



LA GESTION DE L'EAU, NOUVEL ENJEU OU NOUVELLE LIMITE PLANETAIRE POUR LES METROPOLES, LE CAS DE CLERMONT AUVERGNE METROPOLE

A. DIEMER, S. ACKACHOUD, L. CAMPIGLIA,

O. IBRAHIMI, D.D NGUYEN

Revue Francophone du Développement Durable

2022 – n°22 – Octobre

Pages 56 - 96.

ISSN 2269-1464

Article disponible en ligne à l'adresse :

<https://erasme.uca.fr/version-francaise/publications/revue-francophone-du-developpement-durable>

Pour citer cet article

Diemer A., Ackachoud S., Campaglia L., Ibrahim O., Nguyen D.D (2022), La gestion de l'eau, nouvel enjeu ou nouvelle limite planétaire pour les métropoles, le cas de Clermont Auvergne Métropole, *Revue Francophone du Développement Durable*, n°22, Octobre p. 56 - 96.

La gestion de l'eau, nouvel enjeu ou nouvelle limite planétaire pour les métropoles, le cas de Clermont Auvergne Métropole¹

DIEMER A., ACKACHOUD S., CAMPIGLIA L., IBRAHIMI O.,
NGUYEN D.D

Université Clermont Auvergne (UCA), Ecole d'économie, Faculté de Mathématiques
CERDI (CNRS – IRD), ERASME

Résumé : En l'espace de quelques années, l'eau frappe aux portes des ressources rares, au point d'amener certains à proposer le statut de ressource commune qu'il conviendrait de préserver. Nos habitudes de consommation dans un contexte d'abondance se heurtent aux effets du réchauffement climatique et au mécanisme de l'évapotranspiration. Les stocks des nappes et les réservoirs d'eau potable ne garantissent plus les populations d'un accès régulier à l'eau potable. Les métropoles, qui concentrent une bonne partie de la population, vont donc devoir mettre en place un plan de sauvegarde de la ressource eau, et actionner différents leviers (éco-gestes, tarification progressive, entretien et réparation du réseau d'assainissement...). A ce titre, la modélisation en dynamique des systèmes se présente comme un outil de prospective, susceptible de simuler différents scénarios à l'horizon 2030 et 2050. Les modèles simplifient quelque peu la réalité mais ils deviennent de plus en plus utiles à la décision publique.

Mots clés : Diagramme des boucles causales, Eau, Modèle, Simulation, Stocks,

L'eau est un élément naturel indispensable au développement de la vie et des activités humaines (principalement agricoles et industrielles), mais il s'agit également d'une ressource limitée, fortement impactée par le réchauffement climatique et les besoins d'une population en forte croissance. L'eau potable, autrement dit, celle destinée aux citoyens, est à la fois une donnée quantitative (les villes se sont généralement constituées des stocks d'eau potable – château d'eau - correspondant à 2 ou 3 jours de consommation) et qualitative (les tests sont nécessaires pour garantir une qualité de l'eau, face aux pollutions générées par les nitrates, l'arsenic ou d'autres substances chimiques). Au regard du Code Général des Collectivités Territoriales (CGCT), l'eau et l'assainissement constituent des compétences majeures des Etablissements Public à Caractère Intercommunal (EPCI) à fiscalité propre qui interviennent soit dans le cadre de leur propre périmètre, soit en s'associant à d'autres partenaires (des communes ou des EPCI) au sein de syndicats mixtes. Les articles L 5217-2, L5215-20 et L 5216.5 du CGCT précisent que l'eau et l'assainissement sont une compétence obligatoire des métropoles et des communautés urbaines, et une

¹ Cet article s'inscrit dans un projet « Toile Eau », financé par le pôle de l'eau de l'Université Clermont Auvergne (UCA) via le programme CAP 20-25. Il a fait l'objet de nombreuses discussions (1 an) au sein du groupe de travail. Les auteurs remercient les deux rapporteurs externes qui ont permis d'enrichir les différentes versions initiales. Contrairement aux autres articles de ce numéro, l'article a bénéficié d'une réactualisation, suite aux travaux réalisés durant l'école d'été « Dynamique des Systèmes ».

compétence optionnelle des communautés d'agglomération. Dans le cas des communautés de communes (article L 5214-16), ces dernières peuvent choisir à titre optionnel d'exercer « tout ou partie de l'assainissement ». Généralement, les communes arrêtent un schéma de distribution d'eau potable en déterminant les zones desservies par le réseau de distribution. Elles peuvent ainsi assurer la production d'eau potable ainsi que son transport et son stockage. Si les communes et les communautés de communes figurent au-devant de la scène, la responsabilité de la gestion de l'eau est souvent partagée entre plusieurs intervenants : l'Europe, les pouvoirs publics, les collectivités et les élus, les syndicats mixtes, les acteurs socio-économiques.

La Directive Cadre Européenne (DCE) sur l'eau (2000/60/CE)² adoptée le 23 octobre 2000 par le Parlement européen et le Conseil européen a établi des règles pour mettre fin à la détérioration de l'état des masses d'eau de l'Union européenne (UE) et parvenir au bon état des rivières, lacs et eaux souterraines en Europe (Barraqué, 1995). Il s'agit notamment protéger toutes les formes d'eau (de surface³, souterraines⁴, intérieures⁵ et de transition⁶), de restaurer les écosystèmes à l'intérieur et autour de ces masses d'eau, de réduire la pollution dans les masses d'eau et de garantir une utilisation durable de l'eau par les particuliers et les entreprises (Grujard, 2003). La DCE a introduit la notion de « bon état »⁷ des eaux (Feuillette, 2004) et imposé aux Etats l'atteinte d'un bon état de leurs masses d'eau à l'horizon 2027. En France, en 2015, 62% des masses d'eau cours d'eau étaient considérés en bon état chimique, 44,8% des masses d'eau cours d'eau étaient présentées en bon état écologique et 69,1% des masses d'eau souterraine étaient considérées en bon état chimique. En 2021, la France s'était fixée d'atteindre les résultats suivants : (i) 66% des masses d'eau superficielles (lacs, rivières) en bon état écologique et 72% en bon état chimique, (ii) 98% des masses d'eau souterraines en bon état quantitatif et 73% en bon état chimique.

Les agences de l'eau⁸ sont des établissements publics du ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, dont les missions consistent à (1) restaurer les cours d'eau, leur fonctionnement naturel et la biodiversité, (2) gérer et partager les ressources en eau, (3) garantir le bon état des eaux en réduisant les pollutions de toutes origines et par temps de pluie, (4) agir pour préserver et restaurer la qualité et les habitats naturels des eaux littorales. En France, les ressources en eau font l'objet d'une gestion intégrée par bassin hydrographique (Barraqué, 2007 ; Evrard, 2006)). Les bassins hydrographiques sont délimités par les lignes de partage des eaux superficielles. 12

² <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=celex%3A32000L0060>

³ Toutes les eaux intérieures sauf les eaux souterraines, les eaux de transition ou les eaux côtières.

⁴ Toutes les eaux se trouvant sous la surface du sol.

⁵ Toutes les eaux stagnantes et les eaux courantes à la surface du sol.

⁶ Toute les eaux à proximité des embouchures de rivières, qui sont partiellement salines, mais qui sont fondamentalement influencées par des courants d'eau douce.

⁷ Une eau en bon état est en qualité et en quantité suffisante pour assurer un fonctionnement durable des écosystèmes naturels et satisfaire les usages humains. Une rivière sans traces de substances toxiques, s'écoulant naturellement et accueillant une biodiversité riche et variée est considérée en bon état. Une nappe non polluée, où l'eau est en quantité suffisante est considérée en bon état

⁸ www.lesagencesdeleau.fr

bassins ont été délimités : 7 bassins métropolitains : Adour-Garonne, Artois-Picardie, Corse, Loire-Bretagne, Rhin-Meuse, Rhône Méditerranée, Seine-Normandie ; 5 bassins en Outre-mer : Guadeloupe, Guyane, Martinique, Réunion et Mayotte. Les missions des agences de l'eau sont d'aider les collectivités, les industriels, les agriculteurs, les associations de pêche et de protection de la nature dans le financement, l'accompagnement et la valorisation de leurs projets et initiatives pour agir sur la santé, le cadre de vie, la préservation de la ressource en eau et la biodiversité (Narcy, 2003). Selon Barraqué et Laigneau (2017), les agences de l'eau pourraient être ainsi associées à des institutions de gestion « en biens communs » (Ostrom, 2010).

Les comités de bassin, souvent appelés « parlements locaux de l'eau » (Rui, 2006), sont des instances délibératives qui rassemblent toutes les parties prenantes (collectivités locales, industriels, agriculteurs, Etat, consommateurs, ONG...) dans chacun des sept bassins métropolitains (Brun, 2009, Barreteau & al., 2008). Ces comités fixent la stratégie de l'eau et des milieux aquatiques du bassin (Allain, 2012). Ils votent le programme de l'agence de l'eau dans chaque bassin hydrographique le taux des redevances dans la limite des plafonds fixés par la loi (Laigneau & al., 2018). Depuis quelques années, l'eau est devenue un marqueur du dérèglement climatique, l'eau ressource commune mais rare, pourrait bien impacter les modalités du dialogue à venir entre les parties prenantes (Launay, 2023).

Les schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) ont été institués par la loi de 1992⁹, puis renforcés par la directive cadre sur l'eau (2000). C'est un outil de planification des grands bassins hydrographiques français (Ghiotti, 2010). Renouvelé tous les 6 ans et approuvé par le préfet (coordonnateur du bassin¹¹), il fixe les objectifs de bon état de l'eau des milieux aquatiques dans les bassins et identifie les orientations qui doivent permettre d'atteindre ces objectifs (Allain, 2001).

Les commissions locales de l'eau (CLE) élaborent et assurent le suivi des schémas d'aménagement et de gestion de l'eau (SAGE) qui sont une déclinaison du SDAGE à une échelle plus locale. Le SAGE vise à concilier la satisfaction et le développement des différents usages (eau potable, industrie, agriculture...) et la protection des milieux aquatiques, en tenant compte des spécificités territoriales. C'est un instrument essentiel de la mise en œuvre de la directive cadre sur l'eau (DCE). Il comprend (i) un *plan d'aménagement et de gestion durable* (PAGD) qui fixe les objectifs, orientations et dispositions du SAGE, et (ii) un *règlement* accompagné de documents cartographiques (règles à appliquer). Entre 1992 et 2024, 165 SAGE ont été approuvés, ils couvrent 55%

⁹<https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000173995#:~:text=L'eau%20fait%20partie%20du,que%20des%20droits%20antérieurement%20établis>. L'article 1 rappelait que « l'eau fait partie du patrimoine commun de la nation. Sa protection, sa mise en valeur et le développement de la ressource utilisable, dans le respect des équilibres naturels, sont d'intérêt général. L'usage de l'eau appartient à tous dans le cadre des lois et règlements ainsi que des droits antérieurement établis ».

¹⁰ Articles L. 212-1 à L. 212-2-3 et R. 212-1 à R. 212-25 du code de l'environnement

¹¹ <https://outil2amenagement.cerema.fr/outils/schema-directeur-damenagement-et-gestion-des-eaux-sdage>

du territoire français¹² (métropole et outre-mer). Les CLE sont de véritables noyaux décisionnels lors de l'élaboration du SAGE, ils présidés par un élu local et composés de trois collèges : les collectivités territoriales, les usagers (agriculteurs, industriels, propriétaires fonciers, associations...), l'Etat et ses établissements publics. Les CLE peuvent d'appuyer sur l'expertise des services de l'Etat (DREAL, DDT/M), des agences de l'eau et de l'Office français de la Biodiversité (OFB) pour un appui technique, méthodologique et financier.

L'office français de la Biodiversité (OFB) est une émanation de l'Agence Française pour la Biodiversité¹³ (créée en 2017 par la loi de reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages et établissement public du ministère de la Transition écologique et solidaire) et de l'Office National de la Chasse et de la Faune sauvage (ONFS). Elle a été créée le 1^{er} janvier 2020 par la loi n°2019-773 du 24 juillet 2019¹⁴. L'OFB est au cœur de l'action pour la préservation du vivant dans les milieux aquatiques, terrestres et marins. Il joue un rôle essentiel pour lutter contre l'érosion de la biodiversité face aux pressions comme la destruction et la fragmentation des milieux naturels, les diverses pollutions, la surexploitation des ressources naturelles, l'introduction d'espèces exotiques envahissantes ou encore les conséquences des dérèglements climatiques.

Cet article entend s'appuyer sur cette structure de responsabilité de la gestion de l'eau, partagée entre plusieurs intervenants, afin de cerner les enjeux territoriaux pour l'EPCI Clermont Auvergne Métropole. Dans un contexte où l'eau devient à la fois une ressource rare, un bien commun (qu'il convient de préserver) qui s'inscrit dans les limites planétaires (Rockström, 2009), il apparaît nécessaire de procéder à une analyse systémique des principaux défis à relever. Dans un premier temps, nous présenterons le territoire Clermont Auvergne Métropole (analyse SWOT : forces, faiblesses, contraintes, opportunités) en insistant sur les différentes ressources et usages de l'eau. Le cadre conceptuel des limites planétaires sera mobilisé. Dans un deuxième temps, nous utiliserons la dynamique des systèmes (méthodologie) afin d'identifier les différentes boucles causales susceptibles de rendre compte de la ressource eau. Dans un troisième temps, nous chercherons à modéliser le système eau (diagramme stocks flux) afin d'appréhender différents scénarios en termes de besoins en eau pour 2030 et 2050.

¹² <https://www.gesteau.fr/presentation/sage>

¹³ Elle exerce des missions d'appui à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de la connaissance, la préservation, la gestion et la restauration de la biodiversité des milieux terrestres, aquatiques et marins. Elle vient en appui aux acteurs publics mais travaille également en partenariat étroit avec les acteurs socio-économiques. Elle a aussi vocation à aller à la rencontre du public pour mobiliser les citoyens en faveur de la biodiversité.

¹⁴ <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000038821234>

Analyse systémique¹⁵ de l'eau de Clermont Auvergne Métropole

Clermont Auvergne Métropole est l'une des 12 métropoles françaises, c'est un territoire qui concentre de nombreux atouts et qui est situé entre la Chaîne des Puys et la rivière Allier. Clermont Auvergne Métropole regroupe 21 communes, pour une superficie de 300 km², et accueille près de 300 000 habitants, avec une augmentation annuelle de la population de 0,7% en moyenne. Un Auvergnat sur quatre y réside, et un habitant de la métropole sur deux habite à Clermont-Ferrand.

Depuis quelques années, Clermont Auvergne Métropole – comme beaucoup de métropoles – doit relever le défi de la gestion de l'eau. Tout d'abord, les ressources en eau sont limitées : la métropole dispose de deux sources principales : les réserves souterraines de la Chaîne des Puys, et la rivière Allier avec sa nappe alluviale. La demande de la population, de l'agriculture et de l'industrie ne cessent d'augmenter chaque année. La hausse de la population ainsi que l'élévation de son niveau de vie, se traduisent par une augmentation de la consommation d'eau potable. Ensuite, au-delà de l'aspect quantitatif, la qualité de l'eau potable distribuée constitue également un enjeu très important. Limiter la pollution, protéger l'environnement et la biodiversité sont des défis importants liés à l'eau. Enfin, le dérèglement climatique entraîne l'aggravation des périodes de sécheresse et d'inondations, et accentue la raréfaction de l'eau. C'est un élément majeur à prendre en compte pour les projections sur le futur, alors que les sécheresses causent des problèmes d'eau depuis longtemps déjà. Tous ces éléments font de l'eau un enjeu majeur et sont des catalyseurs de croissance du secteur de l'eau sur le long terme.

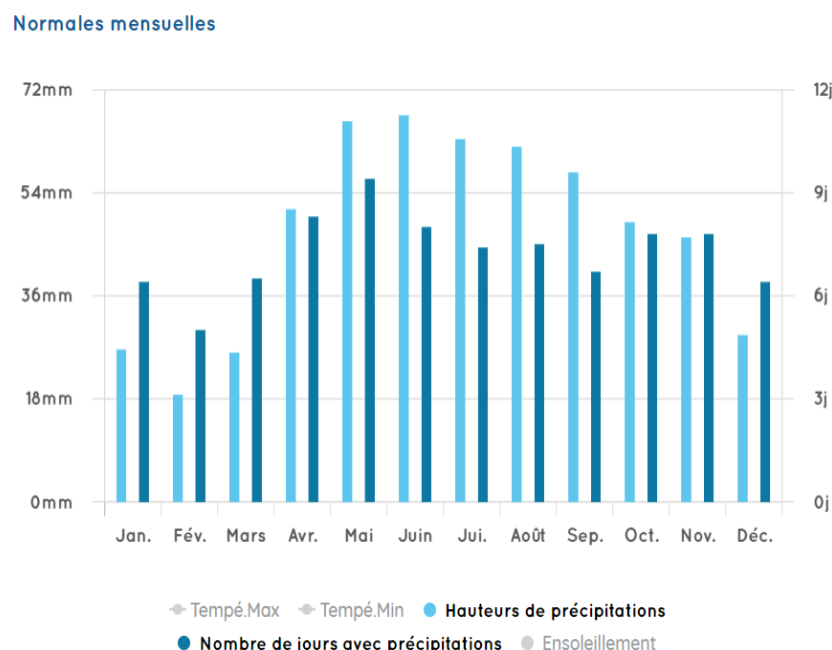
Les ressources en eau

La pluie

La première donnée à prendre en compte est la pluviométrie, puisqu'il s'agit de la principale source d'alimentation en eau du territoire. Sur Clermont Auvergne Métropole, il pleut en moyenne 87.2 jours par an pour un total de 563,4 mm/m². Nous avons calculé que cela correspond à un total de près de 170 000 000 m³ par an sur l'ensemble des communes de la métropole. Cette donnée représente seulement les précipitations sur Clermont Auvergne Métropole, mais l'eau qui tombe au-delà a aussi un impact direct sur le modèle en raison des rivières et des nappes souterraines qui s'étendent sur un grand territoire. De plus, la géographie et la présence de la chaîne des Puys fait que le territoire de Clermont Auvergne Métropole est l'un de ceux où il pleut le moins dans la région.

¹⁵ Par analyse systémique, nous entendons ici l'analyse d'un système au sens de J.W Forrester (1968), c'est-à-dire un ensemble d'éléments mis en interactions et répondant à un objectif (résolution d'un problème qu'il convient de définir au préalable).

Figure 1 : Nombre de jours de précipitation moyen et hauteurs de précipitation moyennes par mois



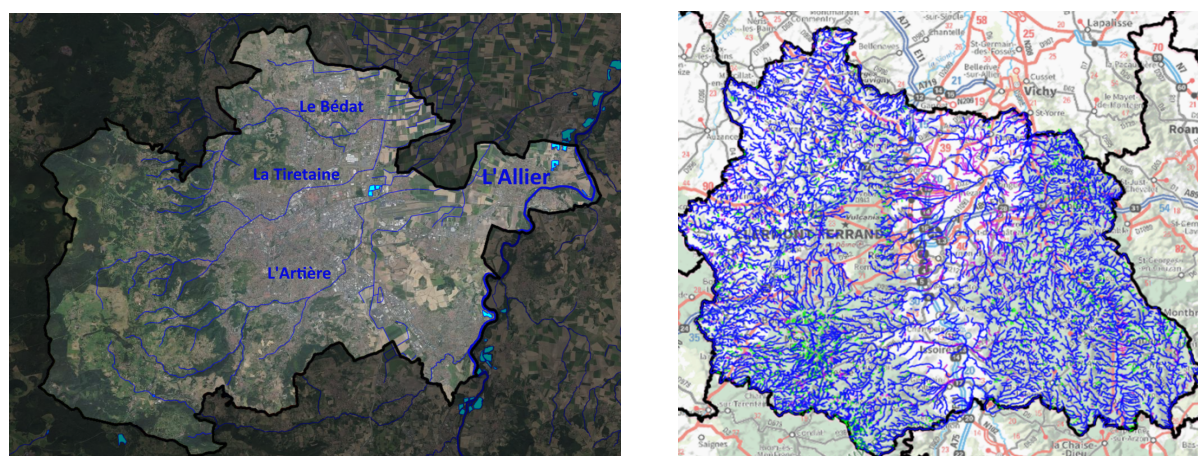
Source : Météo France

En moyenne, on estime que 64% de l'eau de pluie s'évapore, 15% alimente les cours d'eau et environ 21% s'infiltre dans les nappes souterraines selon le type de roche, ce qui représenterait environ 35 000 000 de mètres cubes par an d'infiltration sur le territoire de Clermont Auvergne Métropole. Mais les nappes souterraines sont très grandes et ce chiffre ne correspond donc pas à la totalité de l'eau remplissant les nappes du territoire chaque année.

Les cours d'eau

Il y a quatre cours d'eau principaux sur le territoire de Clermont Auvergne Métropole.

Figure 2 : Les cours d'eau sur le territoire de la CAM et du Puy de Dôme



Source : <https://carto2.geo-ide.din.developpement-durable.gouv.fr/frontoffice/?map=c343b55b-e650-45ed-acb2-bb42bf4a3eaa>

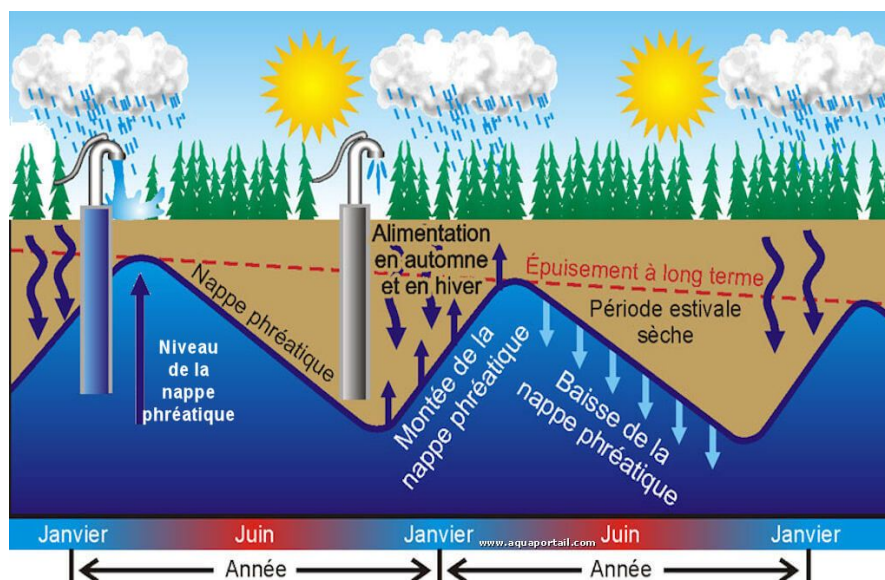
L'Allier est de loin le plus important, il passe par les communes de Cournon d'Auvergne et de Pont du Château. C'est un des principaux affluents de la Loire et il est long de plus de 400 km au total. Dans le Puy de Dôme, les berges de l'Allier sont protégées pour sauvegarder leur biodiversité. Les trois autres rivières passent notamment par la commune de Clermont - Ferrand, ce sont toutes des affluents de l'Allier : le Bédet, la Tiretaine et l'Artière.

Les nappes

La métropole se situe entre deux nappes souterraines distinctes, à l'Est la nappe alluviale de l'Allier et à l'Ouest la nappe souterraine des volcans. Les nappes sont des parties du sol complètement saturées en eau, permettant à l'eau de s'y écouler. Elles peuvent être exploitées pour, après traitement, alimenter les réseaux d'eau potable. Elles sont généralement principalement remplies par l'infiltration des eaux de pluie, et leur niveau baisse donc pendant l'été avant de se restaurer en hiver.

Située sous la rivière sur une surface de 500 km² entre Brioude et le Bec d'Allier, la nappe alluviale de l'Allier est alimentée non seulement par la pluie, mais aussi par l'Allier puisque l'eau s'infiltre facilement en raison d'un sol principalement composé de sable et de gravier. Un barrage en amont permet de garantir un bon débit de l'Allier tout au long de l'année, le niveau de la nappe alluviale de l'Allier a donc tendance à moins baisser pendant les épisodes de sécheresse. L'eau qu'on y prélève est de bonne qualité.

Figure 3 : Le cycle d'une nappe phréatique, dans le cas d'un épuisement à long terme.



Source : <https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/7594/nappe-phreatique>

A l'Ouest de la métropole, les nappes de la Chaîne des Puys sont un ensemble de petites nappes. La géologie particulière liée au volcanisme a permis de créer ces nappes dont la quantité et la qualité de l'eau en font une réserve très importante pour toute la région. L'eau jaillit sous forme de sources à plusieurs endroits autour de la chaîne des puys. Depuis quelques années, le niveau des nappes de la Chaîne des Puys a tendance

à baisser et il est désormais très bas à certains endroits. Les prélèvements importants ainsi que le changement climatique font partie des principales raisons qui expliquent la baisse du niveau de l'eau dans ces nappes.

Les usages de l'eau

On peut séparer l'usage de l'eau en 3 catégories : l'agriculture et l'industrie qui utilisent principalement de l'eau non potable prélevée dans les rivières ou les nappes, et l'usage domestique qui utilise de l'eau potable qui provient des nappes souterraines et est traitée avant d'être distribuée.

La consommation d'eau de l'industrie

L'industrie est une catégorie qui prélève beaucoup d'eau, bien que ce soit généralement de l'eau non potable et qu'elle soit souvent réutilisée. Sur la métropole et à proximité, les principaux consommateurs sont Michelin, Constellium, Limagrain, Candia, Elis, Société Laitière des Volcans d'Auvergne, Cristal Union... La Société des Eaux de Volvic et les thermes de Royat consomment aussi beaucoup d'eau, provenant des sources des Puys.

Constellium est basé à Issoire mais nous le prenons tout de même en compte puisque les prélèvements se font dans la nappe de l'Allier et sont particulièrement importants avec plus de 1 400 000 mètres cubes à l'année selon nos calculs basés sur les données BNPE de 2019. Les deux usines de Michelin à Clermont-Ferrand et Cébazat ont elles consommé un total de 28 000 mètres cubes en 2019. Pour l'usine Elis d'Aubière, c'est près de 25 000 mètres cubes d'eau en 2019, pour Cristal Union 137 000 et pour la Société Laitière des Volcans d'Auvergne 228 000. Les thermes de Royat ont utilisé 144 000 mètres cubes sur cette même année, et la Société des Eaux de Volvic plus de 2 430 000 de mètres cubes. A l'échelle du département du Puy de Dôme, le volume d'eau prélevé par l'industrie et autres activités économiques (hors irrigation et hors énergie) représente environ 11% du total des prélèvements d'eau selon les derniers chiffres, il a baissé entre 2009 et 2019, passant de 9,7 à 8,6 millions de mètres cubes.

Volvic commercialise plus d'un milliard de litres d'eau par an, l'eau provient de l'extérieur du territoire de la métropole, mais l'impact touche tous les environs. Par le passé, l'entreprise a été accusée de sur-prélèvement pendant des périodes de sécheresse et de restrictions pour les autres usagers. Elle est aussi critiquée pour être en partie responsable de la baisse progressive du niveau des nappes souterraines des volcans en raison de ses prélèvements jugés excessifs. Aujourd'hui, tous les puits situés sur cette nappe montrent un niveau en baisse et classé de modérément bas à très bas. Cette baisse du niveau de la nappe a des conséquences importantes sur tous les environs et l'eau se fait plus rare sur tous les cours d'eau en aval de Volvic. Néanmoins, Danone, propriétaire de la Société des Eaux de Volvic, assure avoir limité ses prélèvements et mené des actions de protection de l'impluvium, la zone qui recueille l'eau de pluie. De plus, si pour produire 1 litre d'eau en 2014 il fallait prélever près de 2 litres en raison des opérations de nettoyage, aujourd'hui il ne faut plus qu'un 1,3

litre. En décembre 2021, Danone a annoncé un accord avec les autorités pour diminuer les prélèvements annuels d'eau de la Société des Eaux de Volvic de 10 %, puis de 20 % à partir de 2025, ce qui est tout de même jugé très insuffisant par les opposants à la Société des Eaux de Volvic et son propriétaire Danone. Cet engagement a été signé dans la cadre du PURE (Plan d'Utilisation Rationnelle de l'Eau), un dispositif créé dans le Puy de Dôme pour inciter les industries les plus gourmandes en eau à investir pour réduire durablement leur consommation. Ce dispositif créé en 2020 fonctionne bien et pourrait être très prochainement repris par d'autres départements. Michelin, Constellium, Limagrain, Candia, la Société Laitière des Volcans d'Auvergne et Elis font toutes parties des entreprises qui ont pris des engagements et mené des investissements pour réduire leur consommation d'eau depuis le lancement du projet PURE.

L'eau prélevée par l'agriculture

L'agriculture consomme beaucoup d'eau, notamment pour l'irrigation des cultures. Sur la métropole, on comptait 144 exploitations agricoles en 2020, un chiffre en baisse de 19% en 10 ans selon le recensement Agreste. La proportion de surface agricole de la métropole est réduite par l'étalement urbain, et la production des exploitations sur le territoire de la métropole ne correspond pas du tout aux quantités requises pour nourrir sa population. La principale activité agricole, aussi bien en nombre d'exploitations et en surface totale, est la production céréalière qui représente près de 40% des surfaces agricoles de la métropole. Les céréales sont aussi celles qui nécessitent généralement la plus grande quantité d'eau. On a aussi d'autres grandes cultures, du maraîchage, de l'arboriculture et de la viticulture, ainsi que l'élevage de bovins, de moutons et de chèvres. Il est difficile de calculer la quantité d'eau nécessaire pour l'agriculture car celle-ci dépend de nombreux paramètres : type de culture, variété, objectif, type de sol, météo... De plus, les différentes cultures n'ont pas seulement besoin d'une quantité d'eau totale à l'année, mais de recevoir une partie de cette eau à certains moments précis de leur développement, ce qui rend la nécessité d'arrosage variable d'une année à l'autre selon la météo. Les céréales, qui sont les cultures principales sur Clermont Auvergne Métropole et les plus demandeuses d'eau, ont en moyenne besoin de 5600 mètres cubes d'eau par hectare par an. Puisque la surface de production de céréales dans la métropole est de 3 138 hectares, on peut estimer que la quantité d'eau requise par ces cultures est de plus de 17 500 000 mètres cubes par an. Mais, la plupart de cette eau provient directement de la pluie, et la proportion d'irrigation est très variable selon les critères cités plus haut. Dans les données BNPE, nous avons trouvé un total de 6 755 000 mètres cubes d'eau prélevés en 2019 et 4 784 000 en 2020 destinés à un usage d'irrigation. Cette eau provient principalement de l'Allier, mais aussi de la station d'épuration de Clermont-Ferrand. En effet, la station d'épuration de Clermont-Ferrand qui traite la plupart des eaux usées de la métropole avant de pouvoir les rejeter dans un affluent de l'Allier, réserve depuis 1996 une part importante des eaux traitées pour qu'elles soient utilisées par les

agriculteurs plutôt que rejetées dans la rivière. De plus, les 25 000 tonnes de boues d'épuration produites, qui sont issues des processus de dégradation biologique lors de l'épuration, sont valorisées en agriculture, par épandage direct ou après compostage ; et le méthane produit permet de chauffer un grand nombre de bâtiments à Aulnat. Le chiffre de 4 784 000 mètres cubes par an nous donne un ordre de grandeur de la quantité d'eau prélevée pour l'irrigation. Cependant, l'eau utilisée par certaines petites exploitations ne sont pas recensées dans ces données puisqu'il n'y a aucun prélèvement pour l'irrigation à l'Est de la métropole, où il y a pourtant quelques exploitations. A l'inverse, il est possible qu'une partie de l'eau prélevée dans l'Allier sur le territoire de la métropole, soit utilisée dans des communes voisines de la métropole.

L'agriculture fait fréquemment face au manque d'eau durant l'été, notamment en raison des restrictions mises en place lors des périodes de sécheresse. Afin de limiter leur consommation d'eau, les agriculteurs peuvent utiliser des outils technologiques pour calculer au mieux la quantité d'eau précise dont la plante a besoin, privilégier les cultures et variétés les mieux adaptées au climat local et utiliser des systèmes économes en eau comme la micro-irrigation. Il est aussi possible d'augmenter la capacité de stockage de l'eau pendant l'hiver afin d'anticiper les périodes de sécheresse, à travers des retenues d'eau sur des rivières existantes ou la création d'étangs.

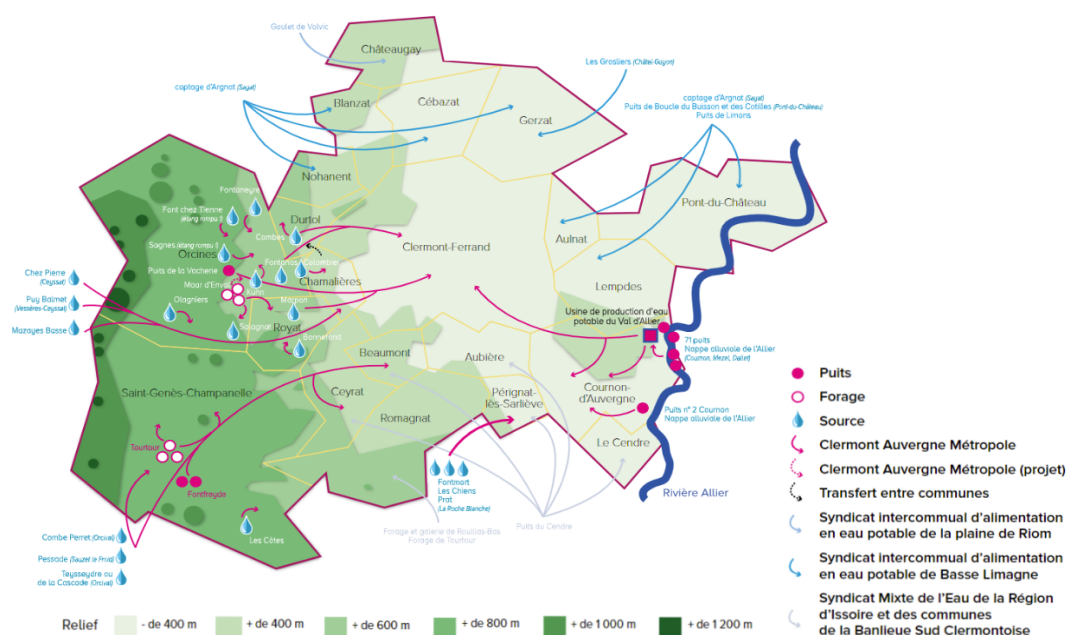
Si les nappes et autres réserves d'eau du territoire contiennent de l'eau de bonne qualité, la pollution liée à l'usage intensif de certains engrais et produits chimiques peut détériorer la qualité de l'eau.

L'eau potable des habitants de la CAM

La troisième catégorie d'usage de l'eau est la consommation de la population, il s'agit donc d'eau potable. Sur Clermont Auvergne Métropole, la consommation d'eau potable est de près de 13 000 000 de mètres cubes par an, toute l'eau potable distribuée provient de ressources souterraines. Selon les secteurs, cette eau provient soit de captages dans la nappe alluviale de l'Allier (pour l'Ouest de la métropole), soit des sources, forages ou puits des nappes de la Chaîne des Puys (pour l'Est de la métropole).

Les captages dans la nappe alluviale de l'Allier se font sur les communes de Cournon d'Auvergne et Pont-du-Château, et l'eau des nappes de la Chaîne des Puys provient principalement des communes d'Orcines, Saint-Genès-Champanelle ou Royat. L'eau captée dans la nappe alluviale de l'Allier est traitée dans l'usine de production du Val d'Allier qui a été mise en service en 2016. Cette usine à la pointe de la technologie produit 8 millions de mètres cubes d'eau chaque année et permet un contrôle qualité tout au long du circuit. En plus de Cournon d'Auvergne et Aubière, elle fournit en eau potable plus des deux tiers de la ville de Clermont - Ferrand et une grande partie des autres communes situées à l'Est de la métropole.

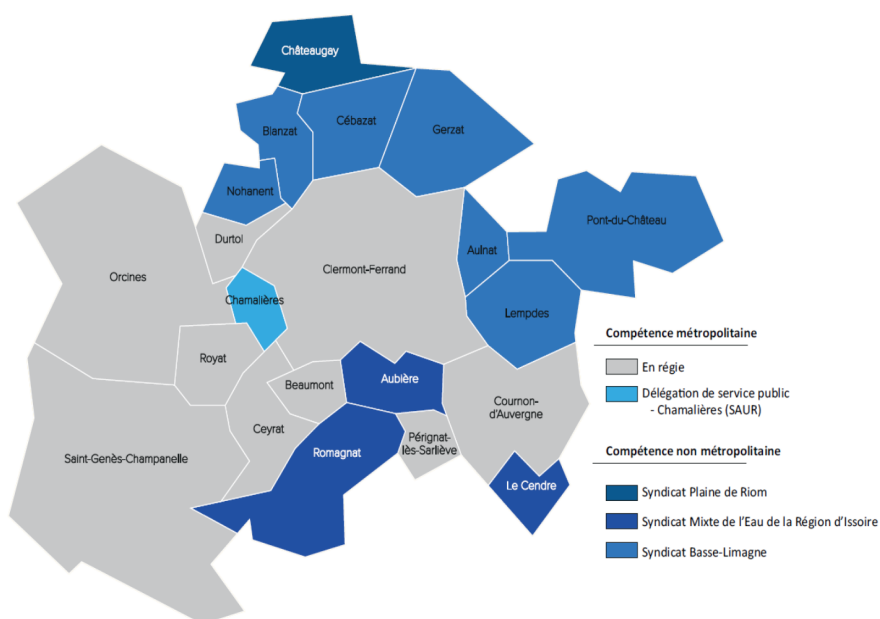
Figure 4 : Les origines de l'eau potable consommée sur la CAM



Source : <https://www.clermontmetropole.eu/preserver-recycler/cycle-de-leau/informations-generales/eau-potable/dou-vient-leau-de-la-metropole/>

La distribution de l'eau potable, ainsi que la collecte et le traitement des eaux usées, sont répartis selon les communes entre la régie autonome d'eau potable de Clermont Auvergne Métropole et les syndicats mixtes des régions d'Issoire, de Riom et de Basse-Limagne. Sur la commune de Chamalières, les compétences de la distribution de l'eau potable de la métropole sont déléguées à l'entreprise SAUR.

Figure 5 : Répartition de la distribution de l'eau entre la régie autonome d'eau potable de la métropole et les différents syndicats d'alimentation en eau



Source : <https://ville-lempdes.fr/cycle-de-leau/>

La distribution de l'eau potable est soumise à de nombreux critères de qualité, qui visent principalement à la protection de la santé des consommateurs. Le laboratoire de contrôle des eaux de Clermont Auvergne Métropole réalise de nombreuses analyses sur l'eau potable ainsi que de l'eau usée, en complément du programme officiel réalisé par l'Agence Régionale de Santé. Les tests concernant à la fois la composition de l'eau et l'état des installations matérielles. Comme dans 98% des communes de France, l'eau de toutes les communes de la métropole est jugée conforme à la réglementation.

La consommation moyenne d'eau potable en France est estimée entre 100 et 150 litres par personne et par jour (53,76 m³ d'eau par an pour un habitant du Puy de Dôme)¹⁶. Ces chiffres varient toutefois selon de très nombreux paramètres, entre autres :

* Les revenus : un ménage modeste a une consommation moyenne d'eau inférieure à celle d'un ménage ayant un niveau de revenu plus élevé.

* L'âge : En général la consommation moyenne d'eau d'un adulte est supérieure à celle d'un enfant ou même d'une personne âgée.

* La zone géographique : les conditions climatiques d'une région influencent la consommation d'eau d'une personne. Plus le climat est chaud, plus la consommation

Le tableau ci-dessous présente une estimation de la consommation d'eau par usage :

Tableau 1 : Répartition moyenne de la consommation d'eau d'un particulier

Usage	Répartition
Boisson	1%
Cuisine et alimentation	6%
Voiture et jardin	6%
Vaisselle	10%
Linge	12%
Sanitaires	20%
Bains / douches	39%
Divers	6%

Source : <https://eau.selectra.info/consommation#:~:text=En%20moyenne%2C%20la%20consommation%20d,par%20jour%20et%20par%20enfant>

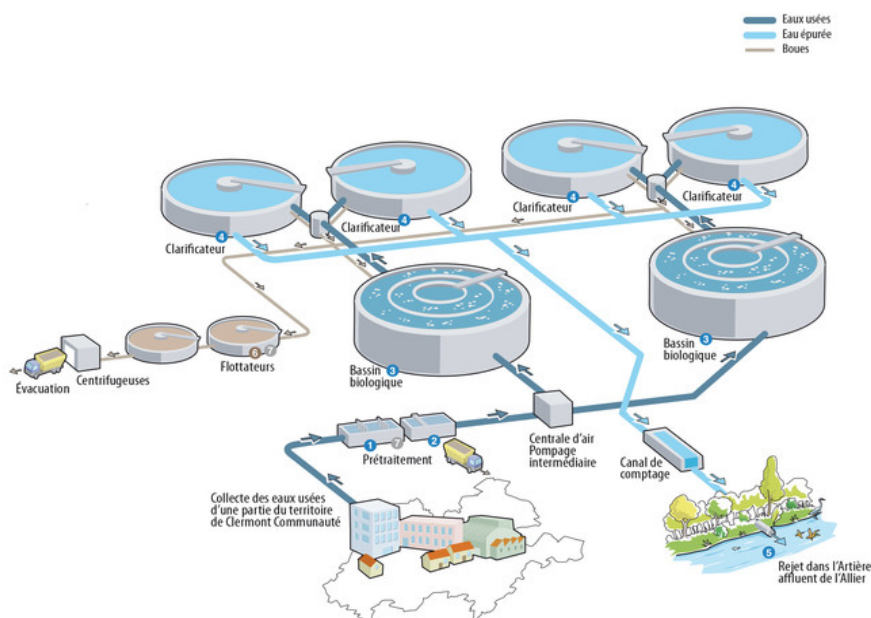
Pour réduire leur consommation d'eau, il existe de nombreux gestes que peuvent adopter les particuliers. Clermont Auvergne Métropole travaille pour sensibiliser ses habitants sur ce sujet. Parmi les gestes simples qui permettent d'économiser de l'eau au quotidien, on peut citer : privilégier les douches de moins de 5 minutes, ne pas laisser le robinet couler quand ce n'est pas nécessaire, utiliser un bac pour faire la vaisselle, récupérer l'eau de pluie pour arroser ses plantes quand c'est possible,

¹⁶ <https://eau.selectra.info/consommation#:~:text=En%20moyenne%2C%20la%20consommation%20d,par%20jour%20et%20par%20enfant>

équiper ses robinets d'éco-mousseurs qui permettent de réduire la consommation sans perdre en confort, remplir complètement le lave-linge avant de le faire tourner, installer un économiseur d'eau sur le pommeau de douche, limiter la consommation de certains produits qui ont une empreinte-eau très élevée (par exemple, 1 kg de blé, c'est plus de 1300 litres d'eau, 1 kg de bœuf, 15 497 litres d'eau, un T-shirt en coton 4100 litres ou une feuille de papier A4 : 10 litres d'eau)... Il est aussi important de vérifier régulièrement l'état de ses tuyauteries, robinets et de sa chasse d'eau, car les fuites entraînent des surconsommations très importantes. La métropole investit également pour lutter contre les fuites sur son réseau dont le rendement est de 82%, ce qui correspond à 18% de fuites entre la production de l'eau potable et son arrivée chez le consommateur. A l'échelle nationale en 2019, le taux de fuite était de près de 20%, selon une étude de la Fédération des entreprises de l'eau.

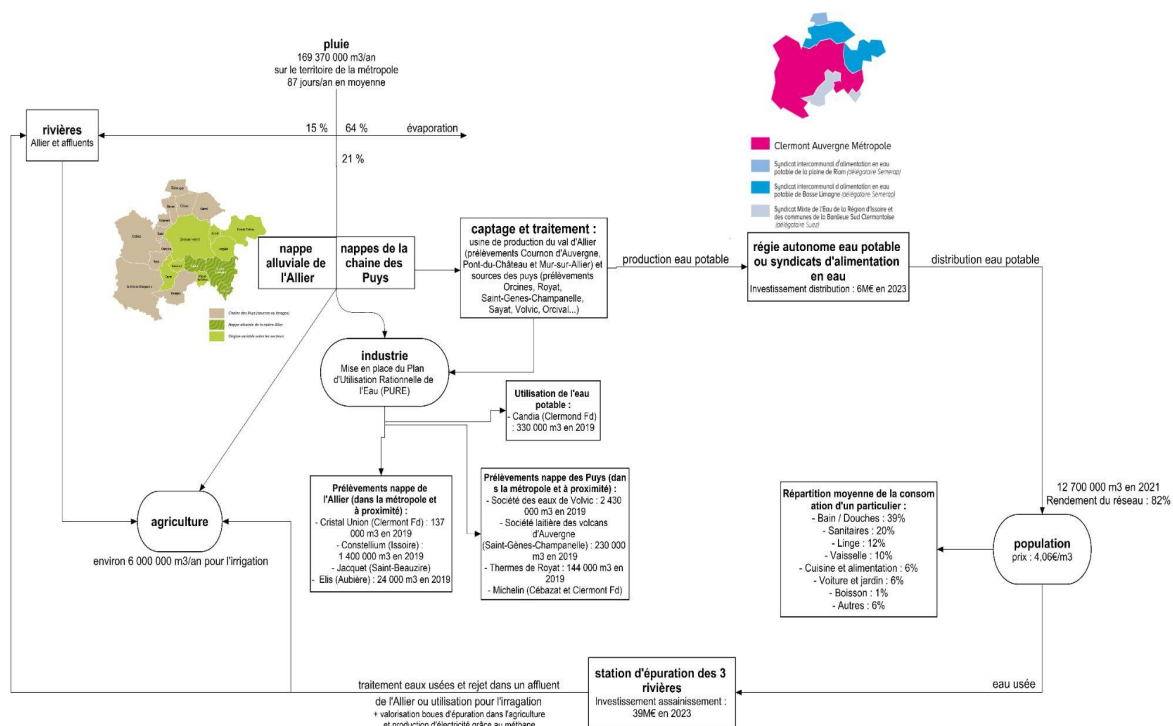
Clermont Auvergne Métropole assure la compétence assainissement collectif et non collectif, c'est-à-dire le traitement des eaux usées de tous les particuliers. Pour l'assainissement collectif, il est principalement assuré par la Station des Trois Rivières, située à l'Est de la commune de Clermont - Ferrand, ainsi que par 8 autres petites stations d'épuration. Après le traitement, l'eau qui répond aux normes européennes est rejetée dans la rivière Artière, affluent de l'Allier, ou directement utilisée pour l'irrigation ; quant à la boue, elle est utilisée comme engrais pour l'agriculture. Pour l'assainissement non collectif, il existe des installations individuelles. L'objectif du traitement des eaux usées est de rejeter une eau propre pour protéger la santé de l'être humain et de l'environnement.

Figure 6 : Fonctionnement de la station d'épuration des 3 rivières



Source :

https://www.clermontmetropole.eu/fileadmin/user_upload/preserver_recycler/traitement_de_leau/ARS_2021/Depliant_cycle_eau_web_.pdf

Figure 7 : Analyse systémique¹⁷ de l'eau sur le territoire Clermont Auvergne Métropole

Source : Les auteurs

Analyse SWOT du territoire Clermont Auvergne Métropole

Les éléments identifiés par l'Analyse SWOT (forces, faiblesses, opportunités, menaces) peuvent être présentés de la manière suivante. La présence de deux grandes nappes distinctes ainsi que de la rivière Allier sont des forces pour le territoire. La qualité de l'eau est globalement bonne dans les nappes de la région. Concernant la distribution de l'eau potable, elle est assurée en régie dans la majorité des communes de la région, ce qui assure à la métropole une maîtrise en tous points de la distribution et de l'assainissement, contrairement à la délégation de service public. La métropole dispose également de plusieurs bassins de stockage stratégique (d'autres sont en construction), qui permettent d'avoir plusieurs journées de stockage. Les différents types de sécheresse impactent la quantité d'eau s'infiltrant dans les nappes et donc le niveau de celles-ci. Concernant le réseau d'eau potable, son taux de rendement est de 82%, ce qui signifie que 18% de l'eau potable produite est perdue dans des fuites et n'arrive pas chez le consommateur. Le taux de rendement de Clermont Auvergne Métropole est tout de même supérieur à la moyenne nationale.

La menace des conséquences du réchauffement climatique devrait accentuer les sécheresses qui font baisser le niveau des nappes, alors que ceux-ci sont déjà bas aujourd'hui. Dans le même temps, la population et ses besoins, notamment en termes d'agriculture, augmentent.

¹⁷ Une carte plus importante est proposée en annexe.

Parmi les opportunités qui pourraient permettre de limiter la consommation de l'eau pour faire face à ces menaces : la station d'épuration des 3 rivières qui traite une grande partie des eaux usées de la métropole, en plus de produire de l'énergie avec le méthane rejeté et de valoriser les boues d'épuration dans l'agriculture, permet la réutilisation d'une part de l'eau traitée pour l'irrigation. Le choix des types de production agricole peut permettre de réduire la quantité d'eau nécessaire. Pour l'industrie, les plus gros consommateurs d'eau de la région se sont engagés à réduire progressivement leur consommation avec le Plan d'Utilisation Rationnelle de l'Eau. La population pourrait également réduire une part de sa consommation d'eau en adoptant un certain nombre d'éco-gestes, ou avec la mise en place de nouveaux dispositifs récupérant l'eau de la douche pour la réutiliser pour le jardin ou les toilettes, qui n'ont pas forcément besoin d'eau potable.

Tableau 2 : Matrice SWOT de Clermont-Auvergne Métropole

Forces <ul style="list-style-type: none"> ● Deux nappes ● L'Allier et ses affluents ● Une bonne qualité de l'eau ● Distribution en régie pour la plupart des communes ● Stocks stratégiques d'eau potable 	Faiblesses <ul style="list-style-type: none"> ● Sécheresses météorologique ● Sécheresse des sols ● Fuites dans le réseau (taux de rendement supérieur à la moyenne nationale)
Opportunités <ul style="list-style-type: none"> ● Récupération des eaux usées traitées pour l'irrigation ● Recyclage de l'eau domestique pour toilettes/jardin ● Sensibilisation aux éco-gestes ● Plan d'Utilisation Rationnelle de l'Eau (industrie) ● Choix des types de production agricole 	Menaces <ul style="list-style-type: none"> ● Réchauffement climatique ● Niveau des nappes bas ● Augmentation de la populations et des besoins

Méthodologie

Pour la projection à long terme des ressources en eau sur ce territoire, chacun des trois secteurs présentés (agriculture, industrie, population) devra réduire sa consommation d'eau, afin de s'inscrire dans une gestion durable et responsable de la ressource eau. Dans ce qui suit, nous avons choisi de nous focaliser sur la consommation en eau potable de la population. Toutefois, la gestion partagée de la ressource introduisant des conflits d'usage que nous ne pouvions mettre de côté, nous avons pris en compte les défis liés à l'eau prélevée par l'agriculture et l'industrie.

Du point de vue méthodologique, nous avons mobilisé la dynamique des systèmes (Forrester, 1961, 1968, 1969) et plus précisément les diagrammes de boucles causales (Richardson, 1986)), permettant d'appréhender les interactions et les dynamiques du secteur de l'eau. Un diagramme de boucles causales se compose de quatre éléments de base (Lannon, 2012) : les variables (les nœuds), les liens entre elles, les signes sur les liens (positifs ou négatifs, ils montrent comment les variables sont interconnectées) et le signe de la boucle (c'est le produit des liens successifs entre les variables de la dite boucle, le signe indique le type de comportement que le système produira). En représentant un problème ou une question sous l'angle de la causalité, il est possible de visualiser les forces structurelles qui sont à l'origine d'un comportement). Les diagrammes de boucles causales sont généralement illustrées par des deux types de boucles de rétroaction (Haraldsson, 2004) : les boucles de renforcement (notées R pour Reinforcing) et les boucles de régulation ou d'équilibrage (notées B pour Balancing). Dans une boucle de rétroaction de renforcement (R), un changement dans une variable (nœud) fait le tour de la boucle pour provoquer un changement dans la même direction, le système peut ainsi croître ou décroître. Dans une boucle de rétroaction de régulation (B), le changement se fait dans la direction opposée, ce qui amène la boucle à équilibrer son comportement en cherchant à atteindre un objectif donné.

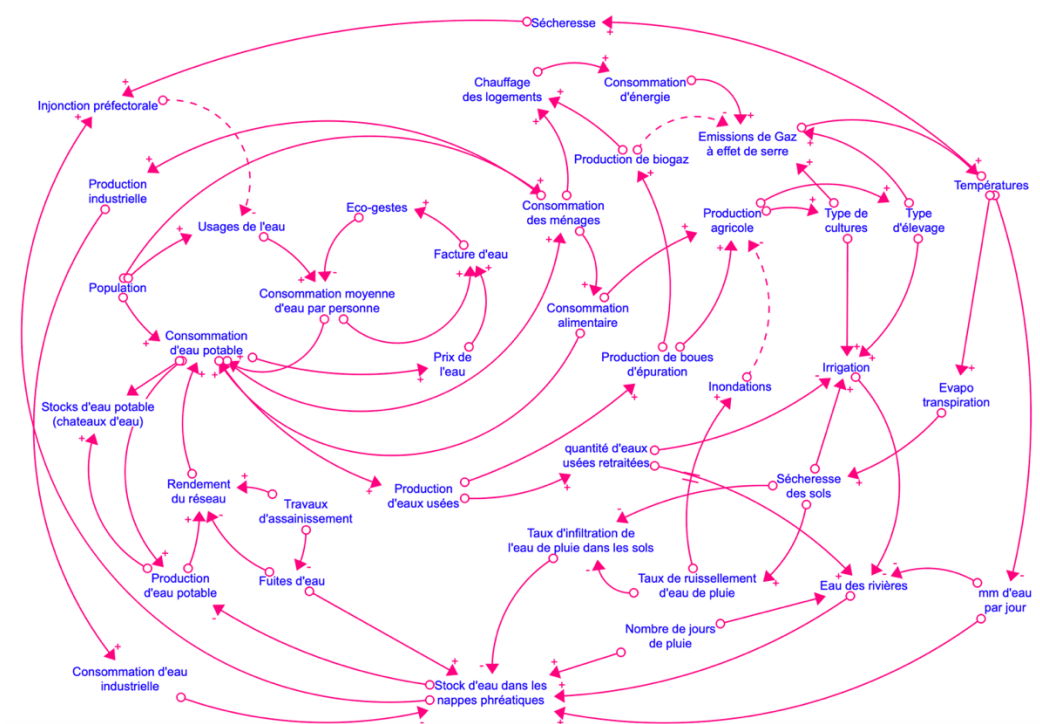
Un diagramme de boucles causales (CLD) est utile pour analyser un système complexe, il permet (i) de fournir un cadre structuré pour identifier rapidement les variables clés du système (les fameux key drivers) ; (ii) d'offrir une clarté visuelle pour analyser collectivement (avec les parties prenantes) les variables et les liens d'un modèle (le CLD doit être associé à un Bull-Eye qui va mettre au centre, dans un premier cercle concentrique, les variables clés, puis dans un deuxième cercle, les variables endogènes explicatives, puis dans un troisième cercle, les variables exogènes et enfin dans un dernier cercle, les variables qui ne seront pas prises en compte) ; (iii) d'identifier correctement les boucles de renforcement et d'équilibrage du système (c'est la découverte des différentes dynamiques du système qui constituera un excellent outil d'aide à la décision, Bridgeland, Zahavi, 2009) ; (iv) de décrire ce que l'on observe (les variables et les liens entre elles), de cerner les leviers susceptibles de changer le système observé et de construire le système que l'on souhaiterait voir (il est donc nécessaire de visualiser deux CLD, le CLD observé et le CLD modifié)¹⁸ ; (v) de promouvoir la pensée systémique (system thinking) qui requiert une approche plus holistique, interdisciplinaire (les réponses à des problématiques issues de systèmes complexes requièrent une mobilisation de compétences diverses) et circulaire (c'est le passage d'une pensée linéaire à une pensée non linéaire – dans laquelle des schémas de dynamique sociale peuvent s'écarter de la norme, créant des écarts de perceptions).

¹⁸ « CLDs describe the reality through causalities between variables and how they form a dynamic circular influence. We want to observe the world through feedbacks rather than linearly. We want to observe repeated patterns that may be used to predict the behaviour in the problem. It's about understanding cause and effect » (Haraldsson, 2004, p. 21)

Le diagramme des boucles causales de la CAM

Afin de pouvoir identifier les points leviers qui pourraient nous permettre de répondre à notre problématique, nous avons créé un diagramme des boucles causales (CLD) permettant de cartographier sous Stella, les variables qui agissent, directement ou indirectement, sur la consommation d'eau potable du territoire, ainsi que sur le niveau des nappes.

Figure 8 : CLD du cycle de l'eau



Source : Les auteurs

Le consommation d'eau potable est, avec la consommation d'eau industrielle et l'irrigation agricole, l'un des 3 secteurs qui réduisent le niveau des nappes phréatiques. Le nombre de jours de pluie, la quantité d'eau tombée par jour (mm) et le taux d'infiltration de l'eau dans le sol alimentent les rivières et les nappes phréatiques. Peu de pluie pendant une période prolongée et des températures importantes peuvent entraîner une sécheresse des sols, une baisse du taux d'infiltration de l'eau, une augmentation des risques de ruissellement en cas de pluies diluviennes, un phénomène d'évapotranspiration et une hausse des besoins en irrigation (cultures et élevage). La quantité d'eau prélevée par l'industrie est réduite par le *Plan d'Utilisation Rationnelle de l'Eau* (PURE) et les prélèvements pour l'irrigation peuvent être réduits selon les choix de types de cultures et l'utilisation des eaux usées traitées¹⁹ de la station d'épuration (les pratiques

¹⁹ Nous nous sommes focalisés ici sur la question de l'eau potable, si l'on élargit la problématique des ressources en eau aux trois types de consommation (population, industrielle, agricole), la réutilisation des eaux usées nous semble être un puissant levier d'action.

françaises sont toutefois très éloignées des standards européens, des pays comme l'Italie ou l'Espagne utilisent de grandes quantités d'eau usées traitées pour irriguer leurs cultures). Précisons ici que les nappes phréatiques sont soumises aux phénomènes de recharge (octobre à avril) et de décharge (mai à septembre). Tout décalage de ces phénomènes dans le temps peut contrarier le cycle de l'eau. Ainsi, des pluies importantes en mai, juin ou juillet peuvent engendrer une croissance des plantes et ne pas remplir les nappes.

La quantité d'eau potable produite est principalement à destination de la population. Plus le rendement du réseau est grand, plus la proportion d'eau potable produite qui est réellement consommée est grande (les pertes causées par les fuites du réseau peuvent constituer une variable d'ajustement). Les stocks stratégiques d'eau potable (châteaux d'eau) permettent à la métropole de toujours avoir deux à trois journées de stock d'eau potable. La quantité d'eau potable consommée dépend de la taille de la population et de la consommation individuelle moyenne. Si l'un de ces deux facteurs augmente, la quantité d'eau potable consommée, et donc la quantité d'eau potable produite augmentent aussi. La consommation individuelle moyenne peut être réduite par l'adoption d'éco-gestes par la population, mais aussi par l'augmentation de la facture, et donc du prix du m³ d'eau potable (en fonction de l'élasticité de la demande par rapport au prix). Les injonctions préfectorales sont susceptibles en période de sécheresse ou de canicule, de réduire les usages de l'eau (ne pas arroser son jardin, ne pas laver sa voiture, ne pas remplir sa piscine...)

Les points leviers

Pour réduire la consommation d'eau potable de la population sur Clermont Auvergne Métropole, nous avons identifié les quatre points leviers suivants (Meadows, 2008):

Sensibiliser aux éco-gestes

La métropole peut investir dans des campagnes de sensibilisation auprès de la population sur les éco-gestes permettant aux usagers de réduire leur consommation d'eau potable. Parmi ces éco-gestes, nous pouvons citer le fait de privilégier les douches de moins de 5 minutes (les bains et douches représentent en moyenne 40% de la consommation d'eau d'un particulier), de ne pas laisser le robinet couler quand ce n'est pas nécessaire, de récupérer l'eau de pluie pour arroser ses plantes quand c'est possible, d'utiliser un bac pour faire la vaisselle, d'équiper ses robinets d'éco-mousseurs qui permettent de réduire la consommation sans perdre en confort, de remplir complètement le lave-linge avant de le faire tourner, d'installer un économiseur d'eau sur le pommeau de douche, et de vérifier régulièrement l'état des tuyauteries, robinets et de la chasse d'eau pour éviter les fuites à domicile (ALEC 42, 2017). Les politiques de sensibilisations ne sont pas très coûteuses et peuvent permettre d'obtenir de bons résultats puisque beaucoup d'usagers ne sont pas conscients de l'importance d'économiser l'eau, ni des gestes qu'ils pourraient adopter au quotidien pour y parvenir (Pedehour, 2022). La campagne de sensibilisation peut passer par

l’affichage, la distribution de brochures, un site internet, la presse locale, les interventions dans les écoles et les entreprises... Il est aussi important que la métropole et les autres acteurs publics donnent le bon exemple avant de solliciter le grand public (tableau de suivi des indicateurs de la Métropole à communiquer).

Mise en place d’une tarification progressive

Pour inciter les usagers à réduire leur consommation d’eau potable, la métropole pourrait aussi mettre en place une tarification progressive de l’eau potable (Leroux, 2016 ; Smets, 2011). Le principe de la tarification progressive est que les premiers m³ d’eau consommés chaque année par foyer (par exemple les 70 premiers), que l’on considère correspondre à une consommation essentielle, sont à tarif réduit, et le prix du m³ d’eau consommé augmente au-delà, avec un prix très élevé en cas de très forte consommation, par exemple au-delà de 180m³ par an. La tarification progressive de l’eau potable est autorisée en France depuis 10 ans, plusieurs communautés de communes l’ont déjà mise en place, dont Dunkerque, Rouen ou plus récemment Montpellier (Sillah, 2023 ; Demade, Pellorce, 2023). Lors de la présentation du “plan Eau” national en avril dernier, le président de la république avait dit sa volonté de voir la tarification progressive de l’eau potable se généraliser en France, mais la décision appartient aux communautés de communes qui gèrent les réseaux. La proposition de tarifs ci-dessous comprend à la fois le prix de la distribution de l’eau (sur lequel s’applique la tarification progressive) et le prix de l’assainissement (qui reste constant). Les limites de la tarification progressive sont liées au fait que les données de consommation d’eau sont prélevées par foyer, et la tarification progressive est harmonisée, ne pouvant pas dépendre du nombre d’habitants de chaque foyer. De plus, de nombreux immeubles en ville ne comportent qu’un seul compteur d’eau et il est donc impossible de mettre en place la tarification progressive pour chaque appartement. La tarification progressive n’est donc pas applicable partout et pénalise les foyers nombreux. Cependant, elle reste efficace pour inciter les très gros consommateurs à réduire leur consommation pour rester en dessous du deuxième seuil, et les autres en dessous du premier seuil. Pour contrer les problèmes créés pour les familles nombreuses, il est possible d’appliquer une politique sociale (Barraque, 2016 ; Alban, 2014), proposant des aides aux foyers les plus nombreux (application du quotient familial de la CAF, Montpellier 2023).

Tableau 3 : Proposition de tarification progressive possible sur une année
(Tarifs comprenant distribution + assainissement)

Les 70 premiers m ³	Du 71ème au 180ème m ³	A partir du 181ème m ³
2,75€/m ³	4,00€/m ³	5,50€/m ³

Source : Les auteurs

Équiper les bâtiments d'appareils de recyclage de l'eau

De nouveaux appareils permettent de récupérer l'eau de la douche et de la filtrer, afin de la réutiliser, par exemple pour les toilettes / le jardin. La métropole pourrait inciter ou aider financièrement à l'installation de ces dispositifs dans certains logements et bâtiments (Barraqué, 2011). La mise en place de ces dispositifs pourrait permettre de réduire avec effet immédiat et durablement la consommation d'eau potable des logements concernés (Bolduc, 2021). En effet, l'eau de la chasse d'eau représente par exemple plus de 10% de la consommation moyenne d'eau potable d'un particulier, alors que cette eau n'aurait pas forcément besoin d'être de l'eau potable. Par exemple, l'appareil Recover® récupère automatiquement les eaux usées issues des douches et des bains, les nettoie, les filtre et les recycle afin de les réutiliser dans les toilettes. Sa consommation électrique est très faible (30kWh/an).

Investir pour contrôler et réparer les fuites

Le dernier levier que nous proposons pour réduire la consommation d'eau potable pour la métropole est d'investir pour le contrôle du réseau et la réparation des fuites,



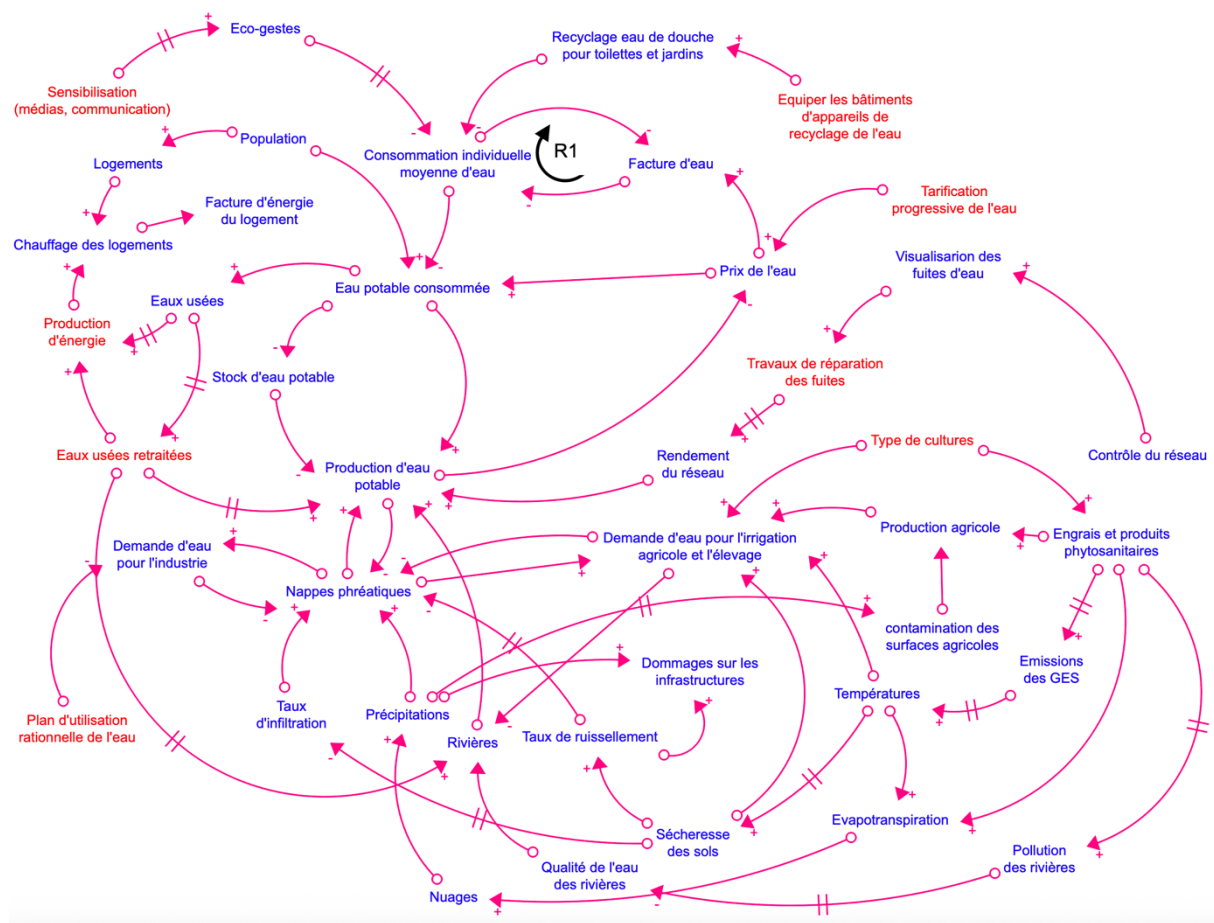
afin d'améliorer le rendement du réseau. Aujourd'hui, le rendement du réseau d'eau potable de Clermont Métropole est de 82% (un peu meilleur que la moyenne nationale), ce qui signifie que pour 100 litres d'eau potable produits, 18 sont perdus avant d'arriver chez le consommateur. Il est donc important de rechercher et réparer les fuites, mais c'est très compliqué du fait que les tuyaux sont tous

enfouis sous terre. La métropole prévoit déjà une nouvelle campagne de recherche de fuites dans les prochaines années, à l'occasion des travaux liés au projet Inspire.

Le CLD intégrant les points leviers

En ajoutant ces quatre points leviers à notre CLD, nous constatons que les trois premiers (la sensibilisation, la tarification progressive et la mise en place d'appareils de recyclage de l'eau) permettent, directement ou indirectement, de réduire la consommation individuelle moyenne d'eau potable. Le contrôle et la réparation des fuites permet d'améliorer le rendement du réseau d'eau potable. Finalement, les quatre points leviers contribuent à réduire la quantité totale d'eau potable produite, et peuvent donc permettre de répondre à notre problématique.

Figure 9: CLD avec points leviers et de nouvelles boucles



Source : Les auteurs

A côté des points leviers, nous avons introduit quelques nouvelles boucles relatives à la qualité de l'eau des rivières et au phénomène de l'évapotranspiration. Cette dernière boucle est d'autant plus importante qu'elle permet d'établir un lien direct l'usage des engrais et des produits phytosanitaires et la contamination des surfaces agricoles par les polluants chimiques (concrètement, les polluants chimiques passent de l'état liquide à l'état gazeux par le phénomène de l'évapotranspiration, puis sont stockés dans les nuages, et enfin reprennent leur état liquide via les précipitations qui viennent contaminer les surfaces agricoles). Cette boucle vient dégrader la qualité de l'eau et contaminer les surfaces de produits biologiques. Il reste cependant à quantifier la teneur en molécules chimiques (tonnages) présente dans les nuages (Fredon & al., 2021, McNeill, 2017).

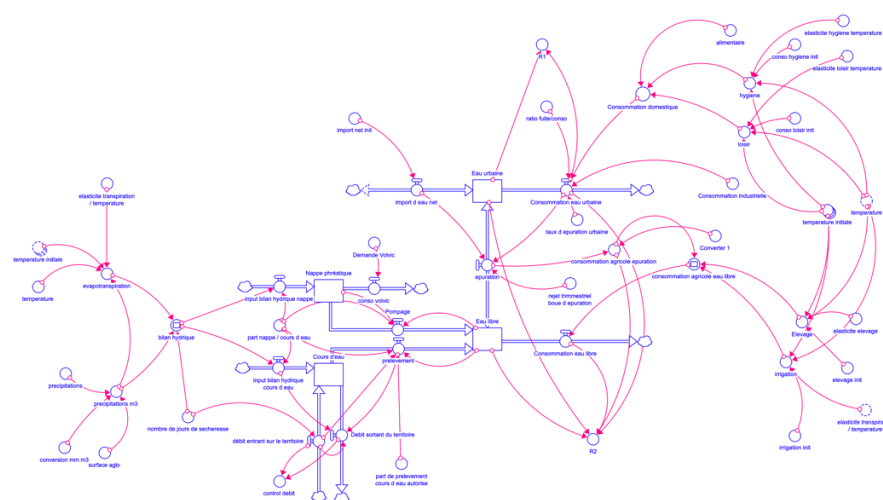
La construction du Diagramme de Stocks and Flux (SFD) de la CAM

Afin de répondre à notre problématique de réduction de la consommation d'eau potable, nous avons créé un diagramme de stocks et de flux, permettant de quantifier la quantité totale d'eau potable produite pour Clermont Auvergne Métropole.

La quantité totale d'eau produite est égale à la quantité d'eau potable consommée par la population, divisée par le rendement du réseau de distribution d'eau potable (valeur

initiale 0.82). La quantité totale d'eau potable consommée est égale à la consommation individuelle moyenne annuelle multipliée par la taille de la population. La variable population est un stock, avec comme valeur initiale 300 000 habitants en 2021, augmentant chaque année selon un taux annuel d'augmentation de la population fixé dans les simulation suivantes à 0,7% (ce qui correspond à la moyenne entre 2013 et 2019). Afin de pouvoir appliquer plus précisément les effets de nos points leviers, nous avons défini la consommation individuelle moyenne d'eau potable comme la somme des consommations pour les différents usages (bain/douches, sanitaires, linge, vaisselle, etc.) avec pour chacun une valeur de base correspondant à la consommation individuelle moyenne d'eau potable actuelle à Clermont Auvergne Métropole multipliée par la part moyenne que représente cet usage pour un particulier.

Figure 10 : Modéliser des flux et des stocks d'eau²⁰



Source : Les auteurs

Afin de modéliser les effets supposés des points leviers “sensibilisation aux éco-gestes” et “tarification progressive”, nous avons rattaché pour chaque usage une variable représentant la réduction (par exemple si la sensibilisation et la tarification progressive supposent une baisse de 50% de la consommation d'eau des particuliers pour la vaisselle en 2050 : ‘réduction de la quantité d'eau pour vaisselle’ = 0.50, et donc “consommation d'eau pour vaisselle” = “consommation pour cet usage en 2022 (10% x 42.3m³ = 4,23m³ / an)” x “réduction de la quantité d'eau pour vaisselle (0.50)” = 2,115 m³ / an). Pour modéliser les effets du contrôle du réseau et de la réparation des fuites, une variable permet de définir une variation du rendement du réseau par rapport à la valeur actuelle de 82%. Enfin, nous définissons la proportion de bâtiments équipés de systèmes de recyclage de l'eau de douche pour les toilettes. Ainsi, “Consommation d'eau pour sanitaires” = “consommation pour cet usage en 2022 (20% x 42.3m³ = 8,46m³ / an)” x (1 - “proportion de bâtiments équipés de systèmes de recyclage de l'eau de douche pour les toilettes”) x (1 - “réduction de la quantité d'eau pour sanitaire grâce aux éco-gestes”).

²⁰ Voir schéma visuel en annexe

Résultats et discussions

Le diagramme stocks flux (SFD) constitue le socle du modèle quantitatif. Il permet d'identifier nos hypothèses de travail, de se constituer une base de données²¹ et de simuler le modèle. Dans ce qui suit, nous insisterons deux points importants : (1) la scénarisation de la consommation de l'eau potable au vu des différents leviers identifiés, (2) le calibrage²² du modèle autour du coefficient d'évapotranspiration, dans un contexte de changement climatique, la hausse de l'évapotranspiration associée à des températures plus élevées pourrait bien générer des pénuries d'eau à l'horizon 2030.

La scénarisation du modèle

Nous avons choisi de modéliser 3 scénarios distincts.

Tout d'abord, un "scénario 0" dans lequel on suppose que la métropole ne met aucune action particulière en place et que la consommation individuelle moyenne d'eau potable et le rendement du réseau restent parfaitement stables. Dans ce "scénario 0", seule l'augmentation de la population au fil des ans a un impact sur la production totale d'eau potable en 2030 et en 2050.

Dans le "scénario 1", la métropole met en place une sensibilisation très importante aux éco-gestes auprès de la population, permettant à horizon 2030 ou 2050 de baisser nettement la consommation d'eau potable, grâce aux éco-gestes progressivement adoptés par la population pour tous ses usages de l'eau. L'avantage est que le coût de la sensibilisation pour la métropole est relativement faible, comparé aux économies que cela peut apporter. De plus, dans ce scénario, la métropole investit également pour le contrôle et la réparation des fuites du réseau d'eau potable, et pour les aides à l'achat d'appareils de recyclage de l'eau de la douche pour les toilettes. La tarification actuelle de l'eau potable est maintenue.

Le "scénario 2" demande des investissements plus importants à la métropole. Il comprend une sensibilisation importante aux éco-gestes auprès de la population (un peu moindre par rapport au scénario précédent), mais aussi la mise en place d'une tarification progressive de l'eau potable, des aides plus importantes pour l'achat des appareils de recyclage de l'eau de douche pour les toilettes et des investissements massifs pour identifier et réparer les fuites afin de nettement améliorer le rendement du réseau d'eau potable de Clermont Auvergne Métropole.

²¹ La base de données sur l'eau est en cours de constitution, elle devrait notamment nous permettre de valider certaines hypothèses du modèle et de proposer des simulations plus réalistes.

²² Le **calibrage d'un modèle en dynamique des systèmes** consiste à ajuster les **valeurs des paramètres** du modèle afin qu'il **reproduise fidèlement le comportement observé** d'un système réel. On peut ici identifier 5 étapes dans le calibrage d'un modèle : (1) la collecte des données empiriques ; (2) le choix des paramètres à calibrer ; (3) la formulation des critères d'ajustement ; (4) la méthode d'optimisation ; (5) la validation croisée (Diemer, 2022).

Tableau 4 : Scénarios du modèle

Scénario 0	Scénario 1	Scénario 2
Pas de sensibilisation aux éco-gestes	Très forte sensibilisation aux éco-gestes	Forte sensibilisation aux éco-gestes
Pas de tarification progressive	Pas de mise en place de tarification progressive	Mise en place d'une tarification progressive
Pas d'équipage des bâtiments en appareils de recyclage de l'eau	Equipage de certains bâtiments en appareils de recyclage de l'eau	Equipage massif des bâtiments en appareils de recyclage de l'eau
Investissements limités pour le contrôle et la réparation des fuites dans le réseau	Gros investissements pour le contrôle et la réparation des fuites dans le réseau	Investissements massifs pour le contrôle et la réparation des fuites dans le réseau

Dans le modèle, on a choisi pour le scénario 1 une amélioration du rendement du réseau de 0.06 d'ici à 2050 (passage de 0.82 à 0.88) et 9% des bâtiments équipés de systèmes de recyclage de l'eau de douche pour les sanitaires. Grâce à la sensibilisation aux éco-gestes, on suppose que la réduction de quantité d'eau utilisée diminue entre 7% et 30% pour chaque usage, selon l'efficacité potentielle des éco-gestes pouvant être appliqués. Par exemple, l'usage "bain/douche" se voit attribuer une baisse de 30% grâce aux éco-gestes "privilégier les douches de moins de 5 minutes & installer un économiseur d'eau sur le pommeau de douche", et l'usage "linge" seulement 10% avec l'éco-geste "remplir complètement le lave-linge avant de le faire tourner".

Pour le scénario 2, le rendement du réseau est défini comme atteignant à terme 0,92 (amélioration de 0,10), et 22% des bâtiments sont équipés de système de recyclage de l'eau de douche. Du fait d'une sensibilisation moindre, les réductions de quantité d'eau consommée sont un peu plus basses qu'avec le scénario 1 pour la majorité des usages. Mais la réduction de consommation est nettement plus grande pour l'usage jardin/voiture, car il est montré que ces consommations sont beaucoup plus élastiques par rapport au prix, et elles ne sont importantes que chez les plus gros consommateurs qui sont ceux affectés négativement par la tarification progressive.

Tableau 5 : Détail des scénarios

nom simulation	taux annuel d'augmentation de la population	variation rendement du réseau (effet du contrôle et de la réparation des fuites)	Proportion de bâtiments équipés de système de recyclage de l'eau de douche pour les toilettes	Proportion réduction de la quantité d'eau pour bain/douche grâce aux éco-gestes	Proportion réduction de la quantité d'eau pour sanitaires grâce aux éco-gestes	Proportion réduction de la quantité d'eau pour linge grâce aux éco-gestes	Proportion réduction de la quantité d'eau pour vaisselle grâce aux éco-gestes	Proportion réduction de la quantité d'eau pour cuisine grâce aux éco-gestes	Proportion réduction de la quantité d'eau pour voiture/jardin grâce aux éco-gestes	Proportion réduction de la quantité d'eau pour autres consommations grâce aux éco-gestes
Scénario 0	0,007	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Scénario 1	0,007	0,06	0,09	0,30	0,10	0,10	0,10	0,07	0,20	0,20
Scénario 2	0,007	0,10	0,22	0,23	0,08	0,08	0,08	0,05	0,35	0,15

En 2021, la quantité d'eau potable consommée sur la métropole était de 12 700 000 m³,. Avec un rendement du réseau de 0,82, c'est plus de 15 500 000 m³ d'eau potable qui devaient être produits. Avec une population qui atteindrait 367 000 habitants (en

prenant 0,7% d'augmentation annuelle), le "scénario 0" donne une production d'eau potable annuelle de 18 954 300 m³ d'eau en 2050.

Le "scénario 1", qui met principalement l'accent sur les grandes campagnes de sensibilisation, permet de réduire de 20% la consommation individuelle moyenne d'eau potable, faisant passer la quantité totale d'eau consommée en 2050 en dessous du niveau de 2021, malgré l'augmentation supposée de la population de près de 67 000 habitants. L'amélioration du rendement du réseau permet d'obtenir un total de seulement 14 027 600 m³ d'eau potable produits.

Dans le "scénario 2", la mise en place de la tarification progressive permet quasiment de compenser la baisse des effets de la sensibilisation par rapport au "scénario 1", puisqu'on obtient une consommation individuelle moyenne de 33,9 m³ d'eau par personne et par an. Le rendement du réseau étant excellent dans ce scénario (0,92), la quantité d'eau potable à produire en 2050 n'est que de 13 537 900 m³.

Tableau 6 : Projection des scénarios via la consommation individuelle d'eau

nom simulation	quantité totale d'eau produite en 2050 (m ³)	consommation individuelle moyenne d'eau potable (m ³)	quantité totale d'eau consommée en 2050 (m ³)	population estimée en 2050
Scénario 0	18 945 300	42,3	15 535 200	367000
Scénario 1	14 027 600	33,6	12 344 300	367000
Scénario 2	13 537 900	33,9	12 454 900	367000

Nos deux scénarios à horizon 2050 sont assez ambitieux, et on constate qu'ils sont très efficaces, puisqu'ils permettent de réduire la quantité d'eau potable produite, malgré l'augmentation de la population de la métropole. Avec les paramètres choisis, le deuxième scénario est le plus efficace, mais son coût serait très élevé pour la métropole avec de lourds investissements pour améliorer le rendement du réseau, mettre en place la tarification progressive et aider les ménages à acheter des dispositifs de recyclage de l'eau de la douche pour les sanitaires.

Si les effets des scénarios 1 ou 2 étaient déjà atteints à notre étape en 2030, la population n'ayant atteint que 319 000 habitants, la quantité d'eau potable totale produite pour les habitants de Clermont Auvergne Métropole ne serait alors que de 12 200 000 m³ par an avec le scénario 1 et 11 775 000 m³ par an avec le scénario 2.

Tableau 7 : Scénarios ajustés à la taille de la population

nom simulation	consommation individuelle moyenne d'eau potable (m ³)	quantité totale d'eau consommée en 2030 (m ³)	quantité totale d'eau produite en 2030 (m ³)	population estimée en 2030
Scénario 0	42,3	13 512 200	16 478 300	319000
Scénario 1	33,6	10 736 800	12 200 900	319000
Scénario 2	33,9	10 833 000	11 775 000	319000

La question de l'évapotranspiration

Le diagramme des boucles causales (CLD) et le diagramme stocks flux (SFD) ont mis en lumière une boucle importante du système, celle du réchauffement climatique. Cette boucle engendre deux effets interdépendants : (1) une hausse des températures, une augmentation du coefficient d'évapotranspiration et la possibilité de générer des pénuries d'eau ; (2) une hausse du coefficient d'évapotranspiration et la possibilité de voir des produits chimiques passés de l'état liquide (ce sont les engrais et les produits phytosanitaires épandus sur les terres agricoles) à l'état gazeux (stock de produits chimiques dans les nuages), et de se mêler aux futures précipitations, contaminant par la même occasion de nouvelles surfaces agricoles (cette contamination peut affecter certaines productions issues de l'agriculture biologique). Au-delà de l'effet de contamination, on notera ici la possibilité de générer une dégradation généralisée de la qualité de l'eau.

Evapotranspiration et pénurie d'eau

Pour les besoins de la modélisation du système eau, nous nous appuyons sur les hypothèses suivantes :

Population Clermont Auvergne Agglomération : 290 000 personnes

Consommation d'eau domestique conventionnelle : 150 litres/habitant/jour (Observatoire national).

Ce qui donne 43 500 m³/jour et 15 877 500 m³/an pour 290 000 habitants.

Si l'augmentation de l'évapotranspiration²³ (ET) s'applique à l'aire de captage, elle réduit le volume d'eau disponible, selon la formule suivante²⁴:

$$\text{Volume perdu (m}^3\text{)} = \Delta\text{ET (mm)} \times \text{surface du bassin (km}^2\text{)} \times 1000$$

Il est ainsi possible de calculer le ΔET qui produit une perte équivalente à une réserve d'eau critique (par exemple 20 ou 30 jours de consommation :

Soit $\Delta\text{ET} = (\text{demande quotidienne d'eau} \times \text{nombre de jours} / (1000 \times \text{surface du bassin en km}^2))$

Le nombre de jours supprimés et la taille du bassin constituent deux points leviers. Il est possible de se constituer des scénarios à partir des valeurs données à ces deux leviers.

Prenons la suppression en jours (30 jours, 90 jours, 1 an) et trois tailles de surfaces (100, 300 et 1000 km²). Les valeurs extrêmes (1 an, 1000 km²) permettront de fixer les limites de nos scénarios. Les résultats pour 290 000 habitants et 43 500 m³/jour sont présentés dans le tableau 8.

²³ Précisons qu'il n'existe pas un unique taux d'évapotranspiration universel qui déclencherait une pénurie d'eau, cela dépend de la surface du bassin d'alimentation et des réserves disponibles.

²⁴ Petit rappel 1 mm sur 1 km² est égal à 1000 m³

Tableau 8 : Pertes d'eau selon des surfaces de bassin

Perte jour/Bassins	100 km2	300 km2	1000 km2
30 jours	13,1 mm	4,35 mm	1,31 mm
90 jours	39,2 mm	13,05 mm	3,92 mm
365 jours	158,8 mm	52,93 mm	15,88 mm

Source : Auteurs

Interprétation : si l'aire de la surface du bassin est de 300 km² (surface correspondant à la CAM), une hausse de l'évapotranspiration de 4,35 mm appliquée au bassin entraînerait une perte équivalent à un mois d'eau (pour 290 000 habitants). Une hausse de l'évapotranspiration de 52,93 mm réduirait le volume disponible d'eau à l'équivalent de toute la consommation annuelle (en considérant aucune alternative et aucun stock de secours).

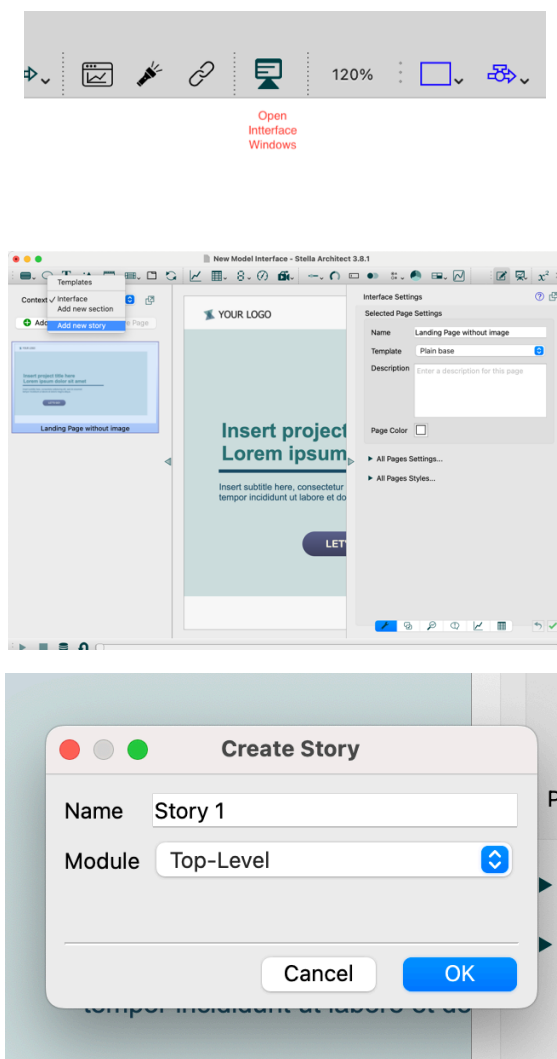
Remarques : (1) Il convient de préciser ici que le ΔET correspond à une perte supplémentaire d'eau sur un bassin d'alimentation, or tout mm d'ET supplémentaire n' équivaut pas automatiquement à moins d'eau distribuée si la ressource est une nappe profonde fortement alimentée, si de gros réservoirs d'eau existent ou s'il existe des transferts entre bassins. (2) La résilience « réelle » du territoire dépend de la capacité de stockage (réservoirs), de l'alimentation par les nappes alluviales, les transferts, la gestion des restrictions (arrêté préfectoral), les pertes de réseau (rendement) et les variations saisonnières. Dans le cas de la CAM, l'eau provient majoritairement de captages dans la Chaîne des Puys et d'u champs de captage sur la nappe alluviale de l'Allier. Ces deux types de sources d'eau réagissent différemment à une hausse de l'ET. (3) Nous sommes partis d'une hypothèse de 150 litres/jour par habitant. Si nous introduisons les leviers d'actions (éco-gestes, tarification progressive, réparation des fuites), alors une baisse de la consommation locale serait possible (120 litres/jour) et modifierait nos scénarios.

Un scénario fiction pour 2030

Les scénarios « fictifs » que l'on qualifie souvent de narratives, font partie des étapes de la dynamique des systèmes (étape 16). Le logiciel Stella offre la possibilité de raconter son histoire 'Story Telling'. Un récit est une séquence de pages qui, généralement, affichent la structure du modèle tout en fournissant les outils et le récit permettant à l'utilisateur de comprendre la signification de cette structure et ses implications sur le comportement. Une bonne histoire doit être captivante et pleine de suspense. Il existe plusieurs façons d'y parvenir, mais un élément accrocheur qui donne envie à l'utilisateur de connaître la réponse à une question ou de voir comment un conflit se résout peut être très efficace.

Dans Stella, il suffit de cliquer sur *Ajouter une nouvelle histoire* dans le menu déroulant en haut du panneau *Pages (Interface)* pour ouvrir la boîte de dialogue *Créer une histoire*. Sélectionnez un nom d'histoire et le module dans lequel vous souhaitez afficher le contenu. La boîte de dialogue *Configurer la visibilité* s'ouvre sur ce module et vous pouvez sélectionner les variables (le cas échéant) qui doivent être présentes sur la première page de l'histoire. Il est possible de consulter la section *Créer une interface simple* pour connaître les stratégies permettant de garder le modèle visible au fur et à mesure que l'histoire se déroule.

Figure 11 : Créer une histoire sur Stella



La bonne histoire 1: Quel serait le taux d'évapotranspiration qui pourrait entraîner une baisse des approvisionnements en eau potable de la CAM à l'horizon 2030 ?

Les hypothèses retenues sont les suivantes :

Projection de la population en 2030 : 306 550 habitants (nous avons utilisé ici le chiffre de l'INSEE de 2022, soit 296 677 habitants et un taux de croissance de 0.41 %/an).

Consommation moyenne d'eau retenue (150 litres/hab/jour), soit 45 982 m³/jour en 2030.

Surface de référence du bassin (trois scénarios : 100 km², 300 km² qui est la superficie de la CAM et 1000 km² qui est l'ordre de grandeur d'un grand bassin).

Nous avons repris les formules du volume perdu (m³) et de la ΔET . Le tableau suivant donne les seuils d'augmentation de l'évapotranspiration (ΔET) qui diminueraient l'équivalent de la consommation d'eau potable.

Tableau 9 : Pertes d'eau sur les bassins à l'horizon 2030

Perte jour/Bassins	100 km ²	300 km ²	1000 km ²
30 jours	13,8 mm	4,59 mm	1,38 mm
90 jours	41,4 mm	13,77 mm	4,14 mm
365 jours	167,8 mm	55,83 mm	16,78 mm

Source : Les auteurs

Les calculs du tableau indiquent que si la surface d'alimentation des captages est proche de la surface de la métropole (300 km²), ΔET de 4,59 mm appliquée sur le bassin correspond à un moins de consommation d'eau en moins (ce niveau doit déclencher des restrictions si les stocks sont faibles). Une augmentation de 55,83 mm supprimerait l'ensemble de la consommation d'eau potable de la métropole. Il faut noter qu'en nombre relatif, si l'on compare avec les ordres de grandeur régionaux d'ET (300 mm/an d'évapotranspiration réelle dans l'alluvion de l'Allier, 750 à 850 mm/an d'ET potentielle dans certains scénarios régionaux), 55 mm représente 18,33% de 300 mm ou 6,4% de 850 mm, une variation donc plausible compte tenu du changement climatique.

Cette modélisation propose bien entendu un bilan hydrique très simplifié, ils ne tiennent pas compte de la capacité réelle des réservoirs, des apports souterrains (nappes), des transferts externes, des asymétries spatiales de pluie/ET, des gestions et politiques publiques (restrictions, achats, forages). Par ailleurs, comme nous l'avons signalé plus haut, les captages de Clermont viennent majoritairement de la Chaîne des Puys et de l'Alluvion de l'Allier, ces sources réagissent différemment à une hausse de l'ET. La surface utile d'alimentation des captages peut être bien plus petite ou plus grande que la surface administrative de la métropole. Le calcul d'un seuil « réaliste » nous obligerait à refaire nos calculs en prenant en compte la surface de bassin d'alimentation réelle et la capacité de stockage. Pour ce faire, il nous faut affiner notre histoire.

Nouvelle histoire 2 : A partir des données locales (bassins/captages principaux du Val d'Allier et de la chaîne des Puys et données publiques des mairies, de la CEN Auvergne, cycle de l'eau de la CAM...), je cherche à calculer les seuils d'évapotranspiration (ΔET) qui retireraient un volume d'eau équivalent à 30, 90 et 365 jours de consommation pour la CAM à l'horizon 2030.

Hypothèses et données locales

Production annuelle de l'usine du Val d'Allier : 8 millions m³/an

Volumes annuels facturés (consommation locale) : 12,55 millions de m³/an

La CAM gère près de 50 réservoirs de stockage²⁵.

La surface approximative de la nappe alluviale de l'Allier utilisée²⁶ : 380 km²

La surface représentative de la Chaîne des Puys utilisée comme bassin des captages²⁷ : 13 000 ha (130 km²)

Consommation journalière estimée précédemment : 45 982 M³/jour pour 306 550 habitants (en raison de 150 l/an)

Ces nouvelles données permettent de calculer les ΔET nécessaires pour réduire l'équivalent de X jours de consommation d'ici 2030.

Tableau 10 : les données locales pour calculer le ΔET

Bassin/Captage	Surface utilisée	ΔET = perte (30 jours)	ΔET = perte (90 jours)	ΔET = perte (365 jours)
Val d'Allier (nappe alluviale)	380	3,63 mm	10,89 mm	44,17 mm
Chaîne des Puys (Captage)	130	10,61 mm	31,83 mm	129,1 mm

Source : les auteurs

Au vu de ces résultats, on constate que si l'alimentation principale (ici la nappe du Val d'Allier, soit 380 km²) subissait une hausse d'ET de 3,63 mm sur le bassin, cela correspondrait à une perte d'un mois de ressources en eau pour la métropole. Ce niveau suffit à provoquer des restrictions. Pour la Chaîne des Puys (surface plus petite, 130 km²), l'effet est plus concentré (10,61 mm) élèverait également l'équivalent d'un mois de consommation. La perte d'une année de consommation d'eau équivaut à un ET de 44,17 mm dans le Val d'Allier ou 129,1 mm dans la Chaîne des Puys.

Une nouvelle fois, il convient de rappeler les limites importantes de cette nouvelle histoire. Les ΔET sont des conversions volumétriques (mm en m³), elles ne tiennent pas compte de la dynamique réelle du cycle de l'eau. L'hétérogénéité spatiale et temporelle du territoire est importante, une hausse de l'ET en saison sèche a plus d'impacts). Les surfaces utilisées (380 km² pour le Val d'Allier et 130 km² pour la Chaîne des Puys) peuvent ne pas correspondre aux aires d'alimentation de captage (AAC). Ces dernières peuvent être plus petites, plus grandes ou complexes.

²⁵ Rapport du conseil métropolitain du 27 septembre 2024. https://saint-genes-champanelle.fr/wp-content/uploads/2024/11/RPQS_eau_assainissement_2023_V3_WEB.pdf

²⁶ <https://www.cen-auvergne.fr/nos-projets/zones-humides-et-milieus-aquatiques/val-dallier>

²⁷ <https://www.paysages.auvergne-rhone-alpes.gouv.fr>

Nouvelle histoire 3 : Afin d'affiner les résultats, nous avons cherché à calculer un seuil opérationnel, un ΔET qui provoque une pénurie d'eau compte tenu des capacités de stockage réelles en m³/réserves en jours. Nous n'avons pas cherché à utiliser les AAC exactes. Nous réservons ce scénario pour un prochain papier de recherche.

Données clés :

Capacités totale de stockage de l'eau potable²⁸ (ce sont les réservoirs gérés par la CAM), soit 47 000 m³.

Consommation journalière retenue pour 2030 : 45 982 m³/jour, soit une réserve de 1,02 jour de consommation (47 000/45 982). Cela signifie que la réserve stockée ne couvrirait qu'un jour de consommation (alors que les métropoles annoncent très souvent détenir 3 jours de stocks).

Surfaces de référence des bassins/captage : Val d'Allier (380 km²) et Chaîne des Puys (130 km²).

Les nouveaux calculs introduisent une équation supplémentaire, qui correspond à l' ΔET associé au volume de la capacité de stockage totale, soit 47 000 m³.

$$\Delta ET = \text{volume en m}^3 / [(\text{surface en km}^2) \times 1000]$$

Appliqué aux surfaces (nappe de l'Allier, Chaîne des Puys), cela signifie qu'il convient d'enlever les 47 000 m³.

Val d'Allier (380 km²) : $\Delta ET = 47000 / (380 \times 1000) = 0.12 \text{ mm}$

Chaîne des Puys (130 km²) : $\Delta ET = 47000 / (130 \times 1000) = 0.36 \text{ mm}$

Surface administrative de la CAM : $\Delta ET = 47000 / (300,6 \times 1000) = 0.16 \text{ mm}$

Une augmentation de l'évapotranspiration uniformément répartie sur un événement de l'ordre de 0.12 mm sur le Val d'Allier ou de 0.36 mm sur la Chaîne des Puys, retirerait un volume d'eau équivalent à l'ensemble des réserves stockées. Si cette perte n'est pas compensée par des apports, des transferts ou des pompages de secours, la Métropole perdrait sa réserve disponible et se retrouverait en situation de pénurie.

Ces trois histoires sont une illustration de la capacité des modèles en dynamique des systèmes à simuler des chocs. Sous Stella, raconter une histoire débouche sur une simulation²⁹. Ces histoires ne présument en rien de la robustesse du modèle, elles ouvrent surtout le champ des possibles et du niveau de détail des modèles. Comme nous l'avons précisé plus haut, il serait possible de recalculer les ΔET à partir d'autres

²⁸ Information figurant dans les dossiers sur la loi sur l'eau : <https://www.puy-dedome.gouv.fr/contenu/telechargement/24744/206007/file/Dossier%20Loi%20sur%20Eau%20Sparanat.pdf>

²⁹ Pour simuler l'histoire, il suffit d'ajouter un bouton avec l'action « Exécuter », « Simuler » ou « Avance ». Seule la structure visible (histoire retenue) sera simulée (bien que toutes les variables du modèle seront initialisées).

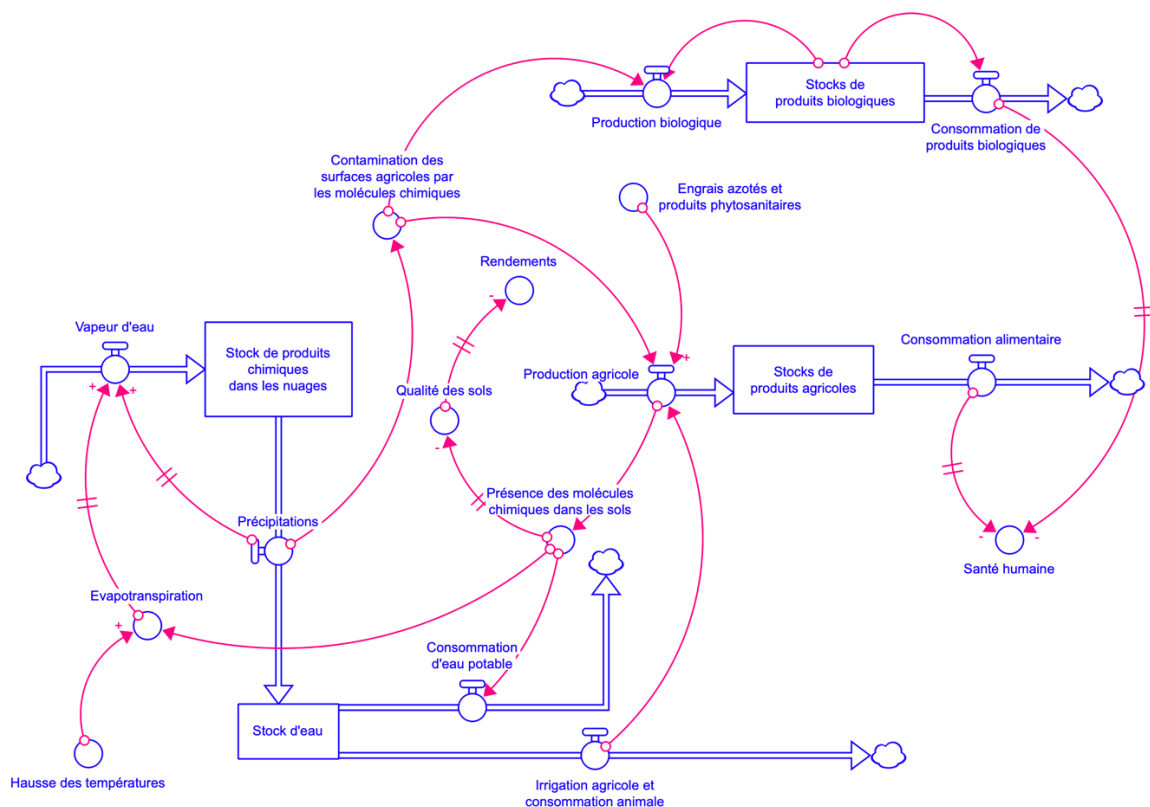
hypothèses : (1) des AAC officielles pour chaque captage, (2) d'une définition opérationnelle de la pénurie (réserves < à trois jours) ou (3) de la capacité de l'usine de Val d'Allier³⁰.

Quand l'évapotranspiration met en lumière des réservoirs de produits chimiques

L'une des boucles du diagramme causal et donc du modèle stocks flux, a mis en évidence, un phénomène de plus en plus étudié par les sciences du climat, celui des nuages. Dans le cas présent, la boucle incarne un enchaînement de conséquences qui a pour cause principale, l'utilisation des engrais (azotés) et des produits phytosanitaires dans la production agricole.

Sous l'effet des précipitations, du ruissellement présent sur les surfaces agricoles (disparition des haies), de l'artificialisation des sols et du phénomène d'évapotranspiration, les molécules chimiques contenues dans les engrais azotés et les produits phytosanitaires se retrouvent dans les nuages (vapeur d'eau) et viennent se déverser un peu plus loin via de nouvelles précipitations.

Figure 12: Boucle intégrant la relation stocks – flux des engrais et des produits phytosanitaires

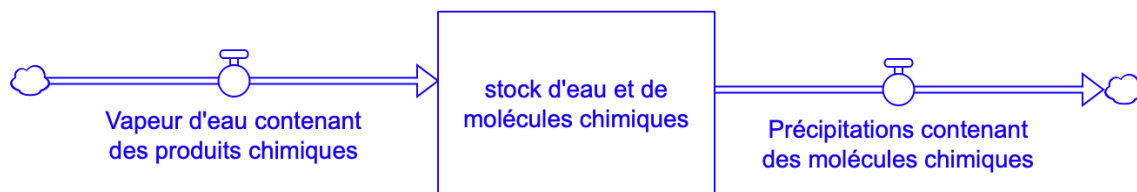


Source : Les auteurs

³⁰ Ce travail sera réalisé dans un autre document recherche, toujours financé par le pôle de l'eau, mais abordant la question des eaux usées et celle de l'économie circulaire de l'eau.

En dynamique des systèmes, cela illustre le passage d'un flux entrant (la vapeur d'eau contenant des produits chimiques) à un stock (d'eau et de produits chimiques), puis à un flux sortant (les précipitations contenant des molécules chimiques).

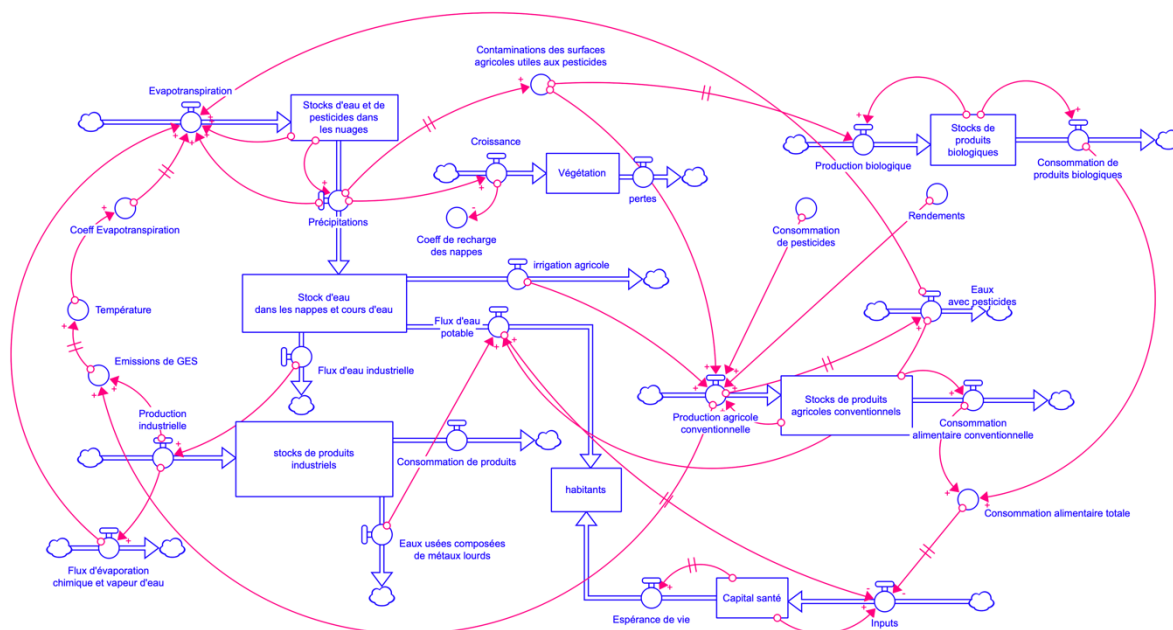
Figure 13 : Le principe d'accumulation



Source : Diemer (2022)

Le processus de modélisation (via Stella), qui suppose de basculer vers le diagramme stocks flux, repositionne cette problématique dans une sorte de microscope.

Figure 14 : Ajout de chaines de causalité




Source : Les auteurs

L'usages des engrais et des produits phytosanitaires contamine la production agricole conventionnelle via une boucle de renforcement, celle qui passe par le processus d'évapotranspiration. Les nuages stockent les molécules chimiques, puis un flux sortant (les précipitations) vient déverser ces mêmes molécules, à plusieurs distances de là. Le risque est donc important que les surfaces concernées puissent être des productions biologiques. Ainsi, les bienfaits du bio seraient tout simplement annihilés par des entrants chimiques non désirés. Bien entendu, le passage au modèle quantitatif est assujetti aux études sur la

composition des nuages (Fredon & al., 2021, McNeill, 2017), et notamment au poids des molécules chimiques, parlons-nous de quelques tonnes (1 à 10) ou au contraire de plusieurs dizaines de tonnes (10 à 100). Sans ce retour du terrain, on peut difficilement faire des scénarios réalistes³¹.

Mais dans le cas qui nous intéresse ici, l'eau potable, le poids des produits chimiques dans la composition des nuages doit avoir une conséquence sur la qualité de l'eau, et donc la santé des habitants de la CAM. Le dernier rapport sur le prix et la qualité de l'eau potable et de l'assainissement de 2023, rappelle les obligations et les limites fixées par le code de la Santé Publique (directive européenne 2020/2184, arrêté du 30 décembre 2022).

Figure 14 : Normes réglementaires de la qualité de l'eau potable

Paramètres microbiologiques			
Escherichia coli (E. coli)	0/100 ml		
Entérocoques intestinaux	0/100 ml		
Paramètres chimiques			
Acides haloacétiques	60 µg/l		
Acrylamide	0,10 µg/l		
Antimoine	10 µg/l		
Arsenic	10 µg/l		
Benzène	1 µg/l		
Benzo [a] pyrène	0,01 µg/l		
Bisphénol A	2,5 mg/l		
Bore	1,5 mg/l		
Bromates	10 µg/l		
Cadmium	5 µg/l		
Chlorates	0,25 mg/l		
Chlorites	0,25 mg/l		
Chlorure de vinyle	0,5 µg/l		
Chrome	50 µg/l (jusqu'au 31/12/2035 puis 25 µg/l)		
Chrome VI	6 µg/l		
Cuivre	2 mg/l		
Cyanures totaux	50 µg/l		
1,2-dichloroéthane	3 µg/l		
Epichlorhydrine	0,1 µg/l		
Fluorures	1,5 mg/l		
Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	0,1 µg/l		
		Mercure	1 µg/l
		Total microcystines	1 µg/l
		Nickel	20 µg/l
		Nitrates	50 mg/l
		Nitrites	0,5 mg/l (0,1 mg/l en sortie des installations de traitement)
		Somme des substances alkylées per et polyfluorées	0,10 µg/l
		Pesticides (par substance individuelle)	0,1 µg/l (Pour chaque pesticide sauf aldrine, dieldrine, heptachlore, heptachlorépoxyde : 0,03 µg/l)
		Total des pesticides	0,5 µg/l
		Plomb	10 µg/l (jusqu'au 31/12/2035 puis 5 µg/l)
		Sélénium	20 µg/l
		Tétrachloroéthylène et trichloroéthylène	10 µg/l
		Total des trihalométhanes (THM)	100 µg/l
		Uranium	30 µg/l

Source : Code de la Santé publique

³¹ Signalons ici les travaux de l'OPGC de l'Université Clermont Auvergne. Ce dernier rappelle sur son site que la chaîne des puys est fréquemment soumise à un flux d'ouest apportant des masses d'air d'origine océanique, car il n'y a pas de relief marqué jusqu'à l'océan Atlantique. La condensation de l'air humide en s'élevant en altitude au contact de la chaîne des puys, fait du puy de Dôme un site fréquemment en condition de nuage et donc privilégié pour l'étude in situ des nuages ; il s'agit d'ailleurs du seul endroit en France où les nuages sont collectés et analysés régulièrement depuis le début des années 2000. Les gouttelettes nuageuses sont collectées sous forme liquide grâce à un collecteur de nuages permettant ensuite des mesures de paramètres chimiques et microbiologiques. Ce site est le seul en Europe à caractériser le contenu en micro-organismes du nuage et pour cette motivation, le chalet est équipé d'une salle de microbiologie pour travailler en conditions stériles. Les paramètres physiques des nuages (nombre et diamètre des gouttelettes) sont mesurés sur la terrasse, sur le toit du chalet de l'observatoire, par spectrophotomètre laser à diffusion directe.

Conclusion

Les enjeux liés à l'eau vont continuer à devenir de plus en plus importants dans les années à venir. Il est donc important pour Clermont Auvergne Métropole de limiter et contrôler sa consommation en eau, afin que les nappes phréatiques conservent un niveau suffisant. Si nos scénarios soulignent la possibilité de baisser nos consommations d'eau via des leviers proactifs, notre modèle souffre de nombreuses limites. D'une part, notre problématique portait uniquement sur la réduction de la consommation en eau potable de la population. Or, l'eau est partagée entre trois secteurs (industrie, agriculture et population) qui vont devoir s'entendre pour limiter leurs ponctions sur une ressource commune. La question de la gouvernance de l'eau est donc au cœur des préoccupations sociétales, cette dernière s'inscrit dans une logique de dynamique sociale qui n'est pas toujours facile à modéliser. Ce dernier point relance la nécessité de produire une toile de l'eau intégrant les acteurs et les échanges flux-stock. D'autre part, la consommation d'eau doit être replacée dans le cadre du réchauffement climatique. La hausse des températures se traduit généralement par des sécheresses et donc une augmentation du taux de ruissellement du sol (accentué par la disparition des haies et l'artificialisation). De la même manière, la hausse des températures augmente le taux d'évapotranspiration. L'évolution de ce taux peut avoir des conséquences désastreuses sur les réserves en eau de la métropole. Nos scénarios pour 2030 font état des premières pénuries d'eau potable pour la CAM. Celle-ci va devoir se pencher sur les mesures préventives pour éviter un tel choc. 2030, c'est déjà demain, et la force des délais de retard risque de générer des pénuries d'eau potable dans le très court terme.

Bibliographie

- ALBAN T. (2014), *La gestion des ressources en eau par les instruments économiques : tarification progressive et tarification sociale*. Conseil économique pour le développement durable. <https://agris.fao.org/search/en/providers/122652/records/647761305eb437ddff77db83>
- ALEC 42 (2017), *Susciter la demande et faire progresser l'offre*, Rapport d'activité, <https://www.alec42.org/wp-content/uploads/2021/03/ALEC42-Rapportactivite2017-BD.pdf>
- ALLAIN S. (2012), « Négocier l'eau comme un bien commun à travers la planification concertée de bassin », *Natures Sciences Sociétés*, vol. 20, n°1, pp. 52-65.
- ALLAIN S. (2001), Les schémas d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE), une procédure innovante de planification participative de bassin, *Géocarrefour*, vol 76 (3), p. 199 – 209.
- BARRAQUÉ B. & LAIGNEAU P. (2017), « Agences de l'eau : rétrospection prospective », *Responsabilité & Environnement*, une série des *Annales des Mines*, n°87, juillet, pp. 114-120.
- BARRAQUE B. (2016), Effets redistributifs de la tarification progressive, le cas d'une ville moyenne, *Techniques Sciences Méthodes*, n°5, 111^e année, p. 72 – 83.

- BARRAQUE B. (2011), Les enjeux de l'écologisation de la gestion de l'eau dans les éco-quartiers, *Espaces et Sociétés*, n° 144-145, p. 209 – 212.
- BARRAQUE B. (2007), Les agences de l'eau et le contexte de la régionalisation, *Responsabilité et environnement*, n°46, p. 73 – 80.
- BARRAQUE B. (1995), Les politiques de l'eau en Europe, *Revue française de science politique*, 3-1995 ;
- BARRAQUE B. (1995), *Les politiques de l'eau en Europe*, La Découverte, coll. Recherches.
- BARRETEAU O., RICHARD-FERROUDJI A. & GARIN P. (2008), « Des outils et méthodes en appui à la gestion de l'eau par bassin versant », *La Houille blanche, Revue internationale de l'eau*, p. 48-55.
- BOLDUC L.P (2021), Bâtiment durable et eaux grises, des solutions innovantes pour le recyclage, *Vecteur Environnement*, vol 54, n°3, p. 18 – 21.
- BRIDGELAND D.M, ZAHAVI R. (2009), *Business Motivation Models in Business Modeling, A Practical guide to Realizing Business Value*, The MK/OMG Press, p. 41 – 76.
- BRUN A. (2009), Gestion de l'eau en France, *Economie Rurale*, vol 309, p. 4 – 8.
- DEMADE PELLORCE J. (2023), Ressource, Dunkerque, pionnière de la gestion de l'eau, *Terres et Territoires*, 13 avril, <https://terres-et-territoires.com/cest-tout-frais/environnement/ressource-dunkerque-pionniere-en-gestion-deau#:~:text=De%20%20à%2080%20m,les%2091%20000%20du%20territoire>.
- DIEMER A. (2022), Immersion dans la dynamique des systèmes, les 16 étapes de la pensée systémique (Systems Thinking) à la dynamique des systèmes (System Dynamics), *Revue Francophone du Développement Durable*, vol 20, Décembre, p. 32 – 116.
- EVRARD C. (2006), *Les agences de l'eau : Entre recentralisation et décentralisation*, L'Harmattan.
- FEUILLETTE S. (2004), L'eau en France : entre subsidiarité et gestion spatiale, *Cybergeog*, <https://journals.openedition.org/cybergeog/1312#authors>
- FREDON A., RADCHENKO A.K, CUPPEN H.M (2021), Quantification of the role of chemical desorption in molecular clouds, *Acc. Chem. Res.*, vol 54, p. 745 – 753. <https://dx.doi.org/10.1021/acs.accounts.0c0063>
- GHIOTTI S. (2010), Les schémas d'aménagement et de gestion des eaux en France. La SAGEsse s'est-elle imposée dans les politiques de l'eau ? *Droit et gestion des collectivités territoriales*, vol 30 (1), p. 189-202.
- GRUJARD E. (2003), LA gestion de l'eau à l'épreuve des territoires, *Hérodote*, n°11°, p. 47 – 69.
- HARALDSON H. (2004), *Introduction to System Thinking and Causal Loop Diagrams*, Lund University. https://www.researchgate.net/profile/Hoerdur-Haraldsson/publication/258261003_Introduction_to_system_thinking_and_causal_loop_diagrams/links/5bcceed6458515f7d9d01e81/Introduction-to-system-thinking-and-causal-loop-diagrams.pdf
- LAIGNEAU P., FORMIGA-JOHNSSON R. M. & BARRAQUÉ B. (2018), « Regards croisés sur les organismes de bassin en France et au Brésil dans la perspective des communs », *Revue internationale des études du développement*, n°235, pp. 201-223.

- LAIGNEAU P., FORMIGA-JOHNSON R.M, BARRAQUE B. (2018), Les agences de l'eau au Brésil et en France : les défis d'une gestion de l'eau en tant que bien commun à l'échelle des bassins versants, *Annales des Mines, Responsabilité et Environnement*, p. 50 à 54.
- LAUNAY J. (2023), L'eau et le changement climatique – la concertation des acteurs, *Annales des Mines – Responsabilité et environnement*, n°112, p. 33 – 36.
- LEROUX J. (2016), La tarification de l'eau, comment combiner équité et efficacité, *Gestion*, vol 41, p. 77 – 79.
- MCNEILL V.F (2017), Atmospheric Aerosols : Clouds, Chemistry, and Climate, *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*, vol 8, p. 427 – 444. <https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-060816-101538>
- MEADOWS D. (1999), *Leverage Points : Places to Intervene in a System*, The Sustainability Institute.
- MONTPELLIER (2023), Une gestion 100% publique de l'eau, <https://www.montpellier3m.fr/eauecosolidaire#:~:text=tarification%20éco%2Dsolidaire-,Depuis%20le%201er%20janvier%202023%20%3A,€%20HT%2F%20m3>).
- NARCY J.B (2003), La politique de l'eau face à la gestion des espaces : les agences de l'eau aux limites de la modernité, *Espaces et Sociétés*, n°115, p. 179 – 196.
- OSTROM E. (2010), *La Gouvernance des biens communs : pour une nouvelle approche des ressources naturelles*, Bruxelles, Paris, De Boeck.
- PEDEHOUR P. (2022), *Outils d'aide à la décision pour la répartition de la ressource en eau en région Pays de Loire*, Thèse de doctorat, Université Nantes Atlantique, Laboratoire d'économie et de Management. <https://theses.hal.science/tel-03847995/>
- RICHARDSON G.P (1986), Problems with Causal Loop Diagrams, *System Dynamics Review*, Summer, <https://doi.org/10.1002/sdr.4260020207>
- ROCKTROM J. & al. (2009), Planetary Boundaries : Exploring the Safe Operating Space for Humanity, *Ecology and Society*, vol 14, n°2. <http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/>
- RUI S. (2006), Le public fait-il la loi ? Le débat national sur l'eau, entre injonction participative et néo-corporatisme, *Politix*, n°75, p. 125 – 142.
- SILLAH F. (2023), Comment fonctionne la tarification progressive de l'eau, déjà expérimentée à Dunkerque, Montpellier et Libourne ? Le Monde, 5 avril, https://www.lemonde.fr/planete/article/2023/04/05/comment-fonctionne-la-tarification-progressive-de-l-eau-deja-experimentee-a-dunkerque-montpellier-et-libourne_6168274_3244.html
- SMETS H. (2011), *La tarification progressive de l'eau potable, les solutions en France et dans le monde*, Académie de l'Eau, https://www.pseau.org/outils/ouvrages/academie_de_l_eau_la_tarification_progressive_de_l_eau_potable_2011.pdf

SITES INTERNET

ADEME - Astuces pour économiser l'eau

<https://agirpourlatransition.ademe.fr/particuliers/conso/conso-responsable/astuces-economiser-leau-a-maison-alleger-factures#:~:text=installez%20des%20mousseurs%20sur%20les,consommer%20a%20minima%20150%20L>

BNPE - données département Puy de Dôme 2021, <https://bnpe.eaufrance.fr>

Clermont Auvergne Métropole - Nouveaux tarifs eau

<https://www.clermontmetropole.eu/no-cache/actualites-et-agendas/toute-lactualite/detail/actualites/eau-et-assainissement-des-tarifs-harmonises-pour-repondre-a-plusieurs-defis/>

Clermont Auvergne Métropole - Rapport prix et qualité eau potable, 2021 :

https://www.clermontmetropole.eu/fileadmin/user_upload/preserver_recycler/traitement_de_leau/ARS_2022/RPQS_eau_assainissement_2021_pour_web_V2.pdf

Clermont Auvergne Métropole - Bassins stockage eau

<https://www.clermontmetropole.eu/fr/les-grands-projets/grands-projets-pour-la-transition-energetique/creation-de-6-bassins-de-stockage-restitution/>

Clermont Auvergne Métropole - Agriculture

<https://www.clermontmetropole.eu/les-grands-projets/dossier-agriculteurs-a-tout-faire/>

Cycle de l'eau - Clermont Auvergne Métropole :

<https://www.clermontmetropole.eu/preserver-recycler/eau-et-assainissement/>

DRAAF Auvergne Rhône Alpes - Surfaces agricoles - : https://draaf.auvergne-rhone-alpes.agriculture.gouv.fr/IMG/html/fts_ra2020_clermont_auvergne_metropole.html

Eau en France : <https://www.eaufrance.fr/>

Eau Seine et Marne - Pluviométrie et recharge nappes : <https://eau.seine-et-marne.fr/fr/pluviometrie-et-recharge-des-nappes-deau-souterraine#:~:text=36%25%20alimentent%20les%20masses%20d,la%20r%C3%A9alimentation%20des%20nappes%20souterraines>

FAO - Eau en agriculture : <https://www.fao.org/3/y4683f/y4683f07.htm>

GEO - A Volvic, la raréfaction de l'eau est une source d'inquiétudes

<https://www.geo.fr/environnement/a-volvic-la-rarefaction-de-leau-est-une-source-dinquiétudes-204859>

France Environnement - Recover, système recyclage de l'eau

[:https://www.franceenvironnement.com/produit/recover](https://www.franceenvironnement.com/produit/recover)

La Montagne - Fonctionnement nappes phréatiques

https://www.lamontagne.fr/clermont-ferrand-63000/actualites/comment-fonctionnent-les-nappes-phreatiques-l-exemple-dans-le-puy-de-dome_13684040/

Météo France - Climat Clermont-Ferrand

<https://meteofrance.com/climat/normales/france/auvergne-rhone-alpes/CLERMONT-FD>

Ministère la transition écologique - Ressources et utilisation de l'eau -

[https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/leau-en-france-ressource-et-utilisation-synthese-des-connaissances-en-2021#:~:text=L%27agriculture%20est%20la%20premi%C3%A8re,les%20usages%20industriels%20\(4%20%25\)](https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/leau-en-france-ressource-et-utilisation-synthese-des-connaissances-en-2021#:~:text=L%27agriculture%20est%20la%20premi%C3%A8re,les%20usages%20industriels%20(4%20%25))

OFB - Prélèvements eau

<https://professionnels.ofb.fr/fr/node/45#:~:text=Pour%20les%20autres%20principaux%20usages,et%201%27irrigation%207%20%25>

OPGC - <https://opgc.uca.fr/site-instrumente/co-pdd/les-nuages-1>

Planète vie - Eau et agriculture <https://planet-vie.ens.fr/thematiques/ecologie/l-eau-et-les-activites-agricoles>

SAGE Mayenne Guide sensibilisation économies d'eau

https://www.gesteau.fr/sites/default/files/doc_SAGE04018-1242832721.pdf

SAGE : <https://sage-allier-aval.fr/>

SELECTRA - Consommation d'eau par personne et par usage

<https://selectra.info/energie/eau/consommation>



Diagramme Flux Stocks de l'eau

