans certaines zones) pourraient valider la modélisation réalisée.

La variabilité trop importante du signal thermique modélisé, pourrait aussi être améliorée, par une meilleure prise en compte de la propagation du flux de chaleur dans le réseau hydrographique.

Enfin, une prise en compte de l'ombrage topographique, notamment pour les rivières encaissées et une meilleure caractérisation de la végétation à l'aide de nouvelles bases de données mises au point par l'IGN (lidar et MNE/MNS) pourraient apporter une meilleure précision.

10. Conclusions et perspectives

Ce travail a permis la collecte d'une base de données de températures des cours d'eau à l'échelle horaire (646 stations) auprès de plusieurs acteurs de l'eau (Fédérations de Pêche, DREAL, OFB, ...) et composée de suivis hétérogènes (chroniques estivales, annuelles, avec des suivis variant entre 1 mois et 20 ans, parfois discontinus, dans la période 2005-2021) ; Ces données ont suivi un protocole de critique et validation (0.6% des mesures ont été enlevées). Certaines stations thermiques ont pu aussi être couplées à des stations hydrométriques (44 stations), suivant des critères de proximité.

L'analyse de ces données a permis de développer une méthodologie nouvelle pour la caractérisation spatio-temporelle de 8 signatures thermiques au niveau de 342 stations et 5 signatures hydrologiques à partir de 91 stations hydrométriques dans le bassin de la Saône. Le choix de ces signatures a été fait principalement pour caractériser la genèse des écoulements annuels ou pendant la période d'étiage et l'influence des apports de chaleur des aquifères aux cours d'eau. En effet, dans le contexte du changement climatique, les eaux souterraines ont une importance majeure dans le soutien d'étiage et le maintien des températures plus froides l'été et plus chaudes en hiver, compte tenu des différences de température et de dynamique entre les deux types de milieux. Nous avons montré que les quatre classes lithologiques dominantes (calcaires purs, calcaires mixtes, argiles et socle) pouvaient être discriminantes pour les signatures thermiques et dans une moindre mesure pour les signatures hydrologiques. La complémentarité des deux types de signatures, a aussi permis de différencier des types

de substrat et les stations de suivi suivant leur sensibilité au réchauffement atmosphérique. Ces signatures permettraient ainsi de localiser de potentielles zones refuges d'eau froide en période estivale.

Un modèle couplé hydrologie-thermie a été mis en place et pourra être utilisé pour caractériser les évolutions spatio-temporelles des températures des cours d'eau du bassin de la Saône.

Les performances du modèle hydrologique sont satisfaisantes avec un KGE médian de 0.63 et un NSE médian de 0.5. Les performances du modèle thermique T-NET sont relativement bonnes en considérant les moyennes journalières, avec un RMSE médian de 2°C sur la base de 246 stations de suivi. La comparaison des moyennes saisonnières simulées et observées entre 1999 et 2022 pour la Saône à Macon, ont montré des bonnes performances à la fois en terme de RMSE et de tendances long-terme. L'analyse des évolutions long-terme des températures saisonnières simulées sur la Saône à Macon depuis 1980 a permis de mettre en évidence le réchauffement moyen de +0.5 à 0.6°C/décennie au printemps et en été et de +0.3 à +0.4 en hiver et à l'automne, ce qui est similaire aux tendances observées pour d'autres cours d'eau européens (Seyedhashemi et al, 2022).

L'exploitation de cette modélisation couplée pour analyser l'effet d'atténuation des températures maximales à partir des scénarios de restauration de la végétation en bord de rivière a été réalisé pour 15 bassins versants tests. Ainsi nous avons pu hiérarchiser les bassins versants tests en fonction du gain d'atténuation de la température. La Reyssouze et le Solnan sont deux bassins versants, où la plantation de ripisylve maximise l'atténuation des températures.

Des améliorations du modèle couplé (hydrologie-thermie) sont possibles compte tenu de l'application du modèle T-NET sur d'autres bassins (Beaufort et al, 2016). Nous avons identifié un lien entre les biais de modélisation et les signatures thermiques caractérisant la contribution des aquifères (TS, b, Tw30), indiquant une représentation imparfaite des flux de chaleur provenant des aquifères. Egalement la variabilité des simulations de température est plus importante par comparaison aux observations, montrant probablement une mauvaise estimation des temps de parcours dans le réseau hydrographique. Pour la Saône, la prise en compte des données bathymétriques, d'une hydraulique plus fine et des échanges avec la nappe alluviale pourraient probablement améliorer la dynamique des simulations de température de la Saône.

L'intégration de l'ombrage topographique pour certaines rivières encaissées ainsi qu'une caractérisation plus fine de la végétation à partir des données MNE/MNS ou lidar HD, pourrait améliorer les simulations (projet Res-Teau, AERMC, en cours). Enfin, l'intégration des actions anthropiques (par exemple, seuils) dans la modélisation pourrait permettre l'analyse de scénarios de restauration.

11. Références bibliographiques

- Beaufort A., Curie F., Moatar F., Ducharne A., Melin E., Thiéry D. (2016). T-NET, a dynamic model for simulating daily stream temperature at the regional scale based on a network topology.. *Hydrological Processes*, , <https://dx.doi.org/10.1002/hyp.10787>, <https://hal.science/hal-01287170>,
- Beaufort, A., Diamond, J. S., Sauquet, E., and Moatar, F.: Spatial extrapolation of stream thermal peaks using heterogeneous time series at a national scale, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 26, 3477–3495, <https://doi.org/10.5194/hess-26-3477-2022>, 2022.
- Beaufort A., Moatar F., Sauquet E., Loicq P., Hannah D. (2020). Influence of landscape and hydrological factors on StreamAir temperature relationships at regional scale. *Hydrological Processes*, 34 (3), 583-597, <https://dx.doi.org/10.1002/hyp.13608>, <https://hal.inrae.fr/hal-02609943>
- Beaufort A., Moatar F., Sauquet E., Magand C. (2020). *Thermie en rivière : Analyse géostatistique et description de régime : Application à l'échelle de la France*. (INRAE), 106 pages, <https://hal.inrae.fr/hal-03126527>
- Branger F, Isabelle Gouttevin, François Tilmant, Thomas Cipriani, Christine Barachet, et al.. Modélisation hydrologique distribuée du Rhône. [Rapport de recherche] irstea. 2016, pp.116. <hal-02605058>
- Branger F, Louise Mimeau, Louise Crochemore, Jeremie Bonneau, Baptiste Lévêque, et al.. Usages de l'eau et changement climatique sur le bassin du Rhône: quantification de l'impact sur la ressource de différentes stratégies d'adaptation. INRAE. 2024, 73 p. <hal-05202062>
- Bustillo V., Moatar F., Ducharne A., Thiéry D., Poirel A. 2014. A multimodel comparison for assessing water temperatures under changing climate conditions via the equilibrium temperature concept: case study of the Middle Loire River, France. *Hydrological processes*. Vol 28, issue 3, 1507-1524 Doi: 10.1002/hyp.9683
- Caissie, D., 2006. The thermal regime of rivers: a review. *Freshw. Biol.* 51, 1389–1406. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2006.01597.x>
- Chu, C., Jones, N.E., Allin, L., 2010. Linking the thermal regimes of streams in the Great Lakes Basin, Ontario, to landscape and climate variables: THERMAL REGIMES IN ONTARIO STREAMS. *River Res. Appl.* 26, 221–241. <https://doi.org/10.1002/rra.1259>
- Daigle, A., Boyer, C., St-Hilaire, A., 2019. A standardized characterization of river thermal regimes in Québec (Canada). *J. Hydrol.* 577, 123963. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.123963>
- de Lavenne, A., Andréassian, V., Thirel, G., Ramos, M.-H., Perrin, C., 2019. A Regularization Approach to Improve the Sequential Calibration of a Semidistributed Hydrological Model. *Water Resources Research* 55. <https://doi.org/10.1029/2018WR024266>
- Gresselin, F., Dardaillon, B., Bordier, C., Parais, F., Kauffmann, F., 2023. Use of statistical methods to characterize the influence of groundwater on the thermal regime of rivers in Normandy, France: comparison between the highly permeable, chalk catchment of the Touques River and the low permeability, crystalline rock catchment of the Orne River. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.* 517, SP517-2020–117. <https://doi.org/10.1144/SP517-2020-117>
- Gupta, H. V., Wagener, T., & Liu, Y. (2008). Reconciling theory with observations: elements of a diagnostic approach to model evaluation. *Hydrological Processes*, 22(18), 3802–3813.
- Hare, D.K., Helton, A.M., Johnson, Z.C., Lane, J.W., Briggs, M.A., 2021. Continental-scale analysis of shallow and deep groundwater contributions to streams. *Nat. Commun.* 12, 1450. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21651-0>
- Horner Ivan. Construction et évaluation de signatures hydrologiques pour le diagnostic et l'amélioration d'un modèle hydrologique distribué. *Hydrologie*. Université Grenoble Alpes [2020-..], 2020. Français. <NNT : 2020GRALU014>. <tel-02928272>
- Isaak, D. J., Luce, C. H., Chandler, G. L., Horan, D. L., and Wollrab, S. P.: Principal components of thermal regimes in mountain river networks, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22, 6225–6240, <https://doi.org/10.5194/hess-22-6225-2018>, 2018.

- Jackson, H.M., Gibbins, C.N., Soulsby, C., 2007. Role of discharge and temperature variation in determining invertebrate community structure in a regulated river. *River Res. Appl.* 23, 651–669. <https://doi.org/10.1002/rra.1006>
- Kelleher, C., Wagener, T., Gooseff, M., McGlynn, B., McGuire, K., Marshall, L., 2012. Investigating controls on the thermal sensitivity of Pennsylvania streams. *Hydrol. Process.* 26, 771–785. <https://doi.org/10.1002/hyp.8186>
- Le Philippe, Y., 2025: Recalibration du compartiment souterrain d'un modèle hydrologique distribué à l'échelle régionale. Application au bassin versant du Rhône, INSA, Génie Énergétique et Environnement, 4ème année.
- Loicq P., Moatar F., Jullian Y., Dugdale S. J., Hannah D. M. (2018). Improving representation of riparian vegetation shading in a regional stream temperature model using LiDAR data. *Science of the Total Environment*, 624, 480–490, <https://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.129>, <https://hal.science/hal-02377286>, OA
- Maheu, A., Poff, N. L., and St-Hilaire, A. (2016) A Classification of Stream Water Temperature Regimes in the Conterminous USA. *River Res. Applic.*, 32: 896–906. doi: [10.1002/rra.2906](https://doi.org/10.1002/rra.2906).
- McMillan, H. (2020). Linking hydrologic signatures to hydrologic processes: A review. *Hydrological Processes*, 34(6), 1393–1409.
- McMillan, H., Westerberg, I., & Branger, F. (2017). Five guidelines for selecting hydrological signatures. *Hydrological Processes*, 31(26), 4757–4761.
- McMillan, H. K. (2021). A review of hydrologic signatures and their applications. *WIREs Water*, 8(1), e1499.
- Morel M, Booker D, Gob F, Lamouroux N. 2020. Intercontinental predictions of river hydraulic geometry from catchment physical characteristics. *Journal of hydrology*, 582. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124292>
- OLDEN, J.D. and NAIMAN, R.J. (2010), Incorporating thermal regimes into environmental flows assessments: modifying dam operations to restore freshwater ecosystem integrity. *Freshwater Biology*, 55: 86-107. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02179.x>
- Praskievicz, S., Luo, C., 2019. Unsupervised hydrologic classification of rivers: Watershed controls on natural and anthropogenic flow regimes, Alabama, USA. *Hydrol. Process.* 33, 1231–1244. <https://doi.org/10.1002/hyp.13394>
- Seyedhashemi H., Vidal J.-P., Diamond J., Thiéry D., Monteil C., Hendrickx F., Maire A., Moatar F. (2022). Regional, multi-decadal analysis on the Loire River basin reveals that stream temperature increases faster than air temperature. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26 (9), 2583-2603, <https://dx.doi.org/10.5194/hess-26-2583-2022>, <https://hal.inrae.fr/hal-03684242>,
- Steel, E. Ashley, Colin Sowder, and Erin E. Peterson, 2016. Spatial and Temporal Variation of Water Temperature Regimes on the Snoqualmie River Network. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)* 52(3): 769–787. DOI: [10.1111/1752-1688.12423](https://doi.org/10.1111/1752-1688.12423)
- Vidal, J.-P., Martin, E., Franchistéguy, L., Baillon, M., Soubeyroux, J.-M., 2010. A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system: A 50-YEAR HIGH-RESOLUTION ATMOSPHERIC REANALYSIS OVER FRANCE. *Int. J. Climatol.* 30, 1627–1644. <https://doi.org/10.1002/joc.2003>

12. Remerciements

Les auteurs remercient les producteurs de données (voir annexes) pour la mise à disposition des données durant le projet « Modélisation couplée de la température et de l'hydrologie du bassin de la Saône », financé par l'AERMC (2021-2024).

Annexes : Signatures thermiques

lb_fiche	TS	b	Tw30	Smag	Ar	Phi	Nc15	N15
01 - Appeum Ã Francheleins (IRSTEA_AC) (1)	0.38	7.51	16.54	#DIV/0!	0.43	70.06	29	80
01 - Avanon Ã Bey (IRSTEA_AC)	0.53	5.04	17.70	11.70	0.56	44.45	34	91
01 - Bief d'Ausson Ã Ausson amont RD118 (IRSTEA_AC)	0.72	3.18	19.53	15.40	0.74	32.56	65	113
01 - Bief d'Ausson Ã Ausson aval (IRSTEA_AC)	0.65	4.28	19.50	13.59	0.66	46.88	73	106
01 - Bief d'Avignon Ã Petit Avignon (IRSTEA_AC)	0.80	3.13	21.95	17.20	0.83	17.77	104	135
01 - Bief de Courmangoux Ã Courmangoux (IRSTEA_AC)	0.31	9.04	16.24	6.52	0.31	33.42	34	39
01 - Bief de Courmangoux Ã Courmangoux median foret Verjonniere (IRSTEA_AC)	0.49	6.63	18.71	10.28	0.50	56.99	60	91
01 - Bief de Malavaa Malavaaval (IRSTEA_AC)	0.77	2.91	20.82	16.44	0.79	28.23	74	118
01 - Calonne Ã Guereins (IRSTEA_AC)	0.48	5.65	17.40	10.72	0.50	47.76	34	93
01 - Calonne Ã Montceaux (IRSTEA_AC)	0.47	5.54	16.93	10.60	0.49	53.17	33	84
01 - Irance Ã Mezeriat (RNT_OFB)	0.71	3.95	19.33	13.86	0.75	10.94	85	127
01 - La Veyle Ã Buellas (FDP01) (2)	0.86	3.07	21.80	17.14	0.90	16.33	92	156
01 - La Veyle Ã Buellas (FDP01) (3)	0.85	2.74	20.09	#DIV/0!	0.88	12.55	94	156
01 - La Veyle Ã Buellas (FDP01) (4)	0.86	2.68	20.25	#DIV/0!	0.88	11.55	94	157
01 - La Veyle Ã Peronnas (FDP01) (2)	0.79	3.44	20.60	16.99	0.84	1.15	101	140
01 - Le Sevron Ã Meillonas (FDP01)	0.20	10.66	14.94	#DIV/0!	0.22	50.92	7	21
01 - Matre Ã Chaleins (IRSTEA_AC) (1)	0.52	5.43	17.36	11.64	0.56	62.35	34	100
01 - Matre Ã Messimy (IRSTEA_AC)	0.67	3.85	20.31	14.49	0.71	19.31	97	111
01 - Reysousse Ã Pont-de-Vaux (RNT_OFB)	0.94	2.61	23.65	17.64	1.01	11.96	149	170
01 - Sane Morte Ã Sane Morte avaPontremble (IRSTEA_AC)	0.83	2.87	22.10	17.77	0.87	-0.89	100	142
01 - Sane Vive Ã avaCurciat (IRSTEA_AC)	0.82	3.21	22.26	17.52	0.86	9.04	105	139
01 - Sevron Ã amont St Etienne (IRSTEA_AC)	0.55	5.92	19.06	11.24	0.58	91.01	77	105
01 - Sevron Ã avaSt Etienne (IRSTEA_AC)	0.68	4.57	20.68	14.30	0.70	51.05	75	119
01 - Sevron Ã Beny (IRSTEA_AC)	0.72	4.10	21.55	15.25	0.74	46.10	79	123
01 - Sevron Ã Marboz (IRSTEA_AC)	0.77	3.62	21.86	#DIV/0!	0.79	43.48	99	128

lb_fiche	TS	b	Tw30	Smag	Ar	Phi	Nc15	N15
69 - Andilleÿ Â Beaujeu (FDP69)	0.63	4.00	16.72	9.66	0.69	44.13	31	70
69 - Ardiÿÿ res Â Beaujeu (FDP69)	0.67	3.91	18.75	12.50	0.71	34.17	65	102
69 - Ardiÿÿ res Â Cercie (FDP69)	0.69	3.23	18.48	10.75	0.72	47.20	61	96
69 - Ardiÿÿ res Â Les ardillats (FDP69)	0.53	4.41	15.71	9.13	0.59	7.34	18	40
69 - Ardiÿÿ res Â Les ardillats (FDP69)	0.62	4.08	15.82	11.08	0.68	8.06	20	70
69 - Ardiÿÿ res Â Regnie-durette (FDP69)	0.66	3.29	18.16	10.42	0.67	55.12	37	85
69 - Ardiÿÿ res Â Taponas (FDP69)	0.78	2.43	20.30	12.03	0.82	36.52	76	112
69 - Aridere Â Saint-Jean-d'Ardieres (RNT_OFB)	0.73	2.92	19.85	14.24	0.77	44.38	86	120
69 - Aroy Â MONSOLS (FDP69)	0.54	3.87	15.25	9.36	0.59	55.85	10	29
69 - Avray Â Saint-just-d'avray (FDP69)	0.50	3.79	14.55	9.79	0.57	95.96	8	9
69 - Avray Â Saint-just-d'avray (FDP69)	0.61	3.67	16.43	12.08	0.67	34.69	24	63
69 - Aze Â CLAVEISOLLES (FDP69)	0.66	3.11	17.65	10.15	0.73	14.32	18	75
69 - Azergues Â Anse (FDP69)	0.95	1.35	22.25	14.70	1.01	23.34	127	177
69 - Azergues Â Chambost-allieres (FDP69)	0.66	3.57	17.39	12.72	0.73	41.50	36	90
69 - Azergues Â Chamelet (FDP69)	0.65	3.71	17.29	12.67	0.72	42.46	36	94
69 - Azergues Â Civrieux-d'azergues (FDP69)	0.85	2.00	20.66	13.33	0.90	25.47	125	159
69 - Azergues Â Lamure-sur-azergues (FDP69)	0.64	3.53	16.94	12.16	0.70	39.38	25	66
69 - Azergues Â Lamure-sur-azergues (FDP69)	0.65	3.35	17.13	12.55	0.72	39.13	25	73
69 - Azergues Â Letra (FDP69)	0.68	2.78	17.86	13.19	0.73	53.91	37	102
69 - Azergues Â Morance (FDP69)	0.93	1.46	22.06	14.53	0.98	27.86	127	173
69 - Batailly Â Saint-romain-de-popey (FDP69)	0.63	3.79	18.20	13.37	0.67	29.02	54	86
69 - Biconne Â Lamure-sur-azergues (FDP69)	0.58	4.05	16.18	12.10	0.67	72.32	17	60
69 - Boussuivre Â Joux (FDP69)	0.63	3.26	16.33	10.17	0.68	59.92	15	43
69 - Brÿÿvenne Â Bessenay (FDP69)	0.70	2.99	19.18	13.70	0.76	7.71	73	105
69 - Brÿÿvenne Â Chatillon (FDP69)	0.82	2.71	22.63	16.42	0.86	22.27	113	144
69 - Brÿÿvenne Â Meys (FDP69)	0.63	3.05	17.18	12.12	0.69	21.84	35	69
69 - Buvet Â Fleurieux-sur-l'arbresle (FDP69)	0.62	4.31	18.66	13.34	0.66	53.23	70	100
69 - Chaneliÿÿ re Â Tarare (FDP69)	0.50	4.93	15.90	10.53	0.54	75.73	18	36
69 - Changy Â Vauxrenard (FDP69)	0.58	3.88	16.60	9.19	0.62	71.31	25	69
69 - Colombier Â MONSOLS (FDP69)	0.58	4.35	17.32	12.24	0.62	34.03	42	66
69 - Conan Â SAINT-JULIEN-SUR-BIBOST (FDP69)	0.65	2.97	18.06	12.11	0.68	32.29	45	85
69 - Contresens Â Sourcieux-les-mines (FDP69)	0.60	4.58	17.79	12.96	0.64	55.79	67	87
69 - Cosnes Â BESSENAY (FDP69)	0.63	2.88	18.30	12.29	0.66	34.35	49	87
69 - Ergues Â POULE-LES-ECHARMEAUX (FDP69)	0.63	3.56	17.32	12.00	0.70	3.67	31	73
69 - Ergues Â Saint-nizier-d'azergues (FDP69)	0.60	3.45	16.17	11.56	0.66	42.39	16	44
69 - Font Froide Â Chambost-allieres (FDP69)	0.55	3.42	15.05	11.09	0.61	91.69	10	21
69 - Fragny Â Grandris (FDP69)	0.50	4.09	14.78	10.47	0.58	95.42	8	13
69 - Glavaroux Â Bessenay (FDP69)	0.66	2.80	16.50	10.87	0.70	35.29	15	71
69 - Lafay Â Poule-les-echarreaux (FDP69)	0.44	4.55	13.97	8.43	0.50	102.14	6	6
69 - Lafay Â Poule-les-echarreaux (FDP69)	0.59	4.18	16.56	11.77	0.66	38.93	24	57
69 - Lafay Â Saint-laurent-de-chamousset (FDP69)	0.62	3.82	17.71	12.28	0.67	41.13	46	80
69 - Le Badier Â LETRA (FDP69)	0.51	4.45	15.74	9.10	0.56	77.95	13	41
69 - Le Breuil Â LE BREUIL (FDP69)	0.61	3.32	16.86	12.69	0.65	25.70	33	70
69 - Marverand Â Arnas (FDP69)	0.78	2.76	19.75	12.05	0.83	27.36	92	109
69 - Marverand Â Arnas (FDP69)	0.68	3.39	19.39	12.98	0.70	46.16	70	114
69 - Marverand Â SAINT-JULIEN (FDP69)	0.53	4.31	16.50	9.18	0.58	79.44	50	74
69 - Mauvaise Â Julienas (FDP69)	0.66	3.47	18.11	11.69	0.71	37.82	56	98
69 - Mauvaise Â VAUXRENARD (FDP69)	0.62	3.52	17.90	10.93	0.66	53.97	63	85
69 - Merloux Â Liergues (FDP69)	0.70	2.79	19.30	12.95	0.73	26.72	70	110
69 - Merloux Â Theize (FDP69)	0.50	5.68	17.21	9.24	0.52	40.81	34	90
69 - Morgon Â Gleize (FDP69)	0.52	5.65	17.41	9.55	0.54	43.43	67	107
69 - Morgon Â Gleize (FDP69)	0.56	5.18	18.38	10.38	0.58	48.39	71	114
69 - Morgon Â VILLE-SUR-JARNIOUX (FDP69)	0.42	6.11	16.35	7.25	0.45	74.85	24	69
69 - Nizerand Â Denice (FDP69)	0.66	3.53	19.08	12.42	0.69	56.42	59	113
69 - Nizy Â Legny (FDP69)	0.52	5.34	16.58	8.49	0.55	45.28	15	75
69 - Ombre Â Liergues (FDP69)	0.57	5.30	18.90	10.54	0.59	43.03	71	115
69 - Orval Â Saint-nizier-d'azergues (FDP69)	0.57	4.30	16.27	10.96	0.65	68.57	16	47
69 - Pelot Â SAINT-CHRISTOPHE (FDP69)	0.67	3.92	18.20	11.53	0.72	30.42	45	90
69 - Penon Â Bibost (FDP69)	0.65	3.04	17.50	13.61	0.68	35.37	41	67
69 - Pramenoux Â Lamure-sur-azergues (FDP69)	0.62	3.52	16.67	12.13	0.69	43.37	17	56
69 - Pramenoux Â Saint-nizier-d'azergues (FDP69)	0.55	3.50	15.29	9.08	0.59	54.06	9	26
69 - Rossand Â MONTROMANT (FDP69)	0.59	3.76	16.39	10.79	0.65	40.60	28	60
69 - Saint-Didier Â SAINT-DIDIER-SUR-BEAUJEU (FDP69)	0.65	3.45	18.30	11.46	0.71	43.24	66	89
69 - Saint-Didier Â Saint-didier-sur-beaujeu (FDP69)	0.63	3.50	17.77	11.64	0.68	14.27	54	87
69 - Samsons Â Marchampt (FDP69)	0.65	3.83	17.95	11.85	0.70	44.36	53	97
69 - Samsons Â Quincie-en-beaujolais (FDP69)	0.64	3.51	18.16	11.87	0.67	67.12	71	113
69 - Samsons Â Quincie-en-beaujolais (FDP69)	0.65	3.84	18.17	11.97	0.70	42.60	53	97
69 - Saone Â Anse (RNT_OFB)	0.89	2.93	24.55	17.66	0.97	38.16	152	159
69 - Soanan Â SAINT-APPOLINAIRE (FDP69)	0.59	3.45	16.25	10.26	0.64	23.31	19	59
69 - St Cyr Â Chambost-allieres (FDP69)	0.56	4.05	15.89	11.30	0.64	95.87	18	51
69 - Theÿ Â OUROUX (FDP69)	0.60	3.49	16.74	11.46	0.65	55.89	29	56
69 - Torranchin Â AFFOUX (FDP69)	0.64	2.84	16.64	11.54	0.70	21.07	22	62
69 - Torranchin Â Pontcharra-sur-turdine (FDP69)	0.69	3.68	19.37	13.74	0.75	41.85	72	101
69 - Torranchin Â Saint-forgeux (FDP69)	0.62	3.67	18.23	12.83	0.68	55.36	49	81
69 - Tourette Â Chevinay (FDP69)	0.59	3.93	17.73	11.74	0.64	39.52	44	74
69 - Trÿÿsoncle Â Savigny (FDP69)	0.61	4.33	18.49	11.75	0.65	54.65	69	92
69 - Tulin Â Saint-forgeux (FDP69)	0.44	6.05	15.61	9.30	0.50	66.09	21	23
69 - Turdine Â Bully (FDP69)	0.74	3.41	19.68	13.67	0.78	35.07	96	134
69 - Turdine Â JOUX (FDP69)	0.58	4.06	16.07	10.44	0.65	43.90	19	53
69 - Turdine Â L'Arbresle (RNT_OFB)	0.75	3.11	21.13	16.19	0.78	28.37	83	123
69 - Turdine Â Saint-romain-de-popey (FDP69)	0.67	4.28	19.63	14.12	0.72	55.23	80	121
69 - Vallossiÿÿ res Â Claveisolles (FDP69)	0.55	3.70	15.46	11.33	0.62	85.86	11	32
69 - Valtorte Â Claveisolles (FDP69)	0.53	5.21	16.04	12.26	0.62	72.91	16	56
69 - Vauxonne Â Saint-georges-de-reineins (FDP69)	0.74	2.93	18.95	11.28	0.78	38.96	117	140
69 - Vavre Â Lozanne (FDP69)	0.71	2.64	18.15	11.30	0.74	52.77	34	126
69 - Vermare Â Les sauvages (FDP69)	0.51	4.69	15.32	10.54	0.57	71.27	14	26
69 - Vernay Â Vernay (FDP69)	0.65	3.63	17.94	11.82	0.70	20.32	30	90
69 - Vervuis Â Sainte-paule (FDP69)	0.64	3.34	16.37	10.28	0.69	56.42	14	52
69 - Vissoux Â Saint-verand (FDP69)	0.66	2.40	16.58	10.97	0.70	41.10	15	61

21 - Avant Dheune Ã Pommard (FDP21)	0.59	5.23	19.87	9.27	0.60	30.45	72	100
21 - Avant Dheune Ã Saint-Loup-GÃanges (FDP21)	0.69	4.12	20.41	10.61	0.72	19.87	88	137
21 - Beze Ã Noiron-sur-BÃze (FDP21)	0.39	8.08	18.86	5.47	0.39	66.22	43	81
21 - Beze Ã Vonges (FDP21)	0.65	5.66	21.92	10.33	0.68	16.66	111	143
21 - Bietre Ã Tart (FDP21)	0.36	9.06	18.08	6.68	0.40	123.00	96	108
21 - Bouzaize Ã Combertain (FDP21)	0.59	6.57	22.01	9.66	0.61	29.52	110	133
21 - Cent Fonts Ã FÃnay (FDP21)	0.44	6.95	17.19	7.29	0.47	25.71	70	94
21 - Chamban Ã Bligny-sur-Ouche (FDP21)	0.71	4.08	19.64	10.65	0.77	-20.18	82	136
21 - Courtavaux Ã Argilly (FDP21)	0.52	7.19	20.35	8.59	0.54	39.22	107	127
21 - Crone Ã Beire-le-Fort (FDP21)	0.76	3.59	22.02	10.88	0.79	-4.20	115	144
21 - Dheune Ã Santenay (FDP21)	0.74	3.81	21.04	11.50	0.77	22.61	107	138
21 - Ignon Ã Lamargelle (FDP21)	0.36	7.32	15.06	5.00	0.38	-9.35	9	22
21 - Ignon Ã Marcilly-sur-Tille (FDP21)	0.59	6.10	20.08	9.36	0.61	17.91	107	129
21 - Ignon Ã Tarsul (FDP21)	0.54	6.03	18.35	#DIV/0!	0.56	-3.00	42	97
21 - La Cosanne Ã Nolay (FDP21)	0.61	5.52	19.41	9.15	0.65	18.50	78	117
21 - La Gironde Ã Barbirey-sur-Ouche (FDP21)	0.58	5.03	18.81	8.18	0.62	38.10	47	82
21 - La Lauve Ã Ladoix-Serrigny (FDP21)	0.53	7.24	20.25	8.33	0.54	7.29	110	130
21 - La Varaude Ã Izeure (FDP21)	0.65	4.98	20.40	10.84	0.69	30.95	107	139
21 - L'Albane Ã TrochÃres (FDP21)	0.65	4.99	20.92	10.60	0.69	26.83	107	131
21 - Le Pralon Ã PrÃclon (FDP21)	0.66	3.61	19.35	#DIV/0!	0.68	36.05	30	90
21 - Le Raccordon Ã Arcenant (FDP21)	0.20	9.38	14.72	2.71	0.20	100.24	7	17
21 - Meuzin Ã Argilly (FDP21) (1)	0.70	4.91	20.76	#DIV/0!	0.71	-4.89	71	132
21 - Meuzin Ã Argilly (FDP21) (2)	0.70	4.91	21.95	11.19	0.72	11.15	132	149
21 - Meuzin Ã Villars-Fontaine (FDP21)	0.18	9.58	14.14	3.10	0.20	150.38	0	0
21 - Norges Ã Magny-sur-Tille (FDP21)	0.75	5.10	23.59	12.37	0.79	48.31	132	149
21 - Ouche Ã Bligny-sur-Ouche (FDP21)	0.65	5.28	20.29	10.05	0.69	-8.16	81	125
21 - Ouche Ã Gissey-sur-Ouche (FDP21)	0.64	4.80	20.01	9.84	0.67	8.86	86	123
21 - Ouche Ã Longvic (FDP21)	0.75	4.87	22.46	12.09	0.78	1.52	131	155
21 - Ouche Ã Lusigny-sur-Ouche (FDP21)	0.40	7.74	17.71	6.24	0.42	13.44	42	81
21 - Ouche Ã PlombiÃres-lÃs-Dijon (FDP21)	0.60	5.93	19.44	9.14	0.64	2.37	89	126
21 - Ouche Ã Varanges (FDP21)	0.74	5.66	23.70	12.07	0.78	14.35	135	142
21 - Ougne Ã Vaux-Saules (FDP21)	0.61	5.13	18.63	9.21	0.65	-4.25	71	103
21 - Rhoin Ã Savigny-lÃs-Beaune (FDP21)	0.39	7.02	18.53	6.70	0.40	115.20	19	61
21 - Ru De Lery Ã FrÃnois (FDP21)	0.46	6.83	17.17	6.99	0.50	-15.93	39	81
21 - Ru Des Cloux Ã Auxey-Duresses (FDP21)	0.48	6.71	18.25	7.53	0.51	48.22	71	91
21 - Saone Ã Pontallier-sur-SaÃne (FDP21)	0.96	2.63	25.57	16.35	1.05	18.11	171	171
21 - Saone Ã Trugny (FDP21)	1.00	2.83	26.62	17.17	1.10	16.73	177	177
21 - Sereine Ã Corgengoux (FDP21)	0.78	3.34	18.83	#DIV/0!	0.79	-15.85	54	131
21 - Suzon Ã Val-Suzon (FDP21)	0.44	5.98	16.18	6.35	0.46	42.17	17	51
21 - Tille Ã Arceau (FDP21)	0.39	7.01	15.82	5.74	0.41	49.95	23	56
21 - Tille Ã Les Maillys (FDP21)	0.55	7.17	20.68	#DIV/0!	0.62	81.65	36	106
21 - Tille Ã Pluvet (FDP21)	0.67	5.17	21.35	11.04	0.71	35.42	131	138
21 - Tille D'Avot Ã Avot (FDP21)	0.56	5.63	18.93	8.41	0.59	1.44	70	93
21 - Tille De Cussey Ã Cussey-les-Forges (FDP21)	0.36	7.21	15.11	5.36	0.39	32.57	8	27
21 - Vandenesse Ã Crugey (FDP21)	0.74	3.78	20.71	11.37	0.79	14.39	106	128
21 - Venelle Ã Lux (FDP21)	0.80	2.84	19.91	11.95	0.80	1.75	52	117
21 - Venelle Ã Orville (FDP21)	0.70	3.92	20.18	10.95	0.73	2.52	88	122
21 - Vingeanne Ã Blagny-sur-Vingeanne (FDP21)	0.70	4.54	21.37	11.36	0.74	13.70	130	140
21 - Vingeanne Ã Talmay (FDP21)	0.76	3.70	21.91	12.20	0.80	7.69	131	149
21 - Vouge Ã Esbarres (FDP21)	0.79	3.91	22.47	12.71	0.84	2.20	133	156
21 - Vouge Ã Gilly-lÃs-CÃteaux (FDP21)	0.56	6.83	20.95	8.52	0.56	6.99	107	130
21 - Vouge Ã Villebichot (FDP21)	0.62	6.19	21.27	9.66	0.64	18.13	131	141

25 - affluent Bief-Belin À Vaux et Chantegrue (EPAGE Haut-Doubs)	0.36	6.25	14.52	6.60	0.37	66.30	11	19
25 - Allan À Bart / Courcelles-l'Écluse-s-Montbéliard (FDP25)	0.88	3.54	22.75	15.16	0.93	28.09	119	136
25 - Allan À Feschés-le-Châtel / Allenjoie (FDP25)	0.79	3.79	21.31	14.05	0.82	21.66	116	134
25 - Arcier À Roche-lez-Beaupré (DREAL Bourgogne)	0.24	8.05	13.20	4.44	0.27	65.58	2	2
25 - Audeux À Bremondans (FDP25)	0.45	6.42	16.84	7.69	0.47	13.92	20	55
25 - Barbèche À Villars-sous-Dampjoux / Dampjoux	0.27	7.66	13.91	4.62	0.28	52.71	3	4
25 - Baume À Sancey (FDP25)	0.37	6.51	14.84	6.10	0.38	34.82	8	23
25 - Bief de Fuesse À Indevillers (FDP25)	0.36	7.13	14.71	6.10	0.37	13.22	7	21
25 - Bief Rouge À Fourcatier-et-Maison-Neuve / Lor	0.54	4.64	15.46	9.08	0.57	17.60	12	28
25 - Bief Rouget À Houtaud (EPAGE Haut-Doubs Haut-Doubs)	0.69	3.34	16.12	12.41	0.74	-4.66	15	50
25 - Brâme À Ornans (FDP25)	0.37	6.62	15.00	6.79	0.39	47.89	8	23
25 - Câbriot À Petite-Chaux (FDP25)	0.54	4.03	13.86	10.09	0.60	5.45	5	9
25 - Corcelle À Corcelle-Meslot (FDP25)	0.51	5.46	16.51	8.18	0.55	31.47	29	68
25 - Cornabey À Montlebon / Grand'Combe-Châtel	0.35	5.95	13.99	7.31	0.37	72.43	6	6
25 - Crenu À Avilley (FDP25)	0.48	6.12	16.92	8.09	0.50	35.82	36	69
25 - Cusancin À Baume-les-Dames (DREAL Bourgogne)	0.27	8.09	14.35	4.79	0.28	7.73	4	8
25 - Cusancin À Guillon-les-Bains (FDP25)	0.18	8.92	13.52	3.25	0.19	39.93	1	1
25 - Cusancin À Pont-les-Moulins (FDP25)	0.39	7.40	17.05	6.04	0.40	49.77	22	56
25 - Dessoubre À Consolation-Maisonnettes (FDP25)	0.15	8.15	11.98	2.93	0.16	21.12	0	0
25 - Dessoubre À Plaimbois-du-Miroir/Bretonvillers	0.27	7.45	13.63	5.58	0.28	9.75	2	2
25 - Dessoubre À Rosureux (DREAL Bourgogne)	0.36	6.76	14.60	6.59	0.37	-15.15	8	17
25 - Dessoubre À Saint-Hippolyte (FDP25)	0.58	5.81	18.64	10.58	0.61	-1.28	36	76
25 - Dessoubre À Saint-Hippolyte (RNT_OFB)	0.43	7.00	13.86	#DIV/0!	0.47	2.95	9	39
25 - Dessoubre À Vauluse / Battenans-Varin (FDP25)	0.47	6.55	16.90	8.36	0.48	10.31	26	50
25 - Doubs À Appenans / Rang (FDP25)	0.91	3.49	24.36	18.08	0.97	36.12	108	122
25 - Doubs À Baume-les-Dames (FDP25)	0.92	3.91	24.47	16.24	0.98	33.55	133	155
25 - Doubs À Bavans / Dampierre-sur-le-Doubs (FDP25)	0.92	3.36	23.59	14.86	0.98	24.67	107	140
25 - Doubs À Châlon / Roche-lez-Beaupré (FDP25)	0.94	3.70	25.37	18.28	1.03	28.29	127	148
25 - Doubs À Doubs (FDP25)	0.92	3.77	21.60	18.38	1.00	30.14	89	107
25 - Doubs À Fournet-Blancheroche (DREAL Bourgogne)	0.54	6.01	15.85	9.86	0.63	78.49	35	46
25 - Doubs À Goumois / Suisse (FDP25)	0.65	5.65	17.82	11.50	0.74	40.65	66	88
25 - Doubs À Grand'Combe-des-Bois / Suisse (FDP25)	0.51	5.87	15.19	9.18	0.62	107.24	15	33
25 - Doubs À Labergement-Sainte-Marie (DREAL Bourgogne)	0.69	3.49	17.20	13.19	0.74	-13.95	22	47
25 - Doubs À Labergement-Sainte-Marie (FDP25)	0.76	3.51	18.16	11.76	0.80	10.25	28	73
25 - Doubs À Labergement-Sainte-Marie (RNT_OFB)	0.67	3.85	16.27	11.46	0.72	-8.05	16	44
25 - Doubs À Laissey / Champive (FDP25)	0.92	3.27	24.50	16.12	1.00	32.75	121	145
25 - Doubs À Mandeuve (RNT_OFB)	0.68	4.25	19.99	8.65	0.72	-9.49	33	75
25 - Doubs À Mathay / Mandeuve (FDP25)	0.79	3.76	21.57	12.67	0.84	16.92	80	111
25 - Doubs À Montancy / Glâre (FDP25)	0.76	4.64	20.69	13.43	0.82	22.19	87	104
25 - Doubs À Montbenoit (FDP25)	0.99	4.06	22.07	17.56	1.09	-3.36	93	116
25 - Doubs À Morteau / Montlebon (FDP25)	0.80	4.55	19.89	14.14	0.86	-8.98	48	87
25 - Doubs À Mouthe (DREAL Bourgogne)	0.01	6.18	6.40	0.15	0.01	267.52	0	0
25 - Doubs À Oye-et-Pallet (FDP25)	0.97	4.08	22.47	18.40	1.08	37.50	112	123
25 - Doubs À Rancenay / Thoraise / Busy / Montfermeil	0.97	3.08	25.01	16.39	1.05	26.02	124	149
25 - Doubs À Rochejean / Longevilles-Mont-d'Or (FDP25)	0.74	3.62	18.39	11.14	0.78	17.27	27	69
25 - Doubs À Sarrageois (FDP25)	0.62	3.85	16.94	10.07	0.63	35.07	17	43
25 - Doubs À Ville-du-Pont (DREAL Bourgogne)	0.84	2.11	17.90	13.93	0.89	3.12	36	67
25 - Drigeon À Rougemont (FDP25)	0.59	5.28	18.82	9.98	0.60	28.56	65	89
25 - Drugeon À Bonnevaux (EPAGE Haut-Doubs Haut-Doubs)	0.72	2.56	16.11	12.68	0.76	35.24	11	37
25 - Drugeon À Bonnevaux (EPAGE Haut-Doubs Haut-Doubs)	0.44	5.06	13.99	8.37	0.47	-9.37	6	11
25 - Drugeon À Bonnevaux (EPAGE Haut-Doubs Haut-Doubs)	0.53	4.61	15.30	9.28	0.55	-23.96	11	24
25 - Drugeon À Bouverans (EPAGE Haut-Doubs Haut-Doubs)	0.82	3.64	19.77	15.75	0.88	-17.46	44	89
25 - Drugeon À Bouverans (EPAGE Haut-Doubs Haut-Doubs)	0.80	3.38	19.93	13.93	0.85	-17.42	37	71
25 - Drugeon À Dommartin (FDP25)	0.87	3.01	19.73	15.55	0.94	-20.67	82	107
25 - Drugeon À Houtaud (EPAGE Haut-Doubs Haute-Doubs)	0.93	2.95	20.67	16.96	1.00	-26.44	69	105
25 - Drugeon À La Rivière (re-Drugeon) (EPAGE Haut-Doubs)	0.83	3.55	19.97	15.37	0.90	-11.80	49	91
25 - Drugeon À La Rivière (re-Drugeon) (EPAGE Haut-Doubs)	0.90	3.44	20.83	16.15	0.96	-19.35	57	95
25 - Drugeon À Rivière-Drugeon (DREAL Bourgogne)	0.86	3.43	19.48	15.03	0.92	-31.03	47	89
25 - Drugeon À Vaux et Chantegrue (EPAGE Haut-Doubs)	0.38	5.59	13.28	6.80	0.40	23.42	2	2
25 - Drugeon À Vuillecin (DREAL Bourgogne)	0.67	4.94	17.34	12.33	0.75	75.36	74	99
25 - Drugeon À Vuillecin (EPAGE Haut-Doubs Haute-Doubs)	0.84	3.20	18.70	14.54	0.91	-23.04	56	97
25 - Feschotte À Badevel (DREAL Bourgogne)	0.12	9.39	12.28	2.38	0.13	85.83	0	0
25 - Feschotte À Dampierre-les-Bois (FDP25)	0.32	8.00	15.50	5.19	0.33	23.93	12	35
25 - Fontaine Ronde À La Cluse-et-Mijoux (FDP25)	0.35	5.48	12.38	5.79	0.37	-4.01	0	0
25 - Gland À Meslières (DREAL Bourgogne)	0.26	5.93	11.80	5.00	0.28	46.47	0	0
25 - Gland À Seloncourt (FDP25)	0.50	6.28	17.91	8.03	0.51	47.57	40	79
25 - Gouterot À Bannans (EPAGE Haut-Doubs Haute-Doubs)	0.44	5.47	13.20	7.78	0.47	-9.47	1	1
25 - Jougnena À Jougne (DREAL Bourgogne)	0.28	5.71	11.44	4.70	0.29	24.99	0	0
25 - Jougnena À Jougne (FDP25)	0.50	2.46	11.64	8.38	0.54	46.28	0	0
25 - Lanterne À Pelousey (FDP25)	0.75	3.25	19.71	12.40	0.80	13.75	110	130
25 - Lison À Eternoz-Saraz (FDP25)	0.35	7.03	15.58	6.08	0.35	23.04	12	28
25 - Lison À Lizine / Châtillon-sur-Lison (FDP25)	0.68	4.63	21.56	12.13	0.70	14.65	66	102
25 - Lison À Nans-sous-Sainte-Anne (FDP25)	0.27	7.68	14.56	4.75	0.27	69.74	8	13
25 - Lizaine À Montbéliard (FDP25)	0.69	4.40	19.16	11.41	0.74	17.72	94	108
25 - Loue À Clâron / Scey-en-Varais (FDP25)	0.44	6.85	17.36	7.56	0.46	62.27	32	70
25 - Loue À Clâron / Scey-Maisières (FDP25)	0.28	7.86	14.64	3.58	0.29	63.72	6	12
25 - Loue À Ouhans (DREAL Bourgogne) (2)	0.13	8.41	11.58	2.67	0.21	254.94	0	0
25 - Loue À Vuillafans (DREAL Bourgogne)	0.22	8.59	14.16	3.91	0.25	106.13	5	8
25 - Lougres À Lougres (FDP25)	0.33	7.50	14.97	5.85	0.35	61.60	8	24
25 - Morte À La Cluse-et-Mijoux (FDP25)	0.53	4.62	14.71	9.07	0.57	-19.57	7	15
25 - Ognon À Avilley / Maussans (FDP25)	0.93	2.69	24.09	17.02	1.00	12.73	132	148
25 - Ognon À Bonnal / Chassey-l'Écluse-s-Montbozon (FDP25)	0.85	3.04	23.24	15.96	0.91	22.72	125	141
25 - Ognon À Emagny / Pin / Beaumotte-l'Écluse-s-Pin (FDP25)	0.95	2.73	24.45	16.92	1.04	0.27	132	159
25 - Ognon À Jallerange / Banne (FDP25)	0.95	2.64	25.98	19.52	1.03	11.43	156	184
25 - Ognon À Moncey / Aulx-l'Écluse-s-Cromary (FDP25)	0.95	2.98	24.68	17.01	1.03	13.77	144	160
25 - Râverotte À Bretonvillers / Plaimbois-du-Miroir	0.49	5.94	17.40	8.51	0.50	4.12	32	55
25 - Râverotte À La Sommette / Plaimbois-Vennes	0.33	7.07	15.30	5.31	0.35	4.46	14	24
25 - Ranceuse À Pont-de-Roide-Vermondans (FDP25)	0.60	4.46	17.24	10.58	0.63	31.73	31	70
25 - Ruisseau des Oyettes À Frasnay (EPAGE Haut-Doubs)	0.81	1.69	15.79	14.18	0.89	-1.81	17	44
25 - Ruisseau de Bâle À Saint-Vit (FDP25)	0.31	7.97	15.20	5.38	0.33	51.62	10	30
25 - Ruisseau de la Censure À Chaffois (EPAGE Haut-Doubs)	0.76	2.66	16.45	13.00	0.83	15.08	17	55
25 - Ruisseau de l'Eugney À Ornans (FDP25)	0.59	4.10	17.05	10.06	0.62	32.85	27	60
25 - Ruisseau de Valbois À Clâron (FDP25)	0.41	5.22	13.92	7.60	0.46	86.83	2	2
25 - Ruisseau de Vaudusotte À Vaudusotte (FDP25)	0.44	5.91	14.99	7.86	0.48	54.39	8	22
25 - Ruisseau des Melliers À Bouverans (EPAGE Haut-Doubs)	0.71	2.62	14.77	12.14	0.78	6.56	7	23
25 - Savoureuse À Nommay (FDP25)	0.75	4.05	20.05	12.98	0.79	44.13	109	119
25 - Savoureuse À Vieux-Charmont (RNT_OFB)	0.76	3.87	19.25	13.43	0.80	26.28	98	127
25 - Soye À Soye (FDP25)	0.31	7.92	14.94	5.15	0.32	54.68	8	23
25 - Thâverot À Grand'Combe-Châtel (FDP25)	0.54	4.96	15.18	10.22	0.59	57.90	10	28
25 - Verneau À Nans-sous-Sainte-Anne (DREAL Bourgogne)	0.19	8.15	11.97	3.32	0.21	80.70	0	0

39 - Brenne Ã La chassagne (FDP39)		0.77	2.91	18.57	10.82	0.82	23.97	117	142
39 - Brenne Ã Saint-Iothain (FDP39)		0.49	5.54	15.17	#DIV/0!	0.52	61.96	10	43
39 - Clauge Ã La vieille-loye (FDP39)		0.72	3.10	19.33	12.44	0.78	11.24	84	115
39 - Clauge Ã Loye (DREAL Bourgogne)		0.69	2.48	17.58	12.64	0.73	18.95	34	83
39 - Cuisance Ã Mesnay (DREAL Bourgogne)		0.20	8.24	13.05	3.65	0.21	47.81	0	0
39 - Cuisance Ã Mesnay (FDP39)		0.21	8.23	13.13	4.01	0.22	56.03	0	0
39 - Cuisance Ã Vaudrey (DREAL Bourgogne)		0.74	3.50	20.69	13.73	0.79	47.46	110	125
39 - Doubs Ã Gevry (RNT_OFB)		0.87	3.30	24.02	16.46	0.94	10.74	107	156
39 - Furieuse Ã Pont-d'hery (FDP39)		0.15	7.98	10.90	2.21	0.17	86.27	0	0
39 - Furieuse Ã Salins-les-Bains (DREAL Bourgogne)		0.51	5.34	16.90	9.27	0.53	35.41	23	47
39 - Furieuse Ã Salins-les-bains (FDP39)		0.51	5.33	17.03	10.04	0.54	40.85	22	51
39 - Larine Ã Montigny-les-arsures (FDP39)		0.50	6.06	18.24	9.93	0.53	50.57	68	90
39 - Larine Ã Villers-farlay (FDP39)		0.60	4.55	19.55	10.83	0.63	31.72	82	100
39 - Leue Ã Montbarrey (FDP39)		0.60	6.35	21.11	10.92	0.64	42.11	84	135
39 - Loue Ã Chamblay (FDP39) (1)		0.66	4.82	22.08	12.21	0.70	0.19	72	102
39 - Loue Ã Chamblay (FDP39) (2)		0.73	4.18	22.51	13.37	0.76	11.05	72	111
39 - Loue Ã La loye (FDP39) (1)		0.64	5.08	21.67	11.94	0.68	9.67	67	102
39 - Loue Ã La loye (FDP39) (2)		0.48	7.00	20.06	9.70	0.55	89.25	57	83
39 - Loue Ã Montbarrey (FDP39) (1)		0.63	5.43	21.57	11.64	0.66	20.12	72	101
39 - Loue Ã Montbarrey (FDP39) (2)		0.70	4.62	22.45	16.62	0.74	-2.25	75	112
39 - Loue Ã Nevy-les-dole (FDP39)		0.66	4.97	21.74	12.17	0.70	11.48	72	106
39 - Loue Ã Ounans (FDP39) (1)		0.66	4.82	21.99	12.00	0.69	-7.84	71	100
39 - Loue Ã Ounans (FDP39) (2)		0.73	4.07	21.64	13.71	0.78	28.29	99	128
39 - Loue Ã Souvans (FDP39)		0.22	9.83	15.88	3.79	0.28	231.01	22	45
39 - Morte de Beauvoisin Ã Asnans-beauvoisin (FDP39)		0.68	5.06	22.40	11.78	0.71	10.36	70	121
39 - Orain Ã Brainans (FDP39)		0.62	4.84	18.43	7.95	0.65	15.63	34	102
39 - Orain Ã Poligny (FDP39) (1)		0.09	10.55	13.42	1.76	0.13	272.69	1	1
39 - Orain Ã Poligny (FDP39) (2)		0.47	6.72	18.71	8.54	0.52	63.52	58	88
39 - Ruisseau de Clairvans Ã Saint-cyr-montmalin (FDP39)		0.65	4.28	19.44	9.07	0.70	24.01	103	126
39 - Ruisseau de Clairvans Ã Vadans (FDP39)		0.54	4.31	16.64	9.68	0.58	11.15	36	71
39 - Saron Ã Chamblay (FDP39)		0.64	3.06	17.66	8.62	0.68	11.61	69	84
39 - Saron Ã Saint-cyr-montmalin (FDP39)		0.42	5.47	14.69	7.36	0.45	15.51	8	16
39 - Saron Ã Villeneuve-d'aval (FDP39)		0.62	3.50	17.92	8.51	0.66	27.16	70	85
39 - Tanche Ã La vieille-loye (FDP39)		0.67	3.00	18.15	11.49	0.72	18.50	75	89
39 - ValliÃ re Ã Courlans (FDP39)		0.58	6.13	19.32	7.20	0.62	26.96	39	137

52 - Gravier Ã Laneuville (FDP52)		0.65	2.86	15.47	9.59	0.68	48.74	9	30
52 - Gueuse Ã Melay (FDP52)		0.42	6.46	15.98	7.97	0.44	24.08	18	52
52 - Maljoie Ã ChÃ zeaux (FDP52)		0.57	4.42	15.54	11.93	0.61	37.36	15	33
52 - Mance Ã Rosoy-sur-Amance (FDP52)		0.76	2.66	16.80	10.41	0.78	15.57	15	67
52 - Petite Amance Ã Vicq (FDP52)		0.71	3.05	17.09	13.18	0.76	23.76	31	66
52 - Poge Ã Celles-en-Bassigny (FDP52) (1)		0.67	2.91	17.71	13.37	0.70	-3.89	42	86
52 - Rau de Leuchey Ã Baissey (FDP52)		0.39	7.23	15.30	5.89	0.41	47.69	9	37
52 - Salon Ã Coublanc (FDP52)		0.69	3.85	18.75	12.84	0.73	24.43	79	96
52 - Salon Ã Les Loges (FDP52)		0.68	3.47	17.50	12.15	0.71	27.54	36	73
52 - Val-de-Presles Ã Hortes (FDP52)		0.67	2.85	17.36	11.42	0.71	10.98	29	78
52 - Val-de-Presles Ã Marcilly-en-Bassigny (FDP52)		0.65	3.12	17.48	11.16	0.68	20.42	51	73
52 - Vingeanne Ã Villegusien-le-Lac (FDP52)		0.65	3.69	17.71	13.37	0.65	2.51	42	93

70 - Batard Æ Villeparois (DREAL Bourgogne)	0.74	3.08	20.00	14.63	0.79	29.34	62	103
70 - Breuchin Æ Proiseliere-et-Langle (DREAL Bourgogne)	0.63	3.24	16.25	11.80	0.68	38.49	27	46
70 - Colombine Æ Frotey-les-Vesoul (DREAL Bourgogne)	0.30	7.81	14.45	5.75	0.33	30.74	4	7
70 - Durgeon Æ Colombier (DREAL Bourgogne)	0.77	2.48	19.24	14.46	0.81	28.96	52	99
70 - Furieuse Æ Saint-Broing (DREAL Bourgogne)	0.60	5.22	18.49	11.52	0.64	34.30	74	103
70 - La Gourgeonne Æ Tincey-et-pontrebeau (FDP70)	0.67	4.34	20.20	11.28	0.71	14.89	96	119
70 - La Lanterne Æ Fleurey-les-faverney (FDP70)	0.96	2.43	24.48	18.44	1.01	19.03	133	138
70 - La Lizaine Æ Chagey (FDP70)	0.83	2.15	19.85	13.76	0.89	-1.56	85	111
70 - La Morthe Æ Velesmes-echevanne (FDP70)	0.77	3.71	21.90	12.82	0.80	5.58	100	141
70 - La Romaine Æ Le pont-de-planches (FDP70)	0.56	5.79	19.39	9.22	0.58	27.03	80	102
70 - La Saône Æ Apremont (FDP70)	1.03	1.88	26.28	17.03	1.15	21.77	169	169
70 - La Semouse Æ Conflans-sur-lanterne (FDP70)	0.82	2.57	21.20	13.83	0.86	21.37	92	118
70 - La Superbe Æ Amance (FDP70)	0.80	3.46	21.36	14.75	0.83	-3.36	85	117
70 - Le Breuchin Æ Breuches (FDP70)	0.81	3.14	21.05	12.50	0.86	37.33	99	127
70 - Le Durgeon Æ Pontcey (FDP70)	0.74	4.16	22.10	12.68	0.78	21.01	126	142
70 - Le Rahin Æ Ronchamp (FDP70)	0.67	3.74	17.66	11.44	0.73	34.64	75	92
70 - Le Salon Æ Autet (FDP70)	0.71	4.12	20.72	10.73	0.76	3.17	129	139
70 - Le Scey Æ Villersexel (FDP70)	0.82	2.44	21.26	15.84	0.86	11.53	88	114
70 - Lizaine Æ Hericourt (DREAL Bourgogne)	0.82	3.57	20.77	15.51	0.87	11.67	102	124
70 - L'Ognon Æ Beaumotte-aubertans (FDP70)	0.93	2.73	24.49	17.89	0.99	10.59	134	138
70 - L'Ognon Æ Broye-aubigny-montseugny (FDP70)	0.95	2.78	25.24	17.33	1.02	4.38	161	169
70 - Loue Æ Montbarrey (DREAL Bourgogne)	0.71	4.76	22.35	12.59	0.74	28.56	88	120
70 - L'Ougeotte Æ Gevigney-et-mercey (FDP70)	0.82	2.67	22.05	16.85	0.86	-1.44	129	147
70 - Rahin Æ Plancher-Bas (DREAL Bourgogne)	0.55	3.60	15.35	10.43	0.62	81.44	14	20
70 - Romaine Æ Maizieres (DREAL Bourgogne)	0.11	8.76	11.86	1.78	0.15	60.36	0	0
70 - Salon Æ Delain (DREAL Bourgogne)	0.60	5.26	18.67	12.14	0.65	32.90	69	105
70 - Saone Æ Cendrecourt (RNT_OFB)	1.12	1.29	22.89	16.84	1.20	5.32	169	188
70 - Scey Æ Beveuge (DREAL Bourgogne)	0.66	4.14	17.20	11.55	0.70	47.39	54	90
70 - Semouse Æ Saint-Loup-sur-Semouse (DREAL Bourgogne)	0.70	3.17	18.33	13.38	0.73	23.17	46	83
71 - Gravière de Fleurville Æ Fleurville (FDP71)	0.78	2.34	21.36	14.75	0.82	1.03	85	117
71 - Guye Æ Sigy-le-Chatel (RNT_OFB)	0.82	2.68	19.53	11.94	0.86	2.85	112	140
71 - Seille Æ Saint-Usuge (RNT_OFB)	0.88	2.70	21.10	13.58	0.94	-0.77	170	174
71 - Valliere Æ Savigny-en-Revermont (RNT_OFB)	0.74	4.01	19.69	11.07	0.78	5.03	110	163
90 - Saint Nicolas Æ Fousse-magne (DREAL Bourgogne)	0.80	2.90	19.39	15.70	0.83	10.48	59	107

Signatures hydrologiques

Station	LbStationH	RC	Q90	CI	BFI	BFmag
U4624010	L'Azergues Ã ChÃctillon	0.31	0.06	0.38	0.47	0.94
U4625010	Le Soanan Ã Saint-VÃ©rand [La Tracole]	0.26	0.01	0.31	0.38	0.98
U3004010	Le canal du Centre Ã Essertenne	0.34	0.24	0.32	0.66	0.64
U2334010	L'Allan Ã Fesches-le-ChÃctel	0.45	0.16	0.34	0.48	0.90
U2345020	La Savoureuse Ã Giromagny	0.67	0.17	0.27	0.37	0.93
U2345040	La Savoureuse Ã Vieux-Charmont	0.53	0.33	0.34	0.46	0.83
U2345420	Le RhÃ©me Ã Lachapelle-sous-Chaux [Lachapelle Bis]	0.55	0.07	0.32	0.39	0.95
U2345830	La Rosemontoise Ã Rougegoutte	0.48	0.10	0.23	0.38	0.95
U2354010	L'Allan Ã Courcelles-l'Ã©s-MontbÃ©liard	0.50	0.23	0.35	0.46	0.84
U2356610	Le Rupt Ã Dung	0.36	0.12	0.28	0.39	0.83
U2402010	Le Doubs Ã Voujeaucourt	0.49	0.28	0.40	0.45	0.78
U2425070	Le Sesserant Ã Pont-les-Moulins [Chatel]	0.10	0.03	0.29	0.24	0.84
U2425250	Le Cusancin Ã Cusance	0.64	0.26	0.45	0.37	0.77
U2425260	Le Cusancin Ã Baume-les-Dames	0.35	0.18	0.41	0.43	0.83
U2502010	Le Doubs Ã Esnans [Beaumerousse]	0.46	0.29	0.42	0.45	0.73
U2615830	Le Lison Ã Myon	0.55	0.13	0.55	0.28	0.93
U2624010	La Loue Ã Chenecey-Buillon	0.97	0.72	0.45	0.45	0.71
U1035410	Le Scey Ã Beveuge	0.36	0.13	0.38	0.44	0.90
U1044010	L'Ognon Ã Chassey-l'Ã©s-Montbozon [Bonnal]	0.46	0.19	0.40	0.48	0.84
U2305210	La Bourbeuse Ã Rougemont-le-ChÃteau	0.92	0.07	0.32	0.34	0.98
U2305240	La Bourbeuse Ã Foussemagne	0.56	0.03	0.27	0.30	0.99
U2324210	La Bourbeuse Ã Froidefontaine	0.48	0.09	0.27	0.33	0.90
U2334020	L'Allan Ã Joncherey	0.39	0.20	0.30	0.53	0.76
U2122010	Le Doubs Ã Goumois	0.46	0.39	0.48	0.42	0.71
U2604030	La Loue Ã Vuillafans	1.46	1.45	0.45	0.49	0.63
U2225410	Le Gland Ã MesliÃ©res	0.60	0.22	0.37	0.38	0.83

U2330600	La Feschotte Ã Badevel	0.58	0.31	0.37	0.45	0.77
U2215020	Le Dessoubre Ã Saint-Hippolyte	0.47	0.17	0.38	0.30	0.76
U2022020	Le Doubs Ã Doubs	0.35	0.27	0.41	0.44	0.64
U3434340	Le Solnan Ã Domsure	0.50	0.11	0.35	0.30	0.92
U3445020	Le Sevron Ã BÃny	0.39	0.06	0.28	0.28	0.94
U3445030	Le Sevron Ã Varennes-Saint-Sauveur	0.39	0.07	0.30	0.24	0.89
U3446410	La Gizia Ã Frontenaud	0.44	0.18	0.29	0.36	0.82
U4305410	Le Denante Ã DavayÃ	0.28	0.07	0.39	0.51	0.92
U1054010	L'Ognon Ã Beaumotte-Aubertans	0.46	0.18	0.42	0.50	0.87
U2222010	Le Doubs Ã Mathay	0.49	0.32	0.47	0.40	0.74
U4525210	Le Morgon Ã Villefranche-sur-SaÃne	0.21	0.10	0.37	0.62	0.77
U3225010	La Guye Ã Sigy-le-ChÃtel [Corcelles]	0.25	0.03	0.26	0.47	0.97
U2215015	Le Dessoubre Ã Rosureux	0.40	0.14	0.38	0.25	0.80
U2350530	La Lizaine Ã HÃricourt	0.45	0.11	0.37	0.35	0.92
U4505010	L'ArdiÃre Ã Beaujeu	0.41	0.15	0.44	0.55	0.89
U1074020	L'Ognon Ã Pin	0.44	0.20	0.42	0.50	0.86
U0504010	Le Durgeon Ã Colombier	0.36	0.03	0.26	0.26	0.96
U0635010	La Gourgeonne Ã Tincey-et-Pontrebeau	0.42	0.14	0.38	0.56	0.88
U0104010	Le Coney Ã Xertigny	0.61	0.64	0.37	0.68	0.67
U0124010	Le Coney Ã Fontenoy-le-ChÃteau	0.52	0.33	0.39	0.58	0.80
U0444310	La SÃmouse Ã Saint-Loup-sur-Semouse	0.56	0.38	0.39	0.53	0.78
U1014020	L'Ognon Ã Montessaux	0.63	0.17	0.38	0.48	0.89
U0415010	Le Breuchin Ã la ProiseliÃre-et-Langle	0.68	0.26	0.43	0.53	0.91
U0415030	Le Breuchin Ã Breuches [Champs Coquards]	0.60	0.27	0.40	0.56	0.91
U1004010	L'Ognon Ã Servance [Fourguenons]	0.73	0.23	0.30	0.42	0.90
U0515010	Le BÃtard Ã Villeparois	0.35	0.04	0.26	0.31	0.94
U2142010	Le Doubs Ã GlÃre [Courclavon]	0.46	0.38	0.44	0.46	0.72
U2565020	La Clauge Ã la Loye	0.28	0.03	0.31	0.25	0.96
U1025010	Le Rahin Ã Plancher-Bas	0.73	0.14	0.29	0.35	0.93
U1314010	L'Ouche Ã la BussiÃre-sur-Ouche	0.30	0.10	0.37	0.49	0.89

U2542010	Le Doubs Ã Rochefort-sur-Nenon	0.47	0.28	0.41	0.50	0.80
U1109010	La Venelle Ã Selongey	0.34	0.07	0.35	0.53	0.94
U0924010	La Vingeanne Ã Saint-Maurice-sur-Vingeanne	0.37	0.13	0.38	0.53	0.90
U1204010	La Tille Ã CrÃ©cy-sur-Tille	0.41	0.08	0.34	0.56	0.95
U0620530	La Romaine Ã MaiziÃ¨res	1.00	0.48	0.30	0.51	0.81
U0924020	La Vingeanne Ã Oisilly	0.35	0.14	0.40	0.57	0.89
U1115020	La BÃ¢ze Ã BÃ¢ze [Ferme de Rome]	4.43	3.19	0.61	0.78	0.70
U1115210	Le Pannecul Ã Noiron-sur-BÃ¢ze [Rente de l'Ile]	0.31	0.14	0.29	0.62	0.81
U1215030	L'Ignon Ã Villecomte	0.37	0.03	0.34	0.48	0.97
U1084010	L'Ognon Ã Pesmes	0.42	0.19	0.43	0.46	0.86
U1324010	L'Ouche Ã PlombiÃ¨res-lÃ¨s-Dijon	0.34	0.11	0.39	0.51	0.89
U1415410	La Sansfond Ã Saulon-la-Rue	0.21	0.27	0.42	0.87	0.46
U2512010	Le Doubs Ã BesanÃ§on	0.49	0.30	0.41	0.47	0.73
U2540520	L'Arne Ã Lavans-lÃ¨s-Dole	0.35	0.08	0.30	0.43	0.90
U1415030	La Vouge Ã Saint-Nicolas-lÃ¨s-CÃ¢teaux [Abbaye-de-CÃ¢teaux]	0.35	0.06	0.35	0.49	0.92
U1416010	La Varaude Ã Izeure [Tarsul]	0.20	0.11	0.33	0.65	0.76
U1416410	La BiÃ¨tre Ã Brazey-en-Plaine	0.36	0.29	0.38	0.71	0.56
U4234020	La Veyle Ã Biziat [gourt des parties]	0.29	0.19	0.34	0.56	0.75
U2012010	Le Doubs Ã Labergement-Sainte-Marie	0.49	0.24	0.38	0.33	0.81
U2012030	Le Doubs Ã Saint-Point-Lac	4.57	19.71	0.75	1.00	0.01
U2015030	Le Bief Rouge Ã Longevilles-Mont-d'Or	0.56	0.17	0.38	0.39	0.85
U2035040	Le Drugeon Ã Bonnevaux	0.55	0.10	0.31	0.25	0.93
U2022010	Le Doubs Ã la Cluse-et-Mijoux [Pontarlier amont]	0.41	0.34	0.39	0.46	0.73
U3415020	La Brenne Ã SelliÃ¨res [les forges Baudin]	0.45	0.13	0.26	0.30	0.87
U2634010	La Loue Ã Champagne-sur-Loue	0.90	0.61	0.45	0.42	0.70
U2635010	La Furieuse Ã Salins-les-Bains	0.73	0.31	0.37	0.36	0.84
U2655030	La Cuisance Ã Mesnay	0.99	0.47	0.46	0.37	0.81
U3404030	La Seille Ã Voiteur [aval]	0.35	0.09	0.35	0.34	0.87
U3455010	La ValliÃ¨re Ã Lons-le-Saunier	0.40	0.20	0.32	0.36	0.85
U3455030	La ValliÃ¨re Ã Savigny-en-Revermont	0.47	0.24	0.29	0.37	0.78
U4300011	La SaÃªne Ã SancÃ© [Macon, ultra-sons]	0.44	0.20	0.61	0.57	0.86



Centre Center Lyon-Grenoble - Auvergne-Rhône-Alpes

5 rue de la Doua, 69000 Villeurbanne

Rejoignez-nous sur :



<https://www.inrae.fr/centres/lyon-grenoble-auvergne-rhone-alpes>

