




COMITE DE SUIVI DU POST-DOCTORAT SUR L'IMPLUVIUM DE VOLVIC

Synthèse hydrogéologique et amélioration des connaissances sur l'impluvium de
Volvic, élaboration d'un modèle de fonctionnement de l'hydrosystème

OBJECTIF ET PROGRAMME DU POSTDOCTORAT

→ ***" Mieux appréhender le fonctionnement de l'Impluvium de Volvic et identifier les causes de la baisse du débit naturel en front de coulées notamment en période d'étiage "***

- 
- ① Définir la recharge, sa saisonnalité et donc la pérennité de ces masses au cours de l'année et notamment en période d'étiage ;
 - ② Savoir s'il existe une ou plusieurs masses d'eau dans l'impluvium ;
 - ③ Préciser les temps de transfert entre la zone d'infiltration et les sources de front de coulées ;
 - ④ Anticiper l'évolution quantitative de ces potentielles masses d'eau face au changement climatique global.



OBJECTIF ET PROGRAMME DU POSTDOCTORAT

➔ " **Mieux appréhender le fonctionnement de l'Impluvium de Volvic et identifier les causes de la baisse du débit naturel en front de coulées notamment en période d'étiage** "

février 2022 -> octobre 2023

1^{er} Volet : Synthèse bibliographique et collecte de données

- Synthèse des données brutes existantes et/ou leur analyse critique
- Définition de mesures ou analyses complémentaires à réaliser
- Campagnes de terrain

2^e Volet : Approche du fonctionnement du bassin de Volvic au travers d'un suivi géochimique de la ressource

- Analyses chimiques à l'échelle du bassin versant (éléments majeurs + traces), isotopes ($^{18}\text{O}/^2\text{H}$) et traceurs (CFC, gaz nobles, tritium) en étiage et en période de hautes eaux
- Datation des eaux souterraines
- Proposition de modèle conceptuel de fonctionnement hydrogéologique basé sur la chimie, les isotopes, la datation des eaux et les observations du suivi mis en place



juin 2022 -> mai 2024

Rapport partie 1 : Modèle conceptuel (transmis le 15/06/2024)



3^{ème} Volet Outil d'aide à la gestion / Modélisation numérique

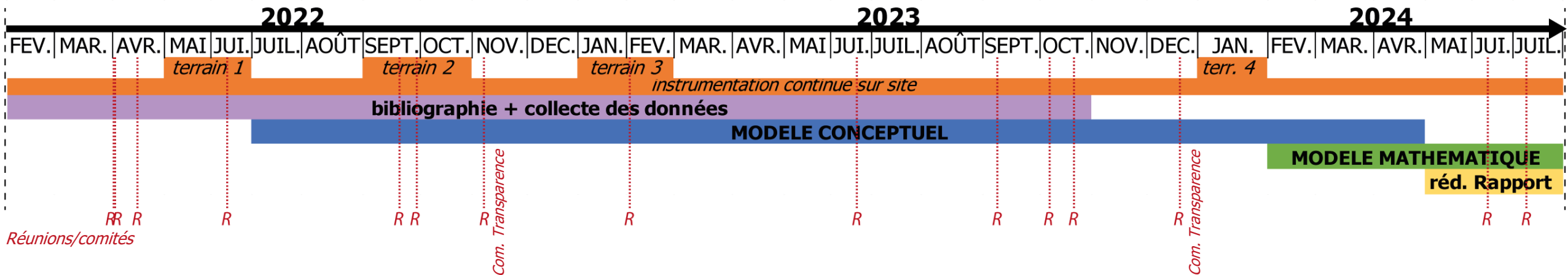
- Modèle mathématique (boîte noire) entrées/sorties
- Simulations prospectives : test de différents scénarii (dérive climatique ou modifications des prélèvements) et estimation de leur impact sur la ressource
- Transfert du modèle + utilisation aux gestionnaires fin 2024

juin-juillet 2024



Rapport partie 2 : Modèle numérique (transmis le 26/07/2024)

CHRONOLOGIE DU POST-DOCTORAT

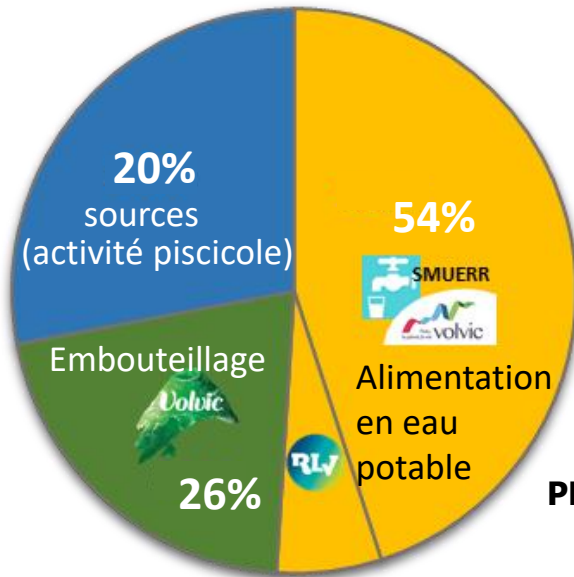


- 4 campagnes de terrain (terrain n°4 : validation des résultats terrain 2 et 3)
- Instrumentation en continu sur le terrain
- Travail de bibliographie tout au long de l'étude
- Prolongation de 6 mois : finaliser modèle conceptuel (dont validation par terrain 4)
+ travail sur le modèle mathématique + rédaction du rapport



CAS D'ÉTUDE : LE BASSIN VERSANT DE VOLVIC

↳ Les usages de l'eau sur le bassin versant

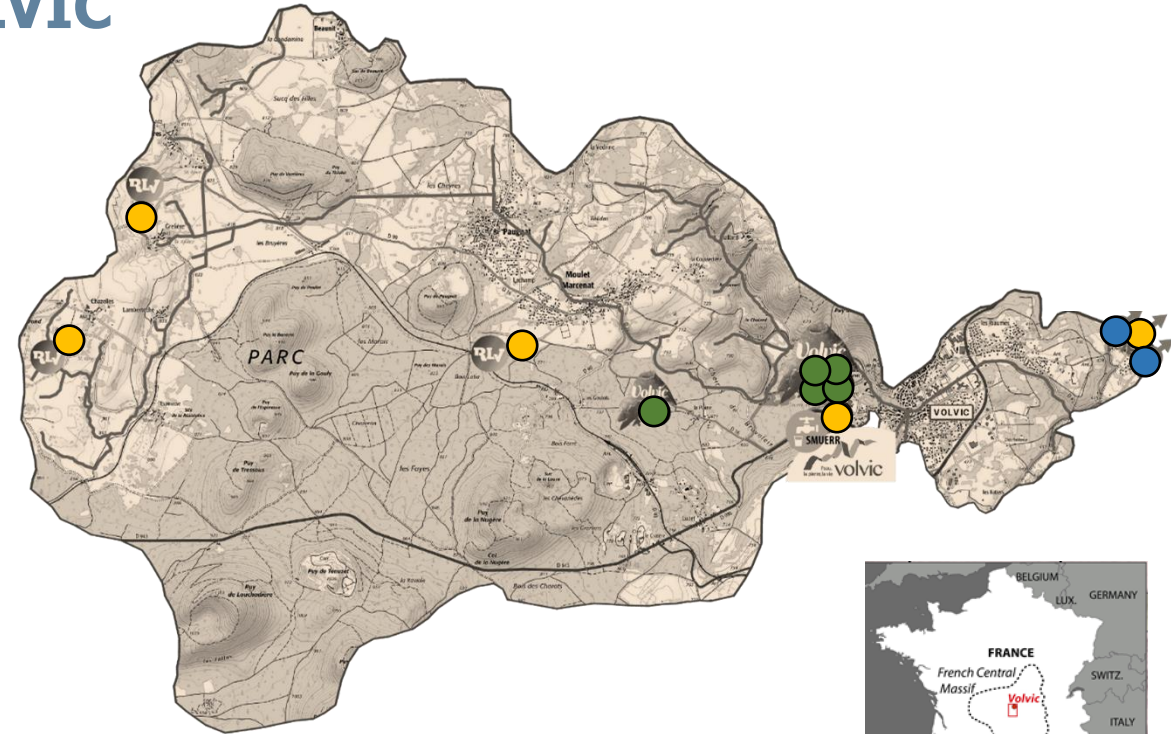


PRÉLÈVEMENTS (80% DE LA RESSOURCE):

- 2/3 Alimentation en eau potable
 - SMUERR : 5.3 Mons m³/an (autorisation)
 - RLV : 400 000 m³/an (autorisation)
- 1/3 Embouteillage par la Société des Eaux de Volvic, Danone
 - 2,5 Mons de m³/an (autorisation depuis 2021)

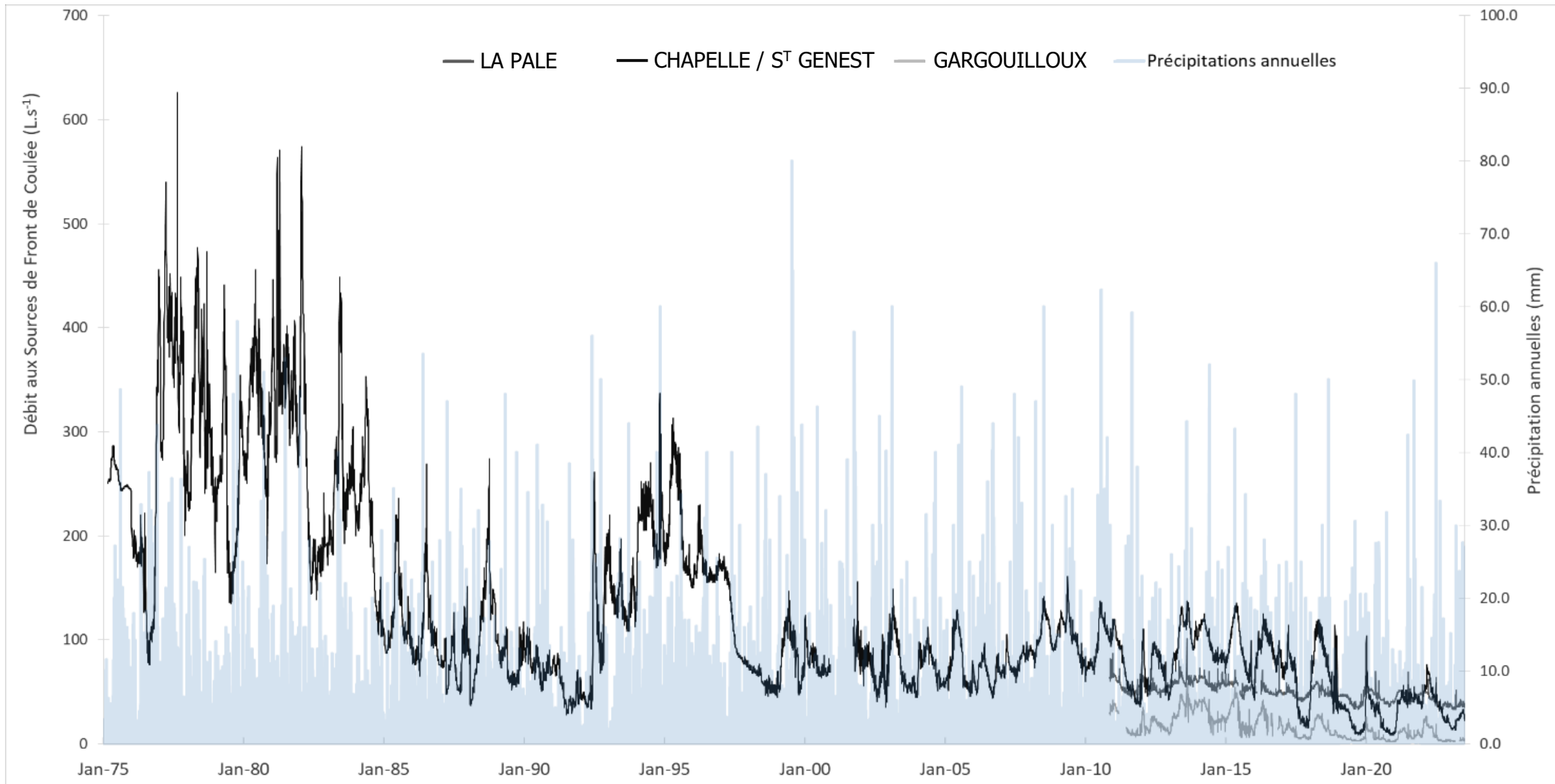
AUTRES USAGES (SOURCES – 20 %)

- Exploitation piscicole : activité existant depuis le XVIIIème siècle
- Agrément pour riverains
- Alimentation de cours d'eau



CAS D'ÉTUDE : LE BASSIN VERSANT DE VOLVIC

↳ **Problématique : Diminution des débits aux Sources de Front de Coulées**



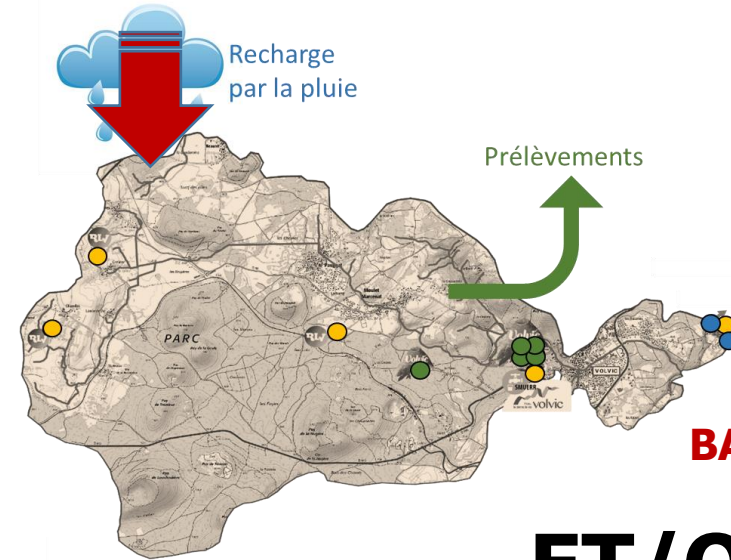
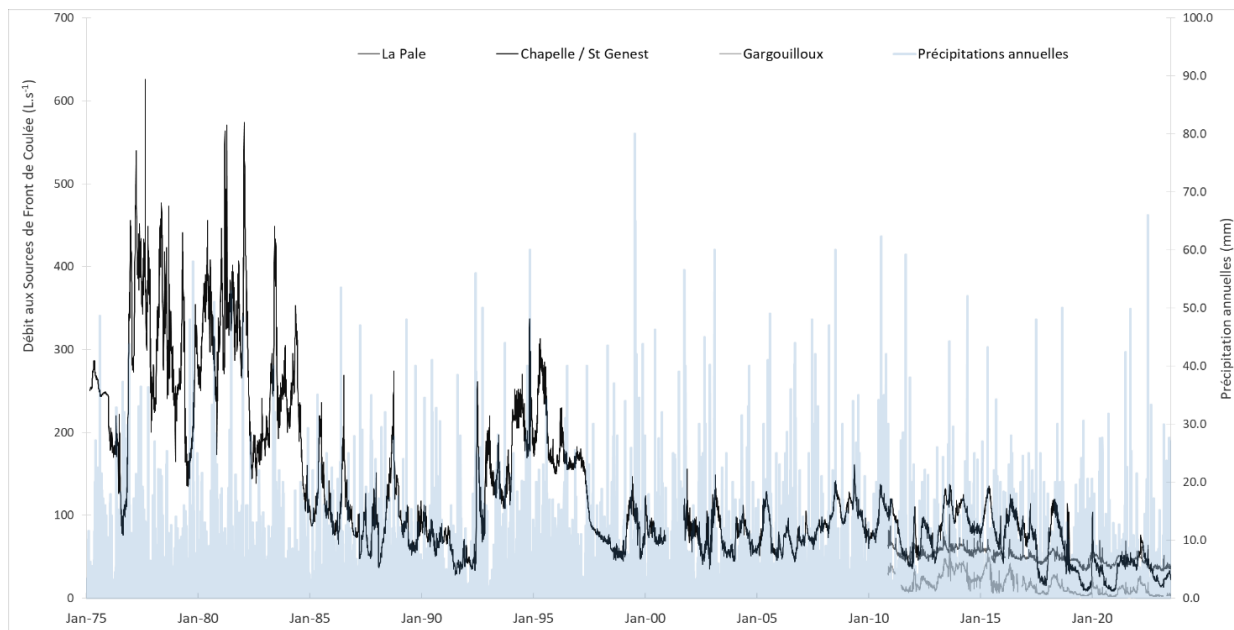
Débits (l/s) entre mars 1975 et août 2022 mesurés aux sources de front de coulée par les stations de la DREAL (données disponibles sur <https://hydro.eaufrance.fr/>)



CAS D'ÉTUDE : LE BASSIN VERSANT DE VOLVIC

↳ *Identifier les causes de la baisse du débit dans les sources, notamment en période d'étiage*

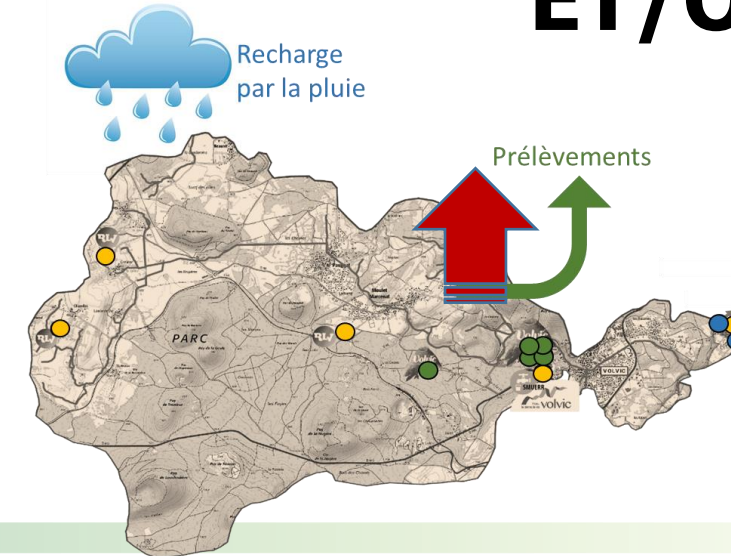
BAISSE DES DÉBITS AUX EXUTOIRES DU BASSIN VERSANT



BAISSE DE LA RECHARGE ?

ET/OU

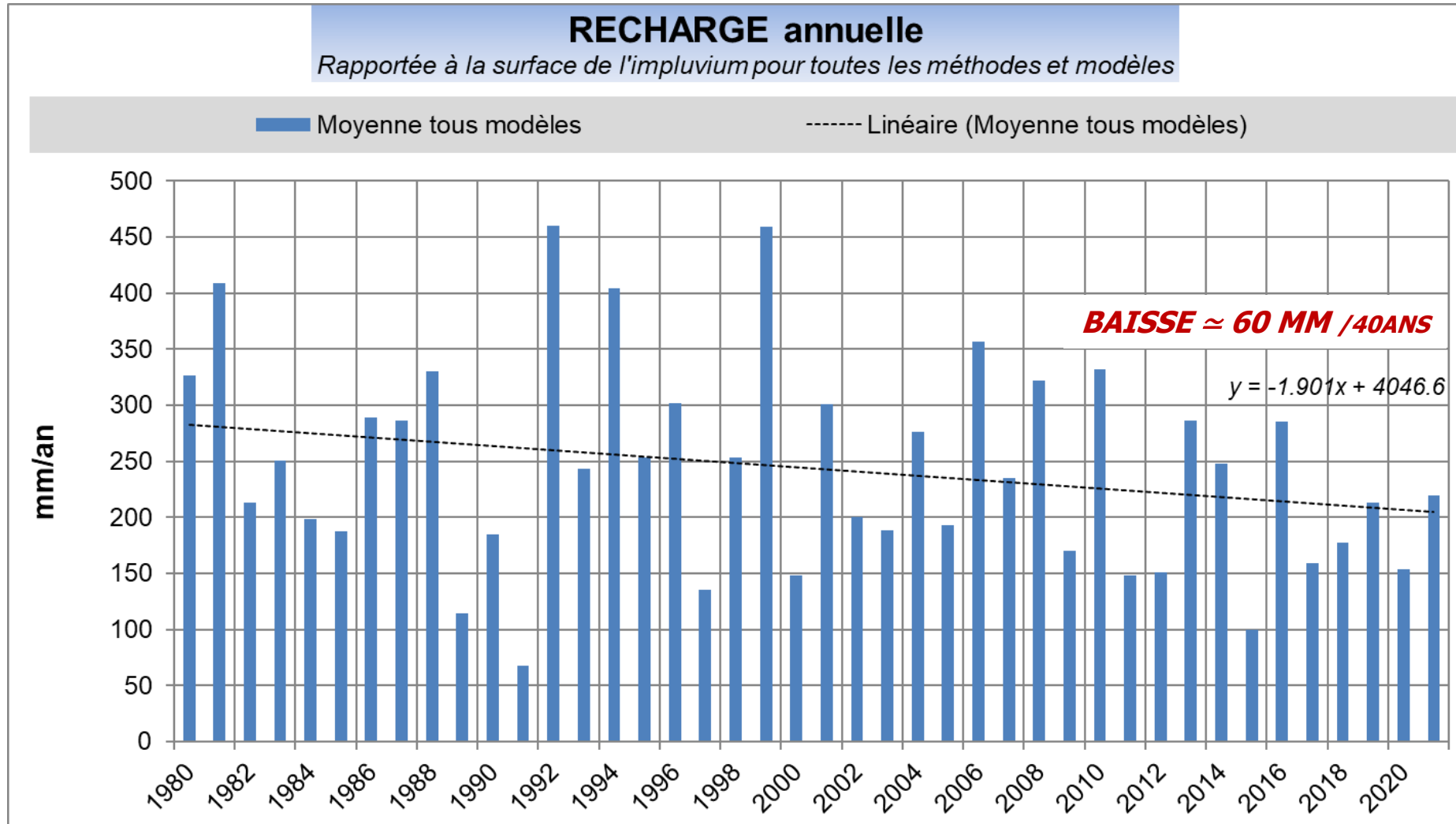
**AUGMENTATION DES
PRELEVEMENTS ?**



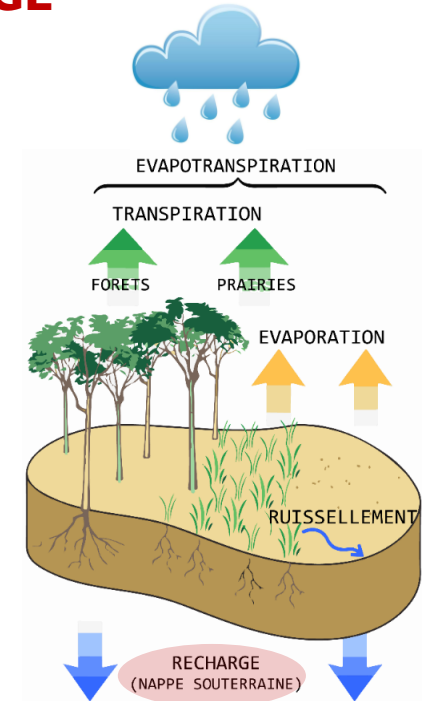
CAS D'ÉTUDE : LE BASSIN VERSANT DE VOLVIC

↳ Diminution de la recharge

↘ RECHARGE



Recharge annuelle au niveau de l'Impluvium de Volvic (moyenne méthodes d'après ESPERE®) sur la période 1980-2021.

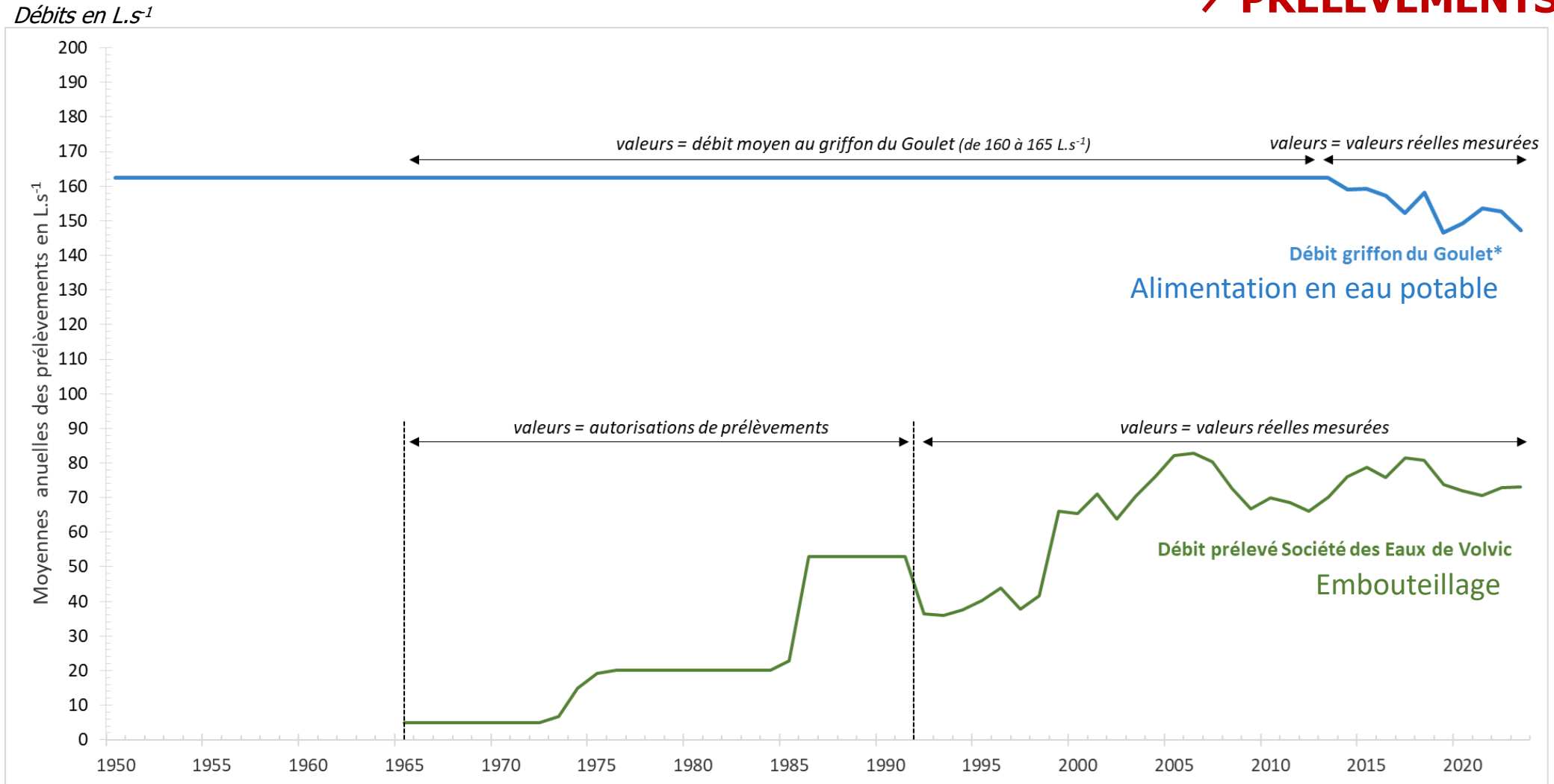


= eau qui s'infiltre à travers le sol, percole dans la zone non saturée et qui **alimente la nappe** (réservoir souterrain)

CAS D'ÉTUDE : LE BASSIN VERSANT DE VOLVIC

↳ Augmentation des prélèvements

↗ **PRELEVEMENTS**



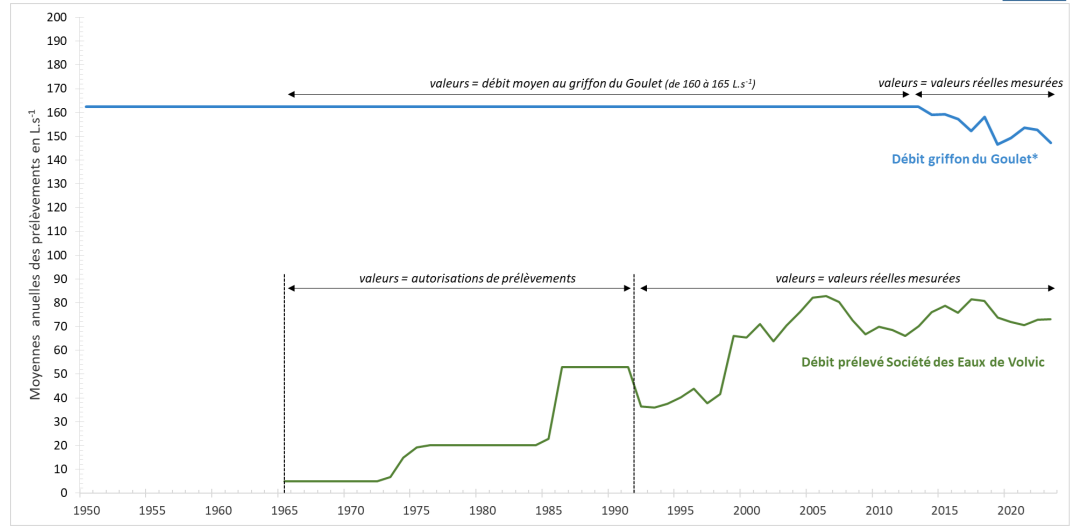
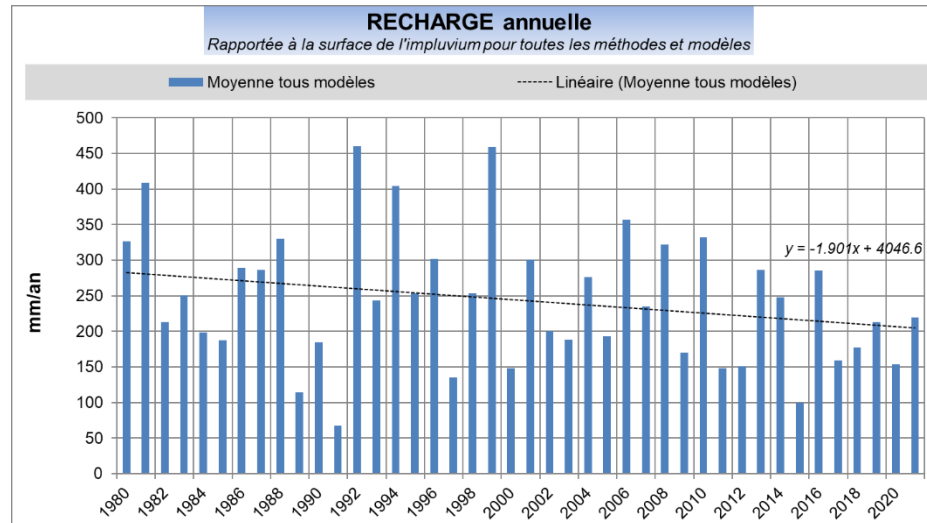
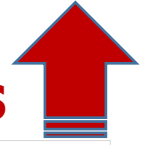
Moyennes annuelles des prélèvements AEP Goulet et de la Société des eaux de Volvic de 1950 à 2023 sur l'Impluvium de Volvic.



CAS D'ÉTUDE : LE BASSIN VERSANT DE VOLVIC

↳ *Identification de l'origine des baisses de débits constatées*

PRELEVEMENTS



RECHARGE

ET/OU

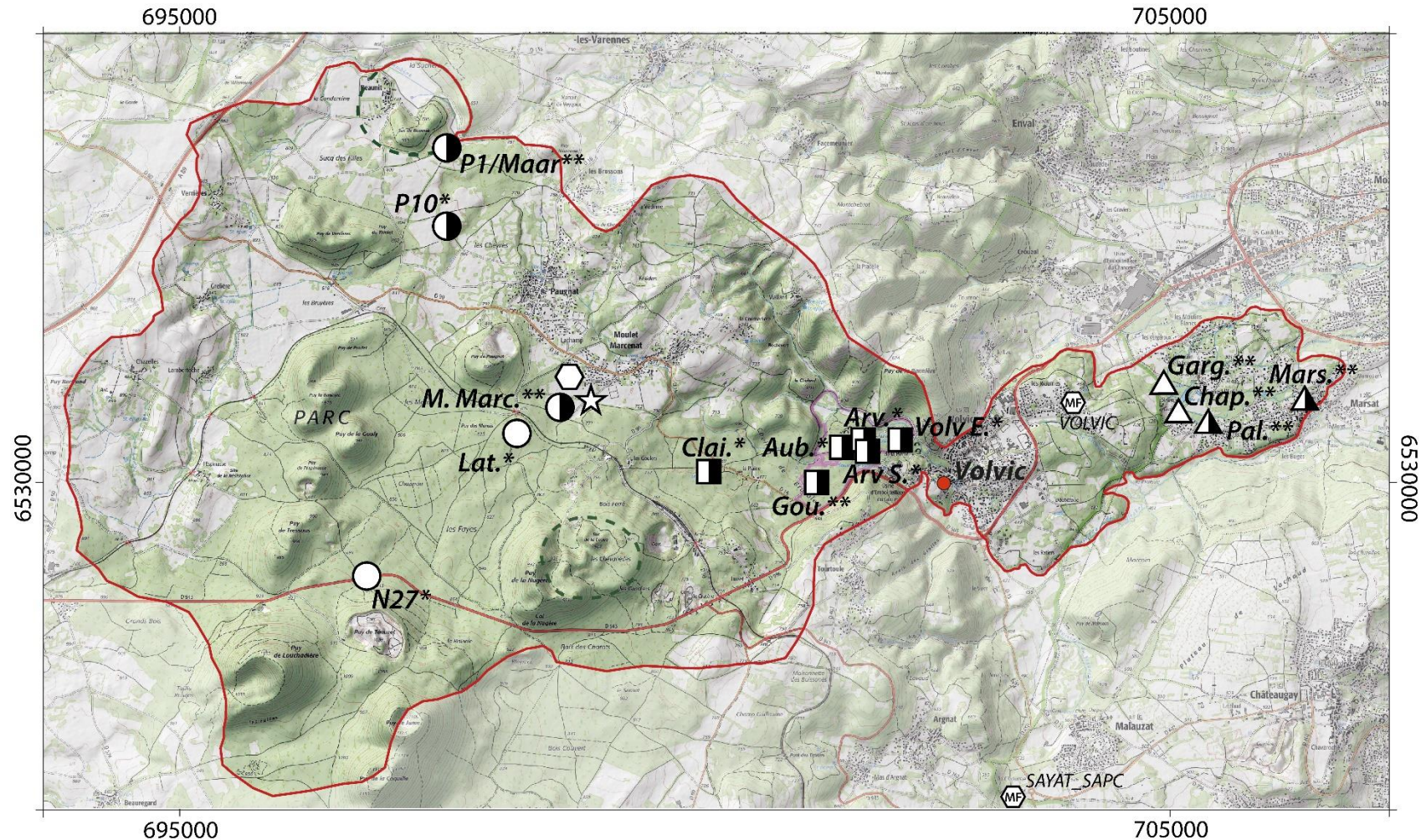
→ Développer un **MODÈLE CONCEPTUEL** de fonctionnement de l'hydrosystème



DÉFINITION D'UN MODÈLE CONCEPTUEL DE FONCTIONNEMENT



INSTRUMENTATION – Points de suivi de l'étude (version finale)



Instrumentation

- ⬡ Station météorologique Université
 - ⬢ MF Stations météorologiques Météo-France
 - ★ Collecteur isotopique Univ. (précipitations)
- Suivi Conductivité électrique, *BRGM
température, niveau d'eau **Université

Points de prélèvement

échantillons éléments majeurs + tritium

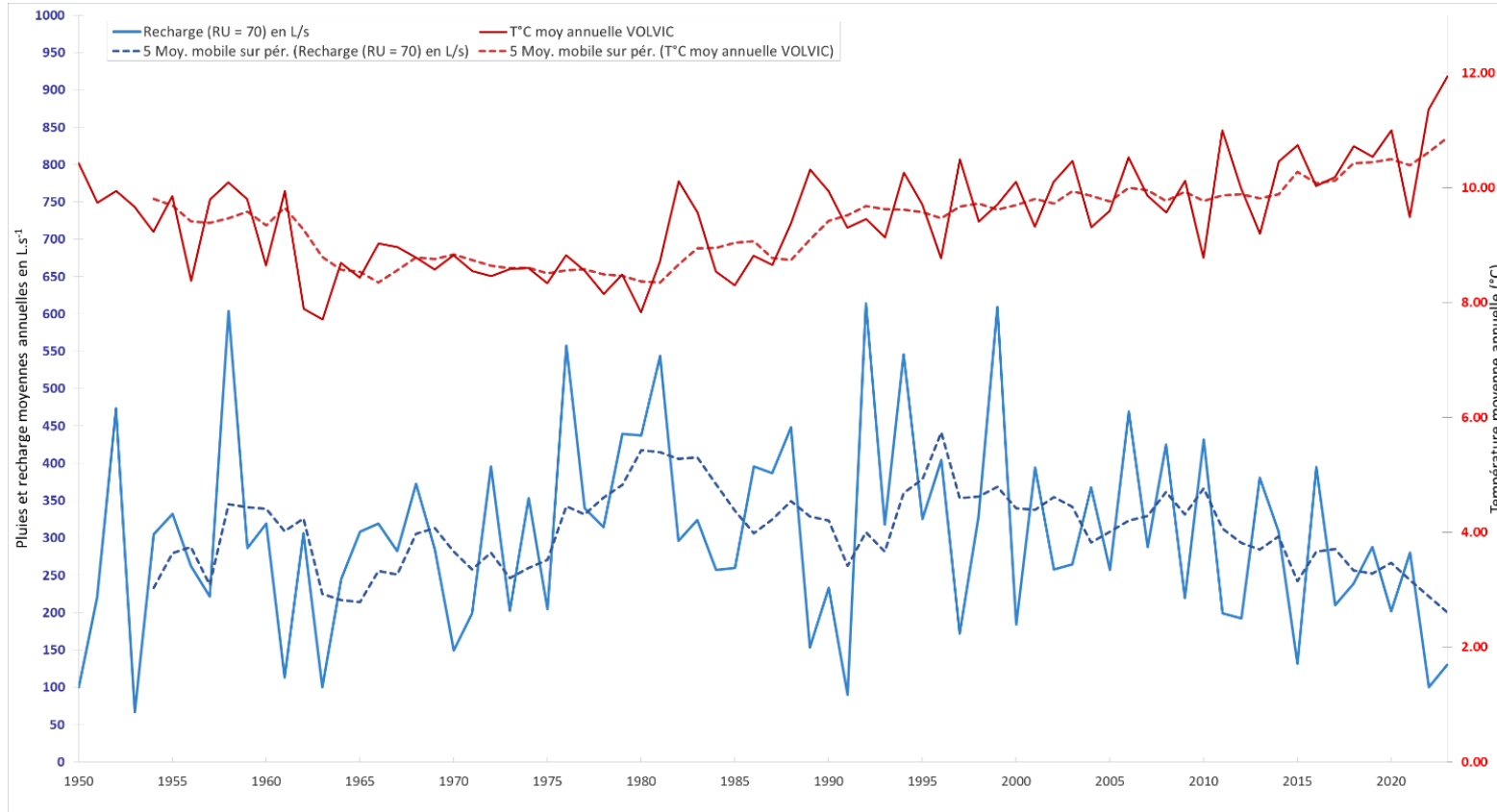
- Haut du bassin versant
- Secteur du goulet
- △ Bas du bassin versant

échantillons CFC

- Haut du bassin versant
- Secteur du goulet
- ▲ Bas du bassin versant

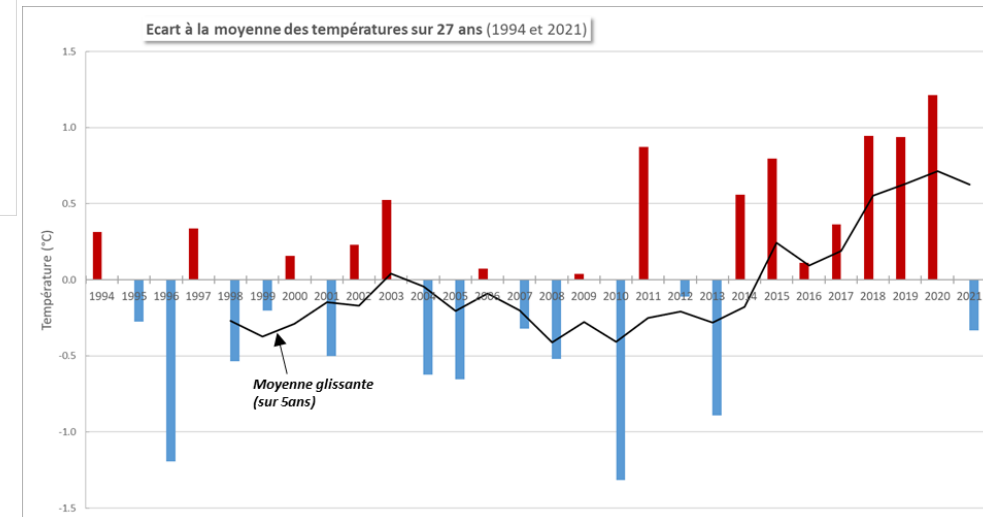


CLIMATOLOGIE – Synthèse climatique et calcul de la recharge



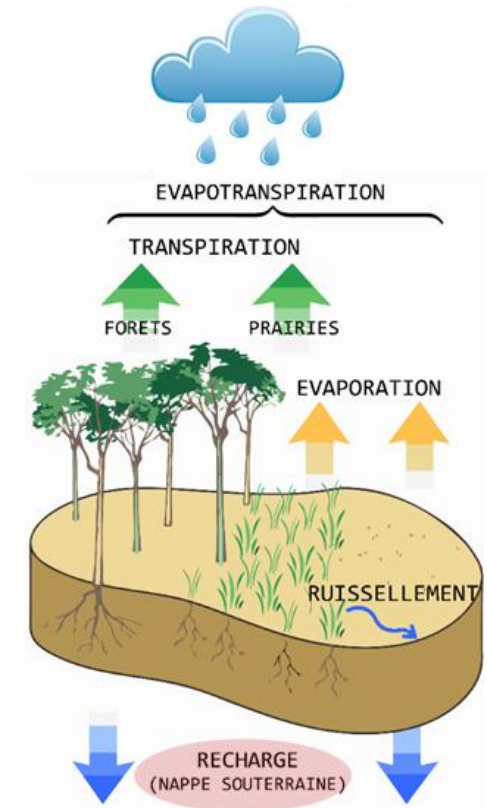
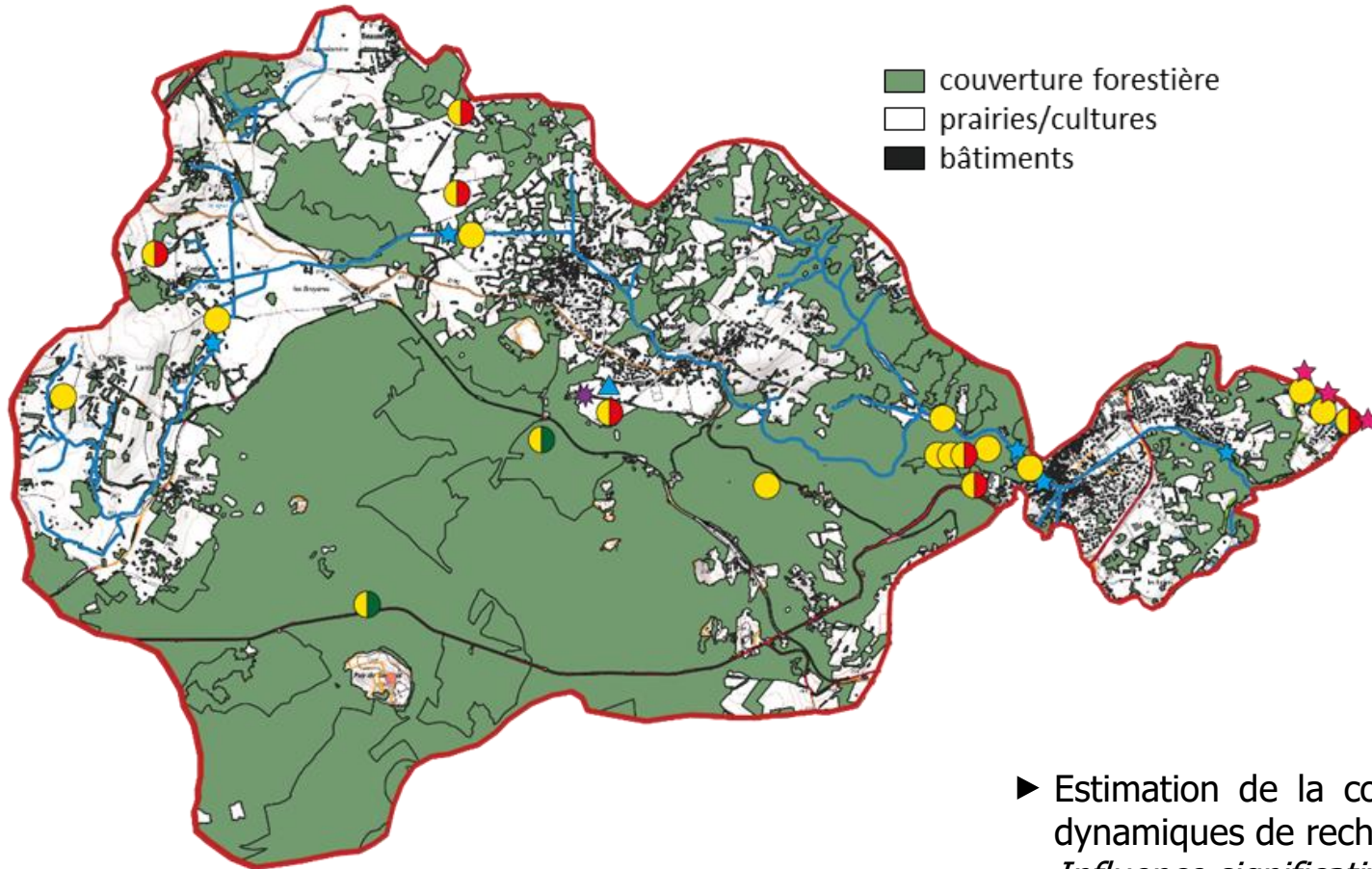
► Baisse de la recharge marquée depuis 1995

► Augmentation des températures moyennes annuelles, accentuation du phénomène au cours des dernières années avec des valeurs supérieures à la moyenne depuis 2010.



CLIMATOLOGIE – Synthèse climatique et calcul de la recharge

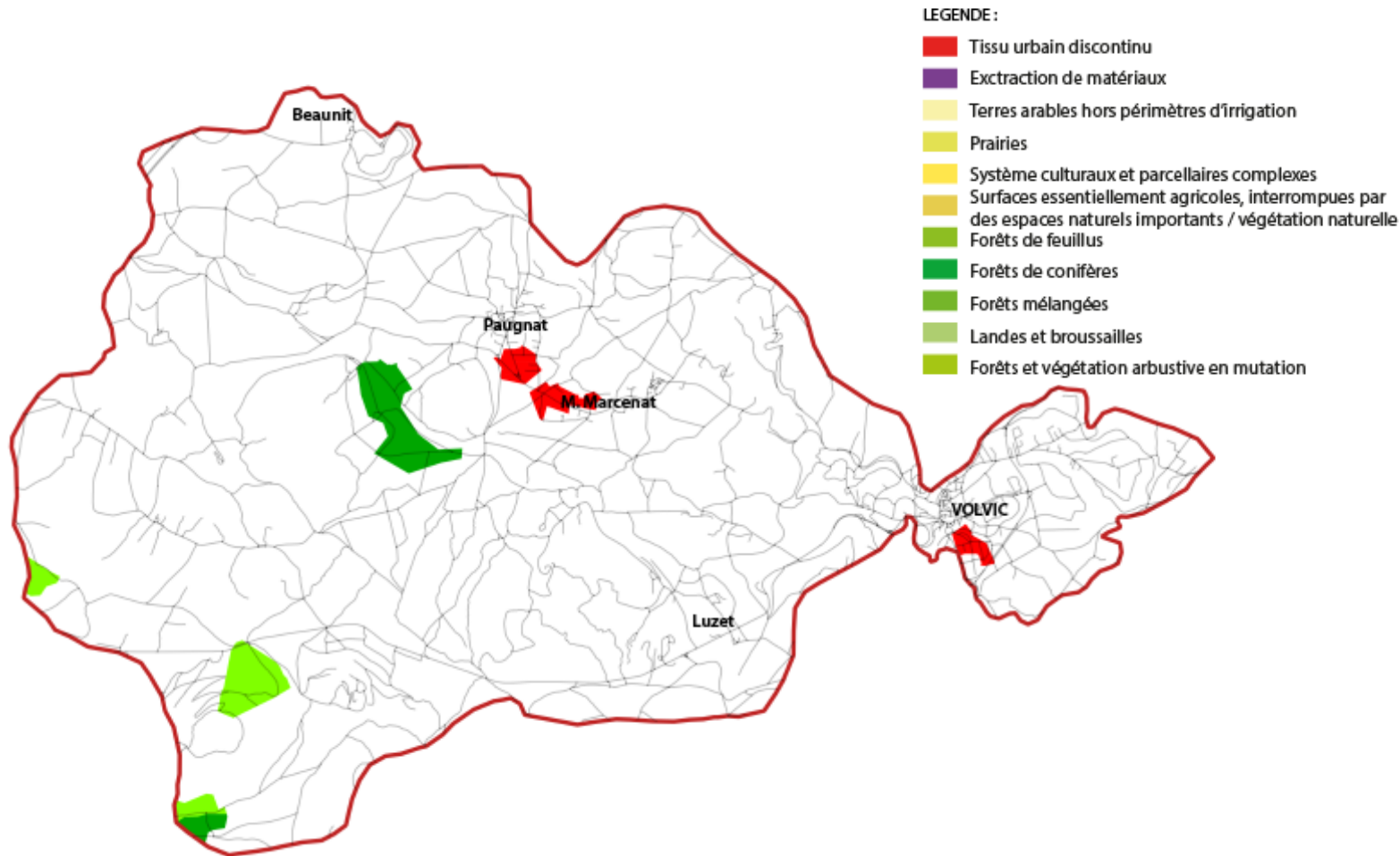
↳ *Occupation des sols (travail en amont de l'estimation de la recharge)*



- ▶ Estimation de la couverture végétale essentielle pour comprendre les dynamiques de recharge des eaux souterraines.
Influence significative sur : taux d'infiltration, évaporation, transpiration.

CLIMATOLOGIE – Synthèse climatique et calcul de la recharge

↳ Occupation des sols (travail en amont de l'estimation de la recharge)



1990-2018

Légère augmentation des surfaces urbaines 0.24 km² (0.6% de la superficie de l'Impluvium de Volvic)

Pas de variation de surfaces de prairies et/ou cultures

Pas de variations des surfaces forestières (modification feuillus → conifères).

Corine Land Cover : carte des changements d'occupation des sols de l'Impluvium de Volvic entre 1990 et 2018

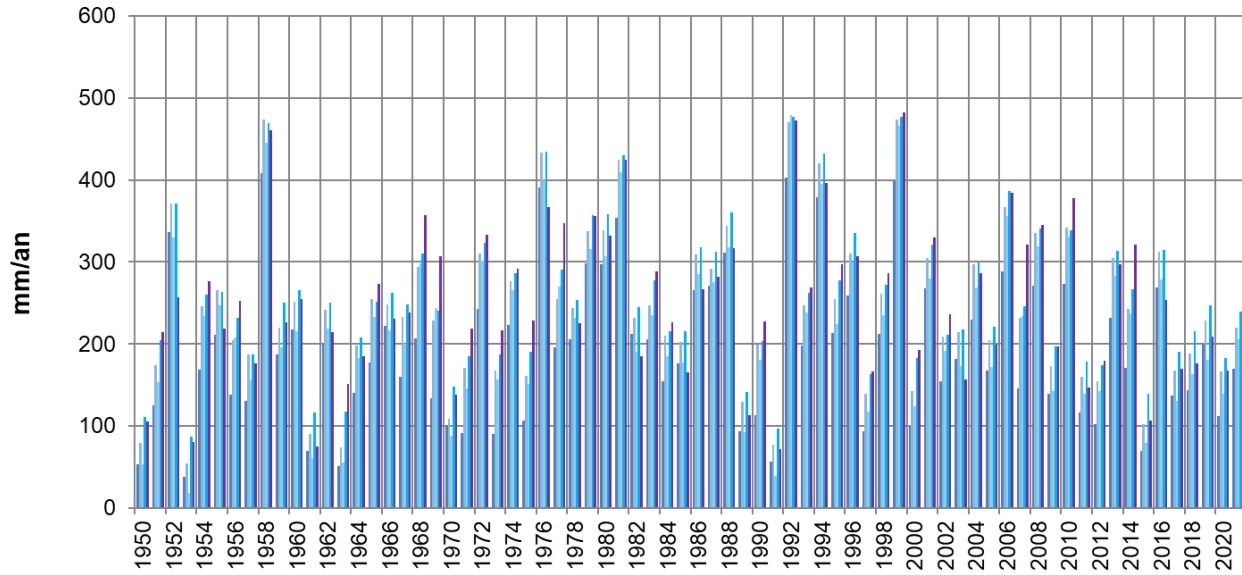
► Pas d'influence notable sur le calcul de la recharge

CLIMATOLOGIE – Synthèse climatique et calcul de la recharge

RECHARGE annuelle

Rapportée à la surface de l'impluvium pour toutes les méthodes et modèles

■ Thornthwaite ■ Dingman ■ Dingman-Hamon ■ Edijatno & Michel ■ Turc

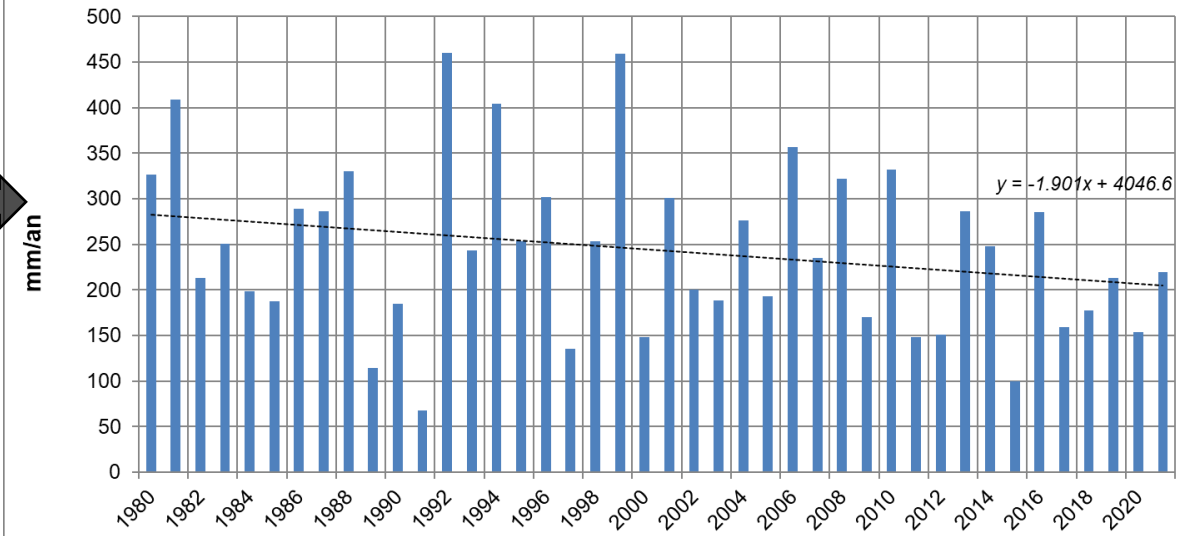


Recharge annuelle au niveau de l'Impluvium de Volvic par méthode de calcul (d'après ESPERE®) sur la période 1950-2021

RECHARGE annuelle

Rapportée à la surface de l'impluvium pour toutes les méthodes et modèles

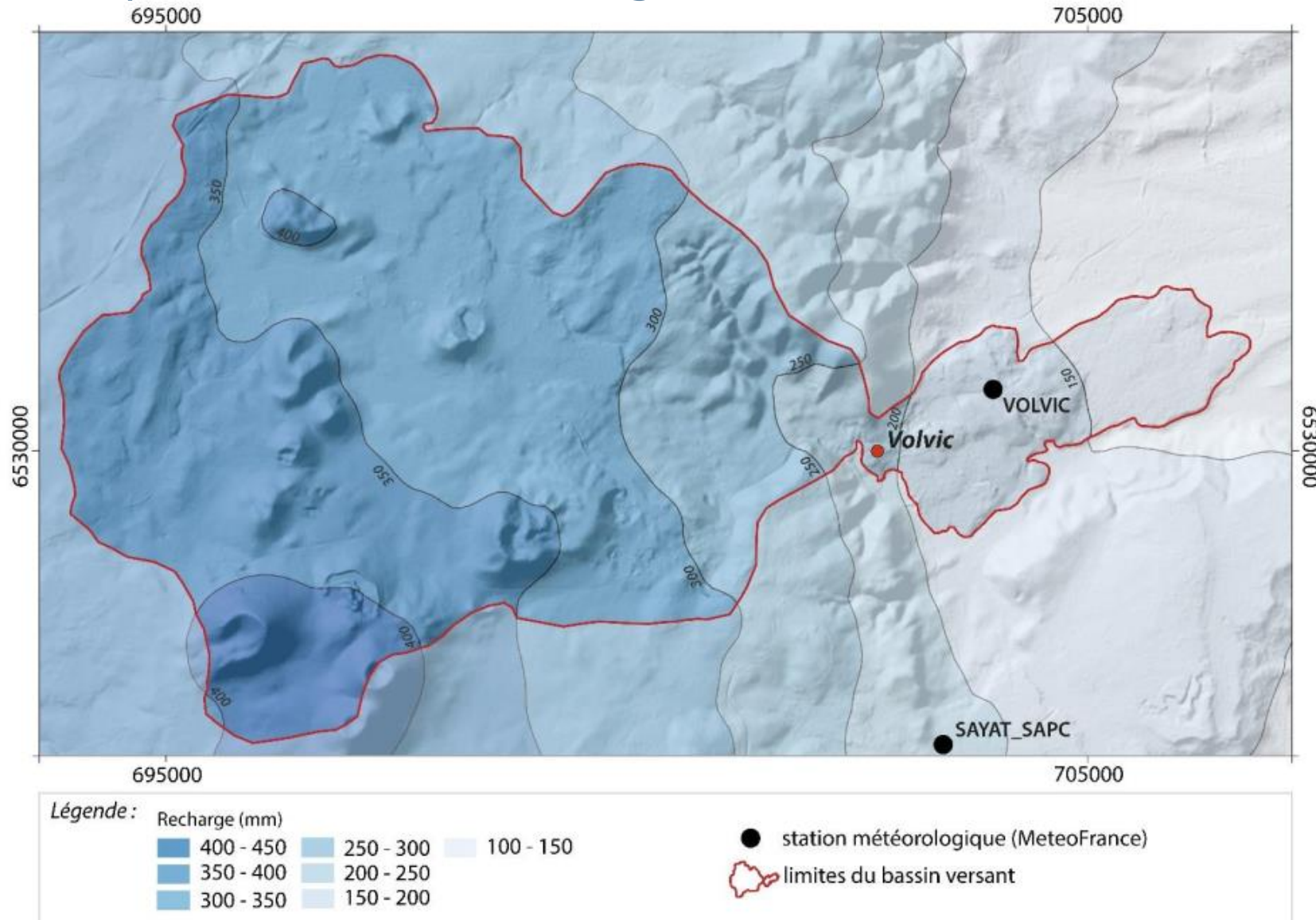
■ Moyenne tous modèles Linéaire (Moyenne tous modèles)



Recharge annuelle au niveau de l'Impluvium de Volvic (moyenne méthodes d'après ESPERE®) sur la période 1980-2021.

- ▶ Calcul de la recharge avec la feuille de calcul ESPERE (BRGM) permettant d'utiliser plusieurs méthodes d'estimation de la recharge d'un aquifère.
- ▶ **Utilisation de la moyenne des méthodes pour la définition de la recharge.**

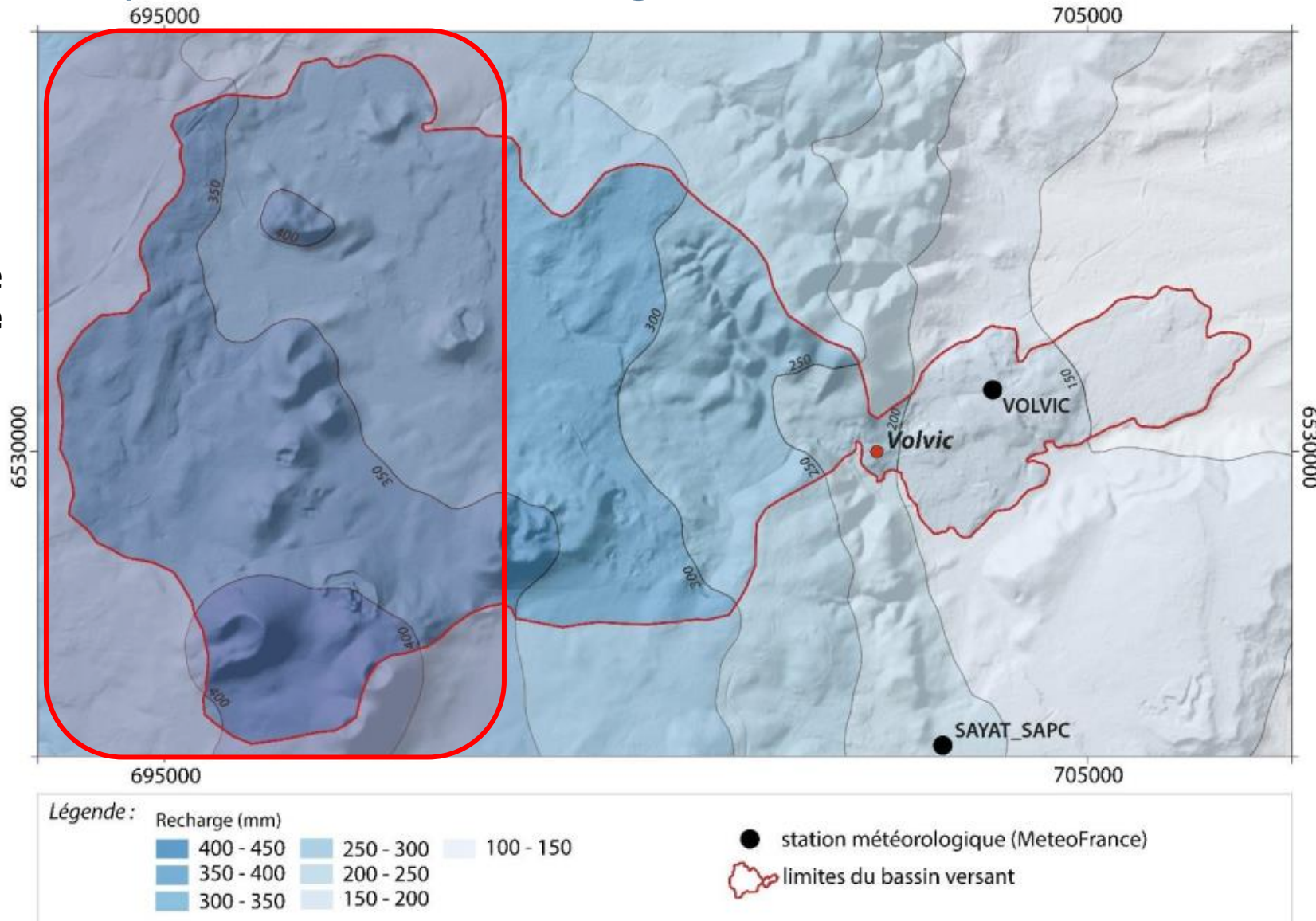
CLIMATOLOGIE – *Spatialisation de la recharge*



Carte de la recharge spatialisée sur l'impluvium de Volvic sur la période 2000-2021.

CLIMATOLOGIE – Spatialisation de la recharge

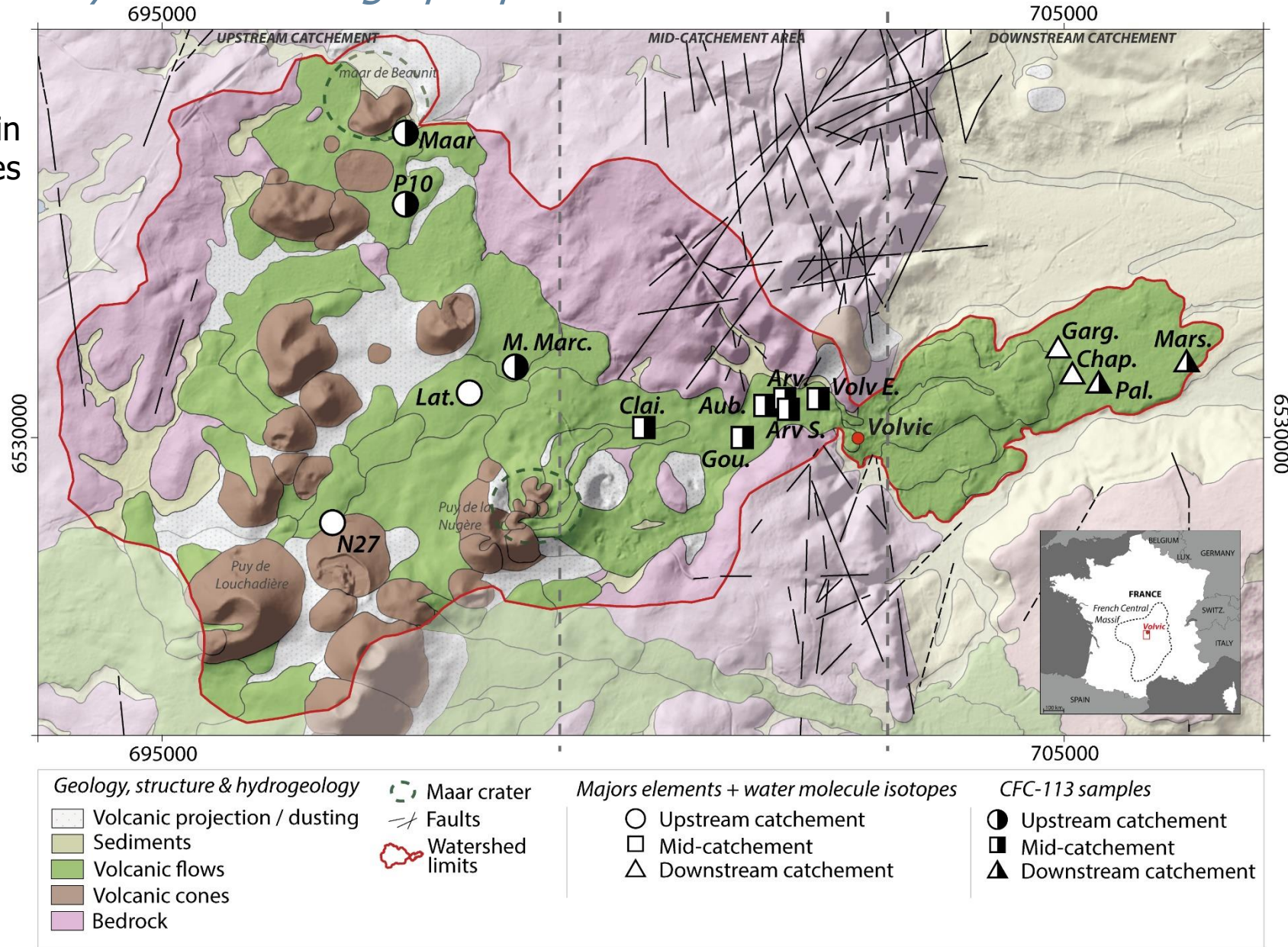
► Recharge majoritaire dans la **partie haute** du bassin versant.



Carte de la recharge spatialisée sur l'impluvium de Volvic sur la période 2000-2021.

GÉOLOGIE – synthèse bibliographique

► limites du bassin versant d'après Aumar, 2022.



► Propriétés hydrodynamiques :

(Joux, 2002 ; Rouquet 2012 ; Aumar, 2022)

Socle imperméable

Edifices volcaniques

Porosité : 40 à 45 %

Perméabilité : 10^{-2} m/s

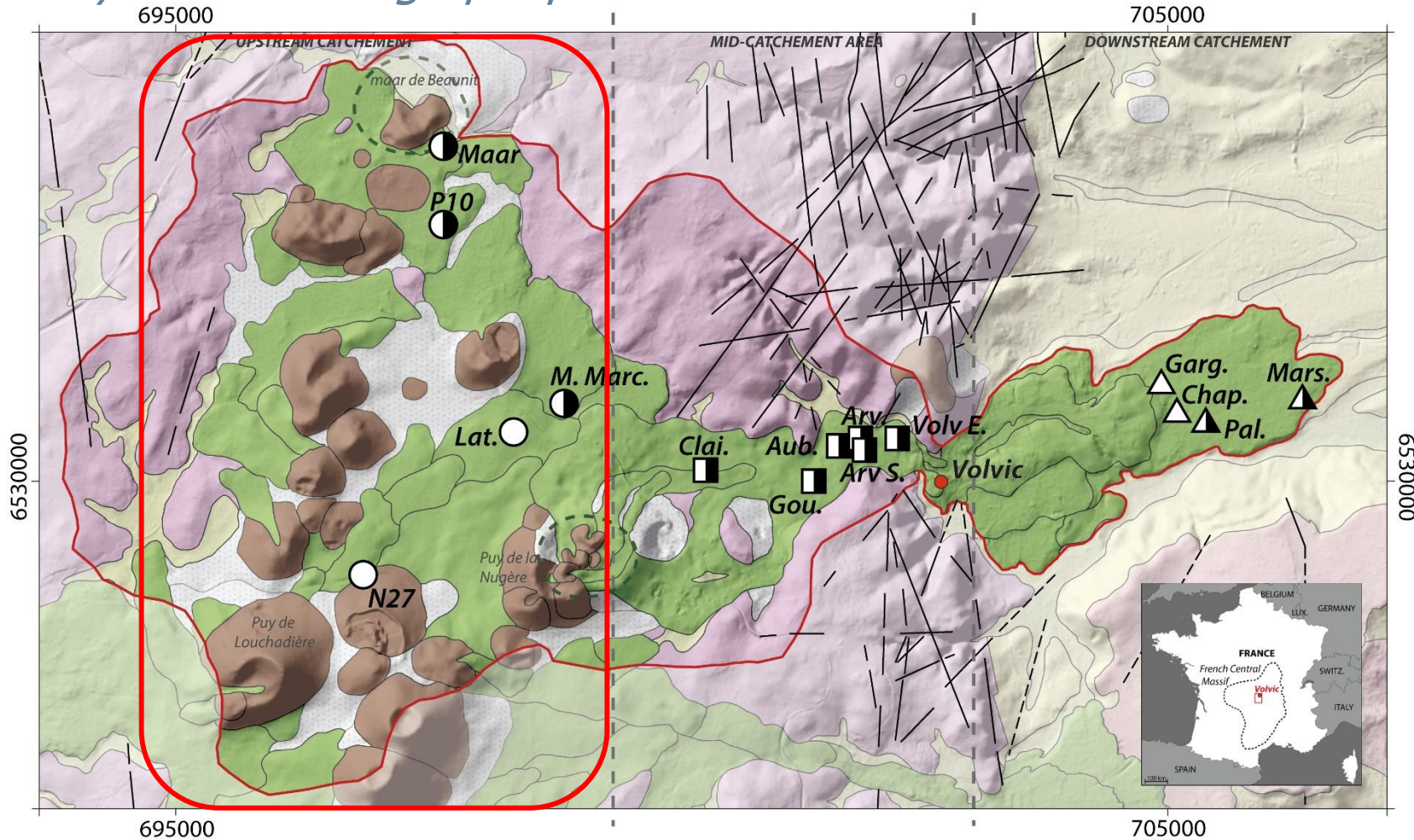
Coulées de laves

Porosité : 15 %

Perméabilité : 10^{-3} - 10^{-4} m/s

GÉOLOGIE – synthèse bibliographique

► les **zones de recharge majoritaire** correspondent aux **cônes de scories très poreux et perméables**



► Propriétés hydrodynamiques :

(Joux, 2002 ; Rouquet 2012 ; Aumar, 2022)

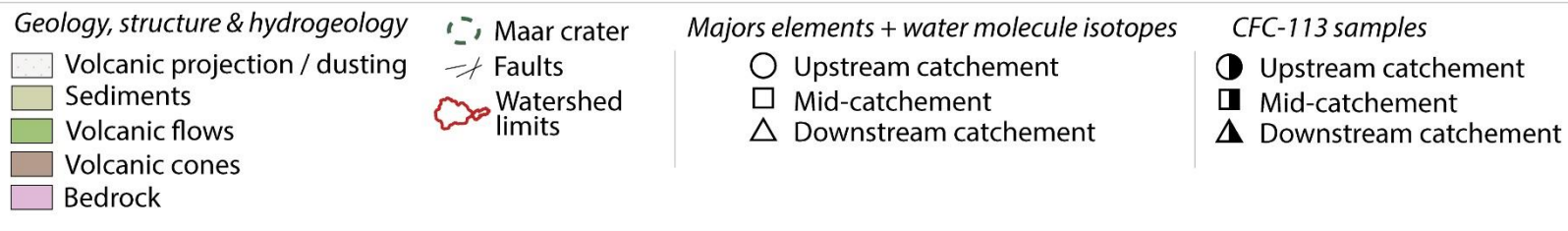
Socle imperméable

Edifices volcaniques

Porosité : 40 à 45 %
Perméabilité : 10^{-2} m/s

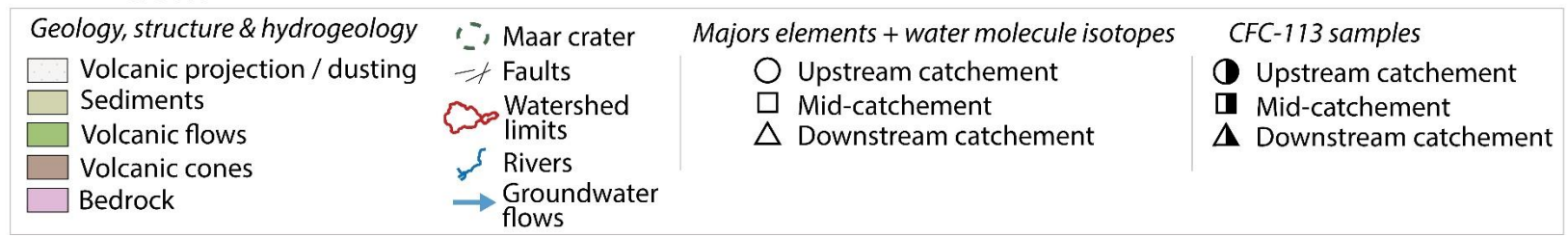
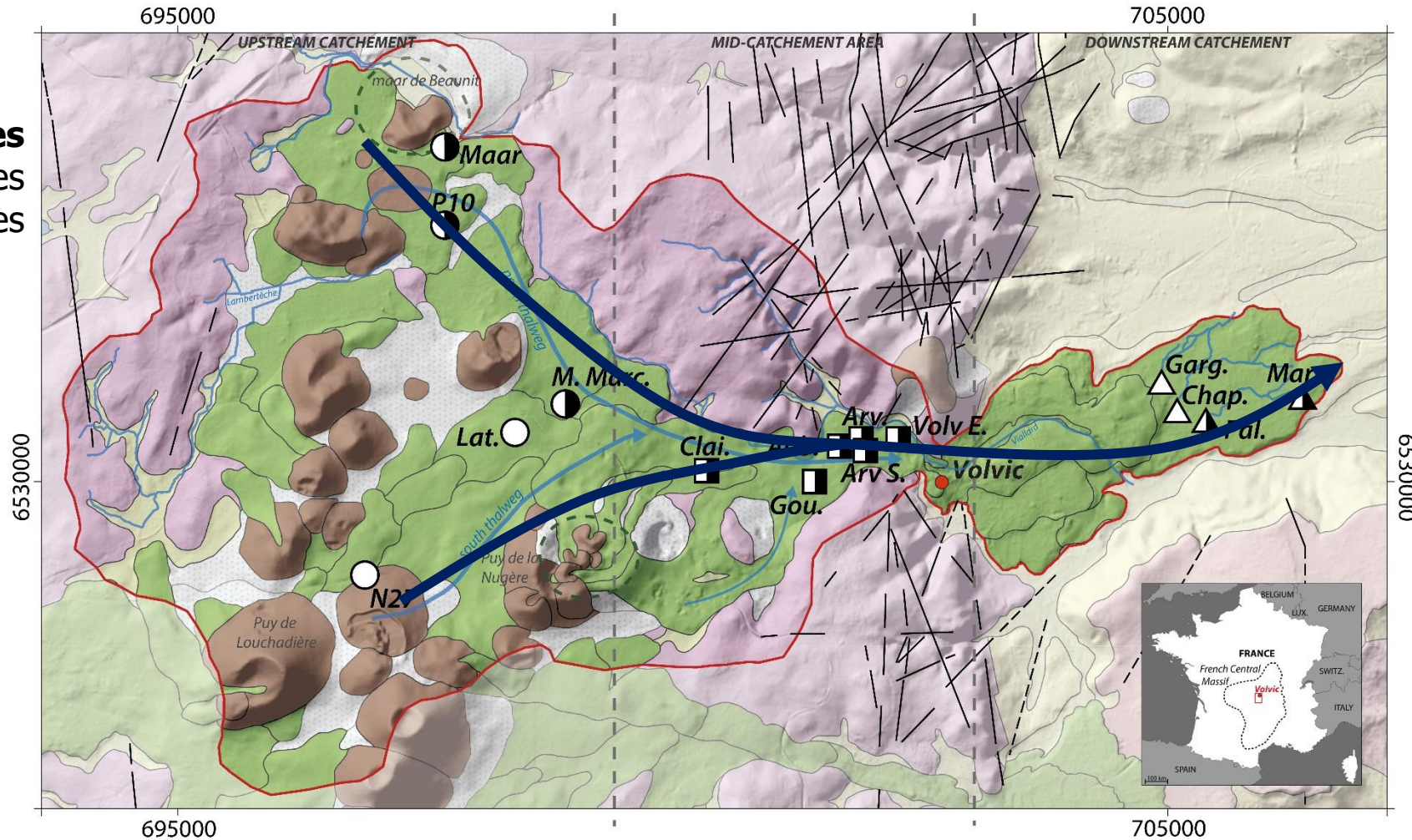
Coulées de laves

Porosité : 15 %
Perméabilité : 10^{-3} - 10^{-4} m/s



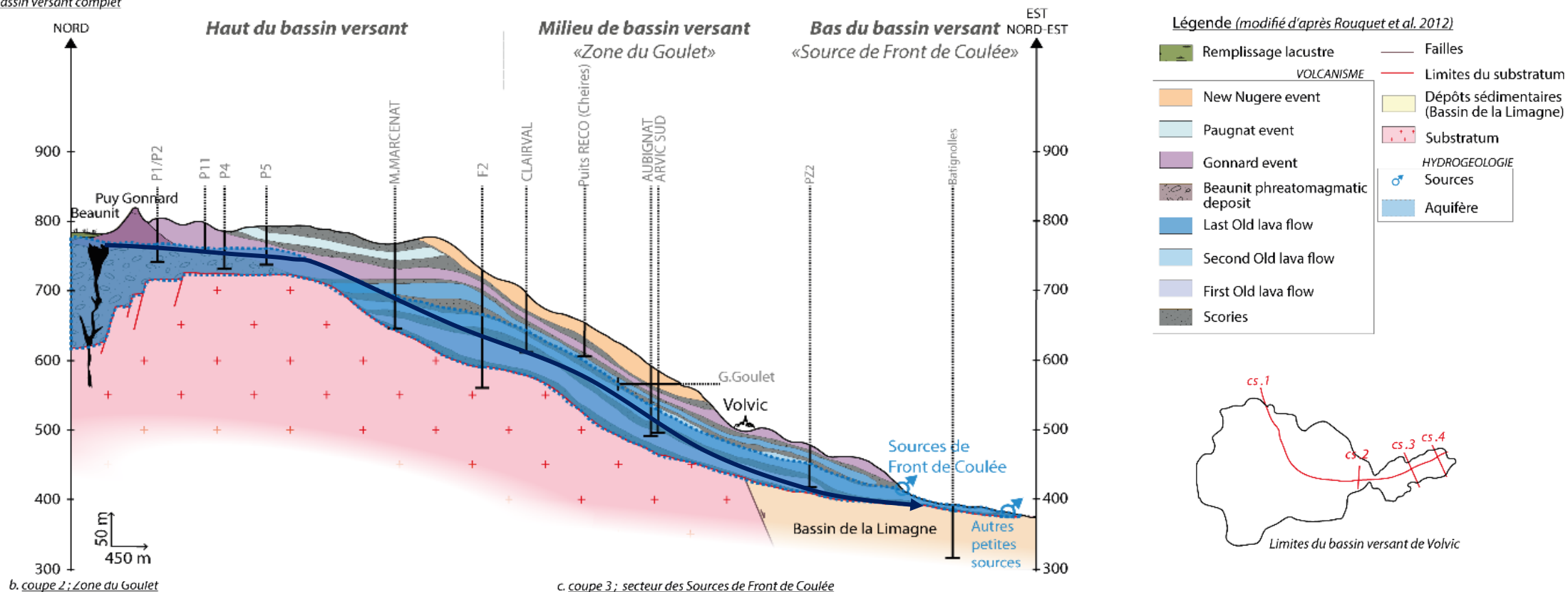
HYDROGÉOLOGIE – *synthèse bibliographique – organisation des écoulements*

► **Axes d'écoulement des eaux souterraines**

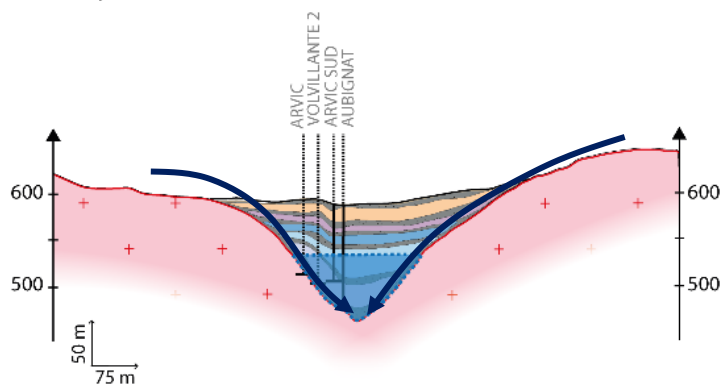


HYDROGÉOLOGIE – synthèse bibliographique – organisation des écoulements

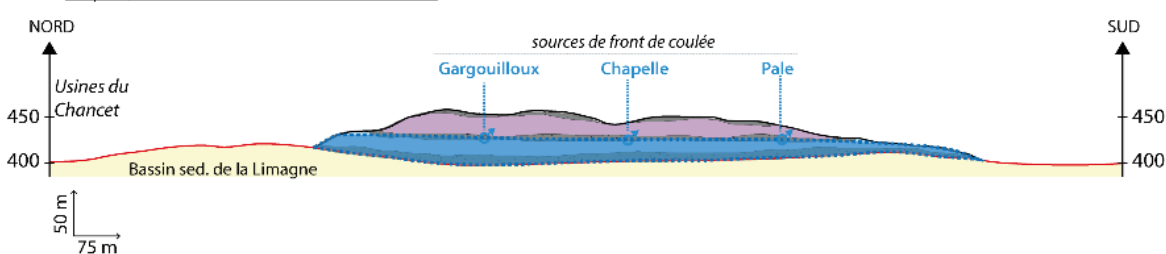
a. coupe 1 ; bassin versant complet



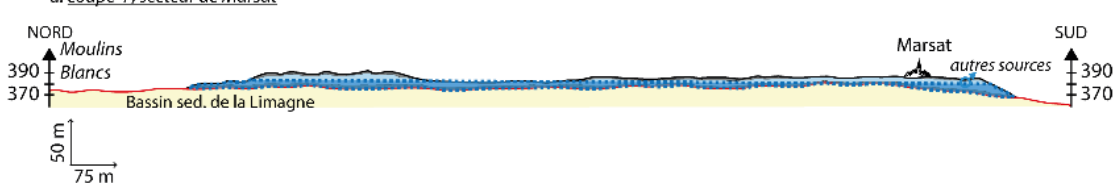
b. coupe 2 ; Zone du Goulet



c. coupe 3 ; secteur des Sources de Front de Coulée

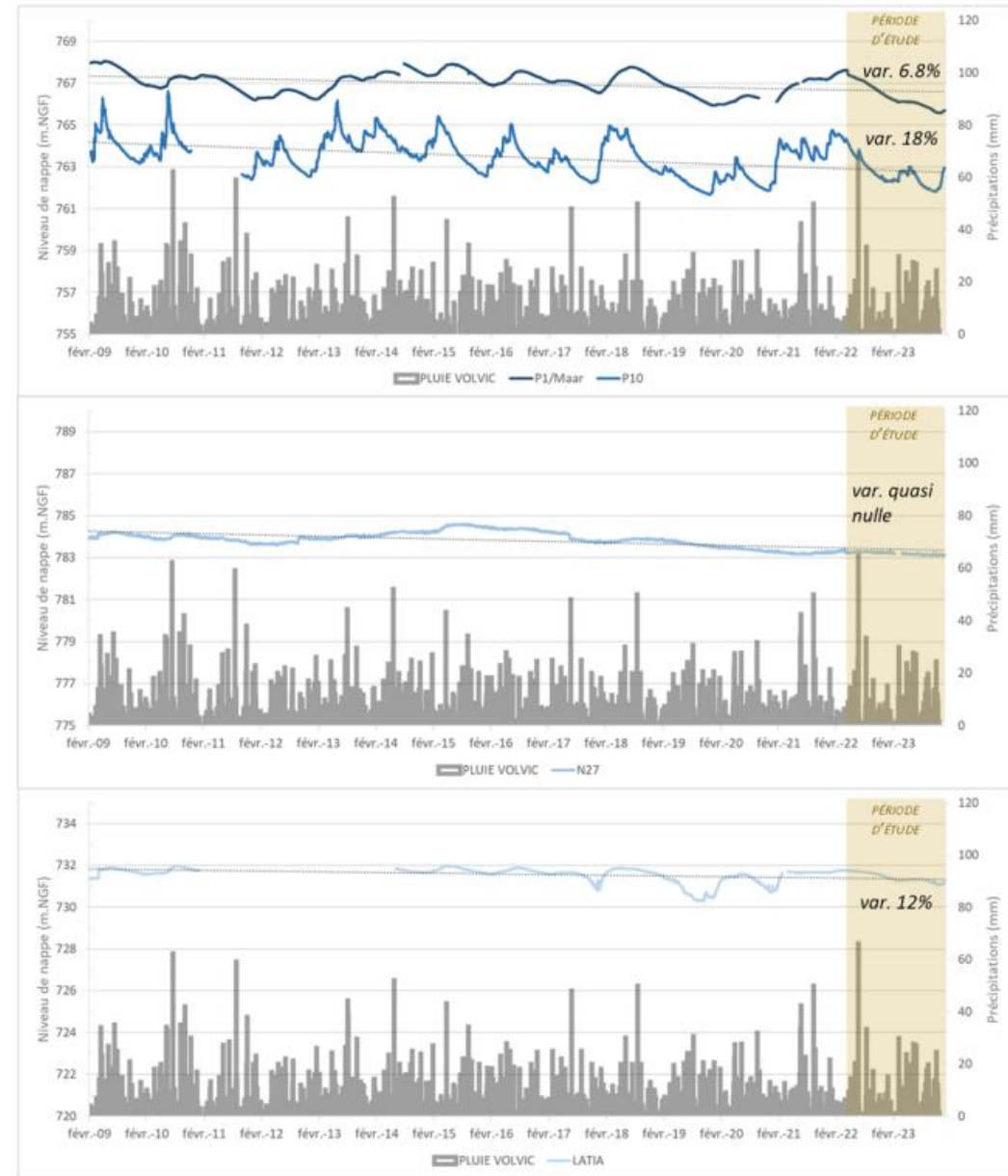
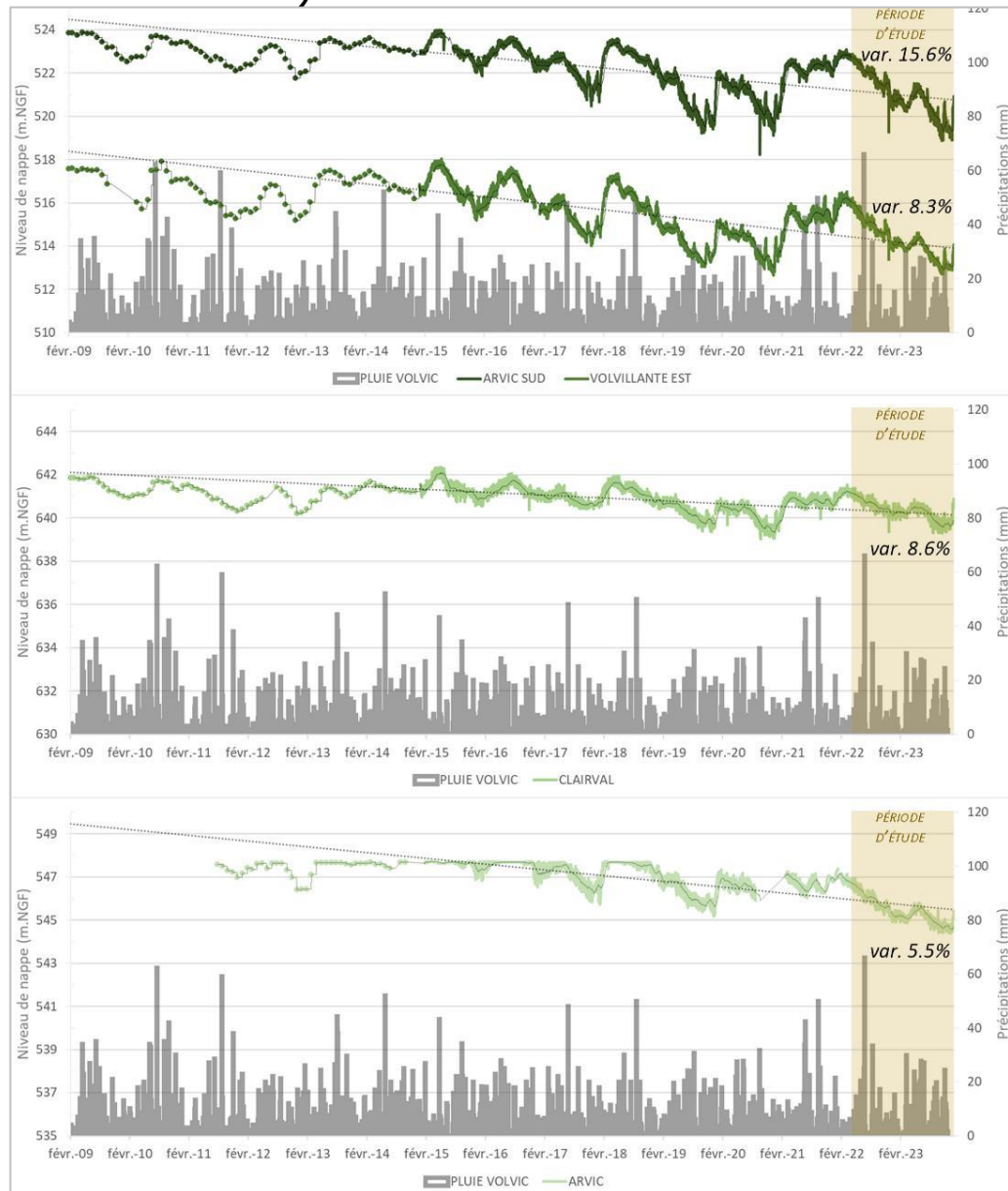


d. coupe 4 ; secteur de Marsat



HYDRODYNAMIQUE

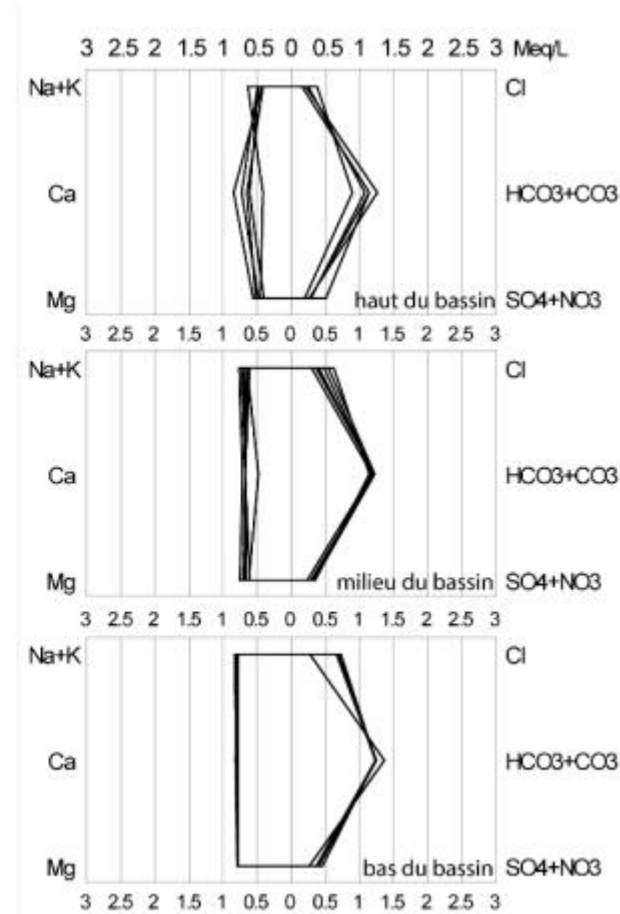
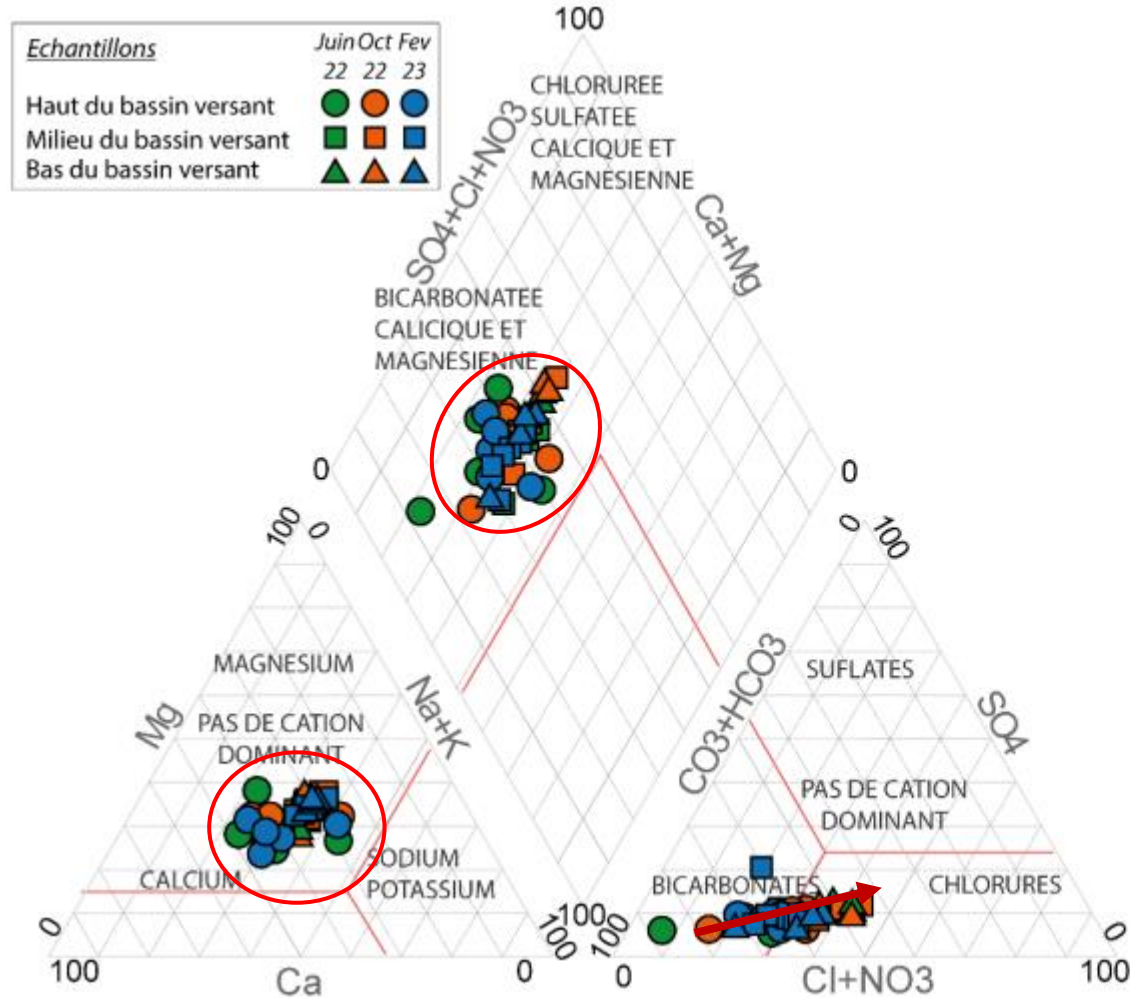
↳ **Variations de la piézométrie** en réaction aux événements pluvieux dans un **pourcentage inférieur à 20%** (de la masse d'eau totale)



Chroniques piézométriques aux points de suivi Arvic, Arvic Sud, Clairval, Volvillante Est, P1, P10, N27, Latia

HYDROCHIMIE

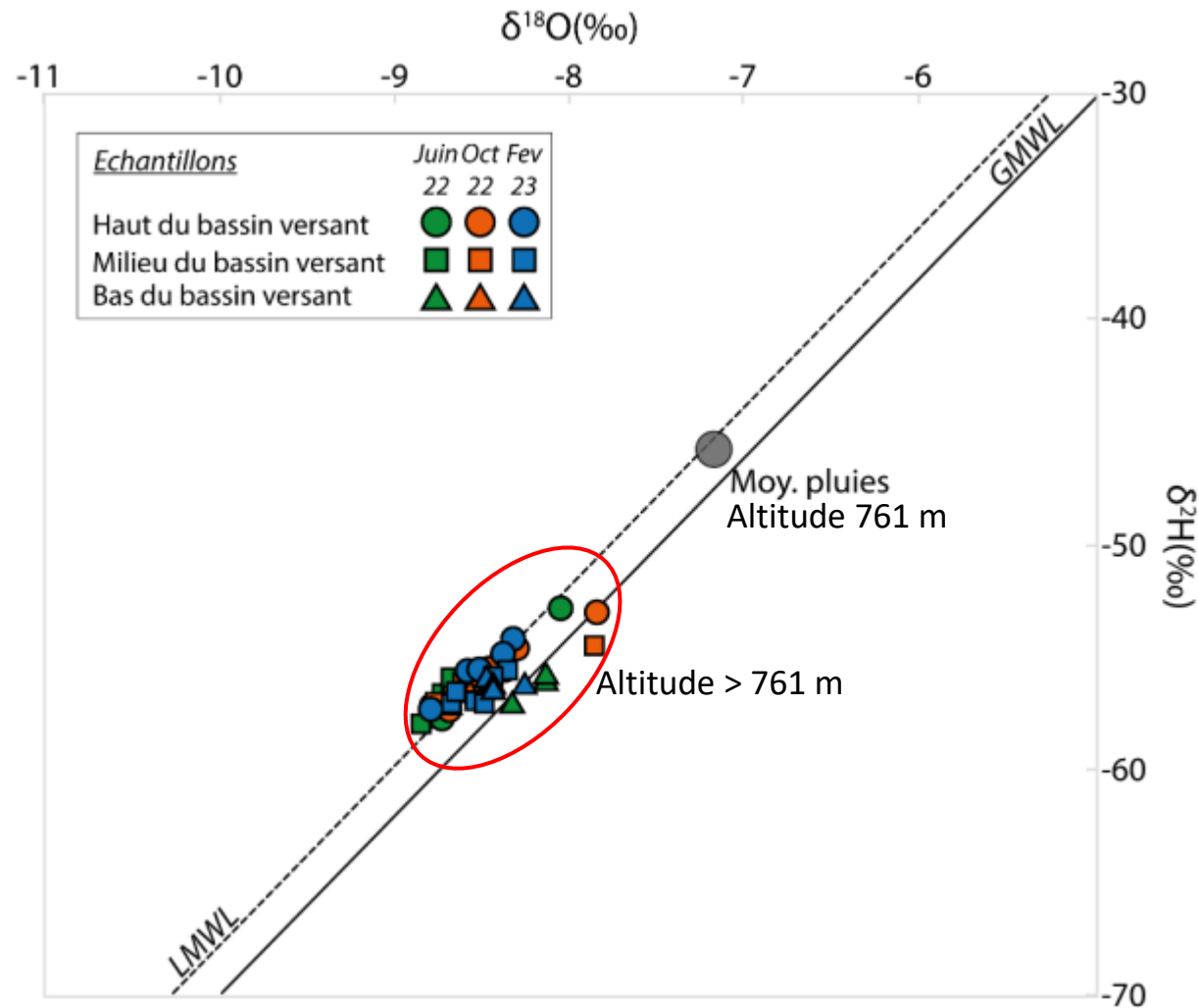
↳ Une masse d'eau homogène et inertielle



- ▶ Faciès **bicarbonaté-sodique homogène** pour l'ensemble des points échantillonnés du bassin versant, minéralisation relativement constante.
- ▶ Légère augmentation des teneurs en **chlorures et nitrates pour les points affectés par les activités agricoles ou le salage des routes**

ISOTOPES STABLES DE LA MOLÉCULE D'EAU

↳ Une masse d'eau inertielle et une recharge en amont



- Teneurs isotopiques **homogènes**
 - **Thermodépendance** des isotopes de la molécule d'eau : température ↘ : $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ ↘
- recharge des eaux du bassin versant de Volvic à des altitudes plus élevées que la moyenne du bassin versant (confirme la recharge sur les cônes de scories)

TRACEURS DE TEMPS DE SÉJOUR : CFCs-SF₆ ET TRITIUM ³H

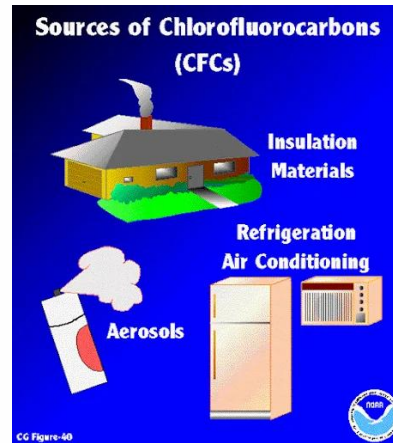
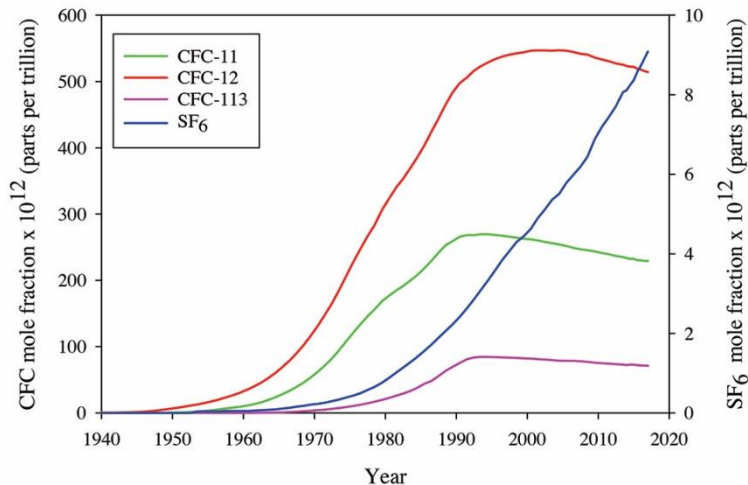
La datation des eaux souterraines par les CFCs (Chlorofluorocarbures) et SF₆ (Hexafluorure de Soufre) et le Tritium permet d'estimer l'âge des eaux infiltrées dans le sol.

CFCs-SF₆

Les CFCs, SF₆ composés chimiques utilisés dans le passé dans divers produits, se dissolvent lentement dans l'eau et peuvent être détectés comme des "marqueurs temporels".

En mesurant les concentrations de CFCs-SF₆ dans l'eau souterraine et en connaissant les émissions historiques de ces substances, on peut estimer approximativement l'âge de l'eau (sur une période allant jusqu'à environ 50 ans).

Atmospheric CFCs and SF₆ in the Northern Hemisphere

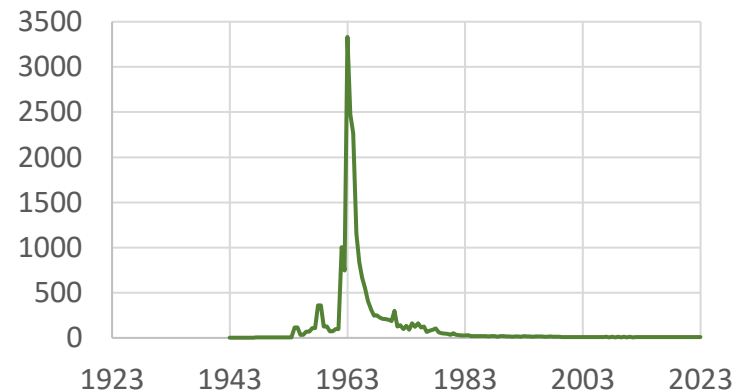


Tritium

*La datation à l'aide du Tritium est basée sur un principe similaire, reposant sur la décroissance radioactive de l'élément : Le **tritium se désintègre** avec le temps, et en **mesurant sa concentration dans l'eau**, on peut **déterminer depuis combien de temps cette eau s'est infiltrée** dans le sol.*

(Produit naturellement dans l'atmosphère, les teneurs dans les précipitations ont augmenté fortement, suite aux essais thermonucléaires aériens de 1952 à 1963, pour ensuite diminuer et se stabiliser.)

Atmospheric concentration in tritium (UT)



TRACEURS DE TEMPS DE SÉJOUR : CFCs-SF₆ ET TRITIUM ³H

A l'aide de **modèles mathématiques** il est alors possible de **trouver le meilleur ajustement/modèle permettant d'expliquer les valeurs mesurées** (échantillons) par rapport aux valeurs atmosphériques (référence). **De cet ajustement, on en déduit l'âge des eaux** prélevées.



TRACEURS DE TEMPS DE SÉJOUR : CFCs-SF₆ ET TRITIUM ³H

A l'aide de **modèles mathématiques** il est alors possible de **trouver le meilleur ajustement/modèle permettant d'expliquer les valeurs mesurées** (échantillons) par rapport aux valeurs atmosphériques (référence). **De cet ajustement, on en déduit l'âge des eaux** prélevées.



INTERPRÉTATION DES DISTRIBUTIONS D'ÂGE DES EAUX SOUTERRAINES

TracerLPM (programme Excel®) permet d'évaluer les distributions d'âge des eaux souterraines à partir de données de traçage environnemental en utilisant des modèles à paramètres globaux (LPMs).

Les modèles à paramètres globaux sont des modèles mathématiques de transport basés sur une géométrie simplifiée de l'aquifère.



TRACEURS DE TEMPS DE SÉJOUR : CFCs-SF₆ ET TRITIUM ³H – Modèles d'interprétation

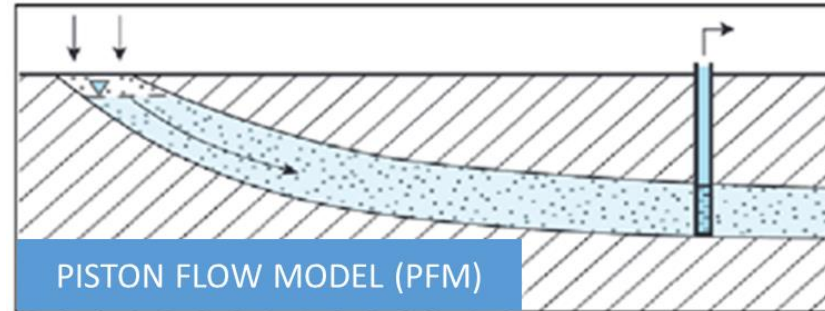
A l'aide de **modèles mathématiques** il est alors possible de **trouver le meilleur ajustement/modèle permettant d'expliquer les valeurs mesurées** (échantillons) par rapport aux valeurs atmosphériques (référence). **De cet ajustement, on en déduit l'âge des eaux** prélevées.



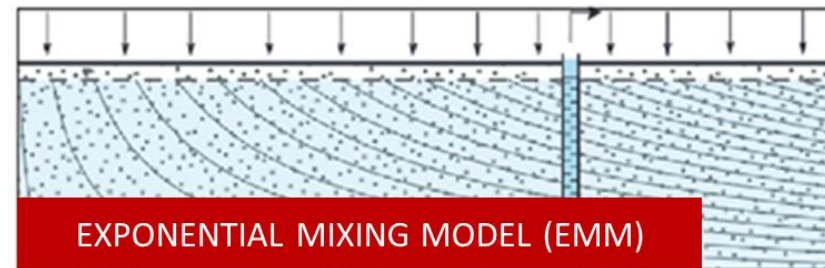
INTERPRÉTATION DES DISTRIBUTIONS D'ÂGE DES EAUX SOUTERRAINES

TracerLPM (programme Excel®) permet d'évaluer les distributions d'âge des eaux souterraines à partir de données de traçage environnemental en utilisant des **modèles à paramètres globaux (LPMs)**.

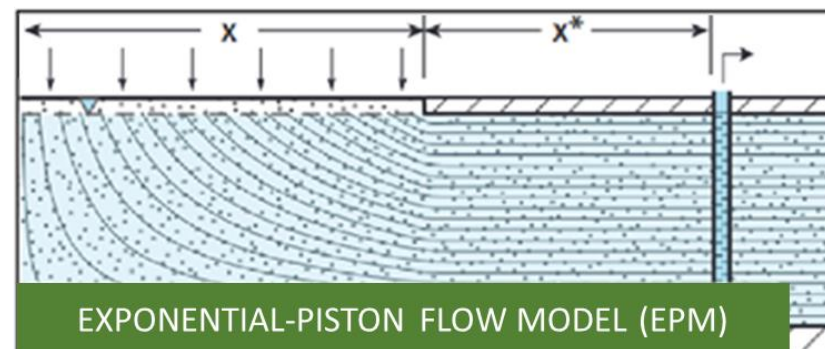
Les modèles à paramètres globaux sont des modèles mathématiques de transport basés sur une géométrie simplifiée de l'aquifère.



Infiltration de l'eau à l'amont
Circulation sans mélange
jusqu'à l'exutoire



Mélange entre eau ancienne
et eau récente sur l'axe de
circulation



Modèle combinant PISTON
et EXPONENTIEL

TRACEURS DE TEMPS DE SÉJOUR : CFCs-SF₆ ET TRITIUM ³H – *Interprétation*

		CFC-11	CFC-12	CFC-113	SF ₆	³ H	Nbre traceurs
OCTOBRE 2022	P1						3
	P10						2
	M.MARC						4
	Clai.						4
	Aub.						3
	Arv.						4
	Arrv S.						3
	Volv E.						3
	Gou.						4
	Pal.						3
FEVRIER 2023	P1						3
	P10						4
	M.MARC						4
	Clai.						4
	Aub.						3
	Arv.						4
	Arrv S.						4
	Volv E.						3
	Gou.						4
	Pal.						3
	Mars.						3

SF₆ *Non utilisable car contexte volcanique, contamination d'origine terrigène (Busenberg et Plummer 2000 ; Koh et al., 2006 ; Gourcy et al., 2009)*

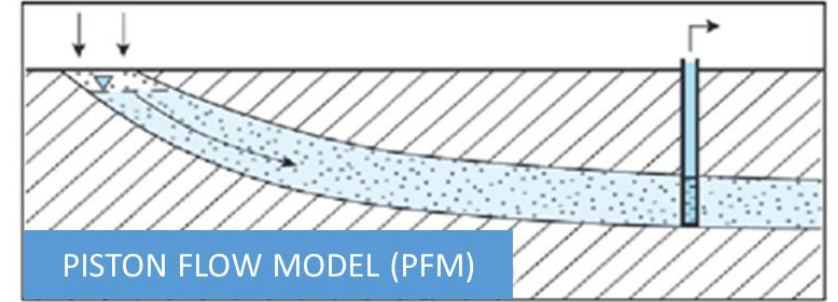
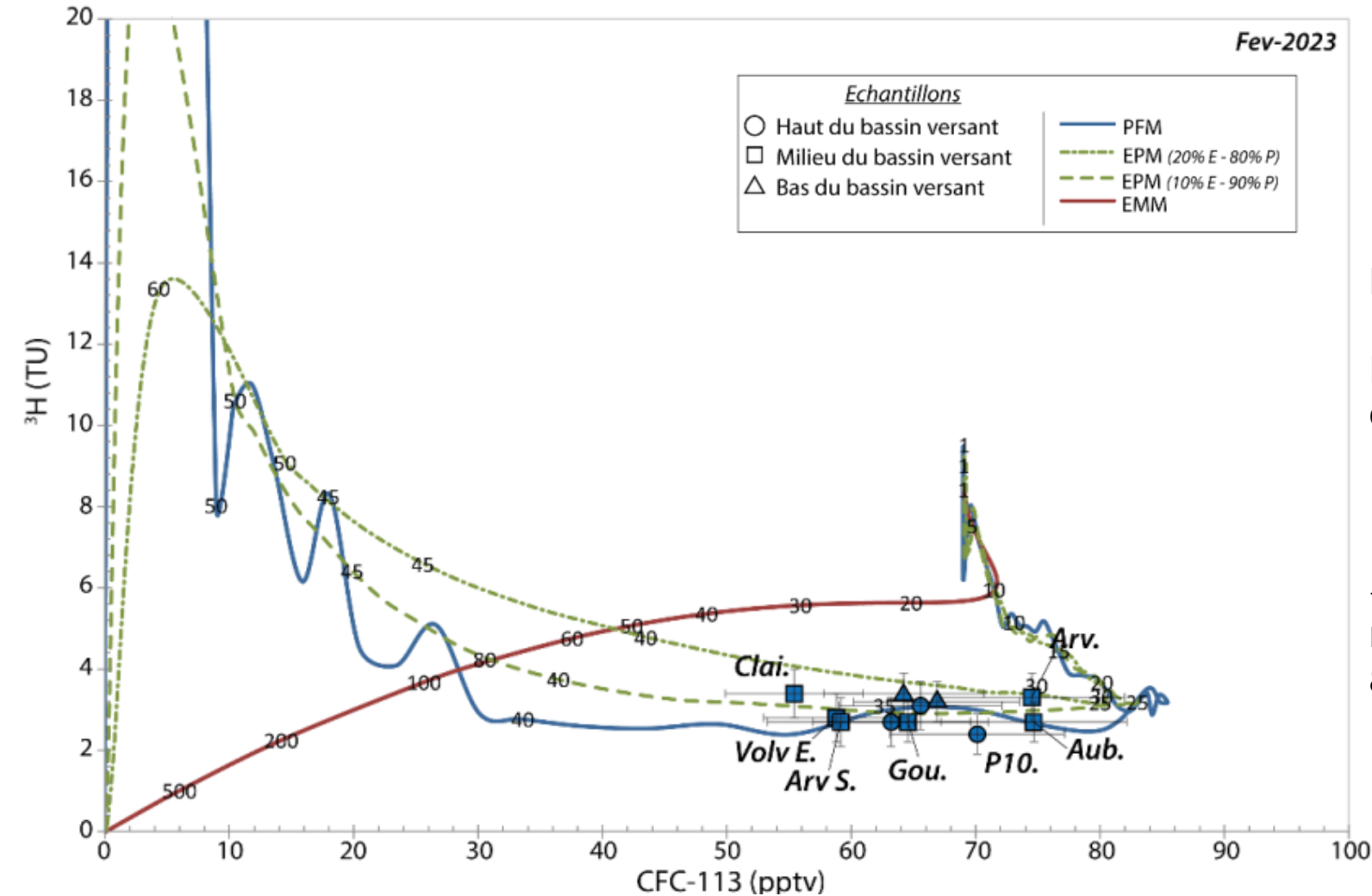
CFC-11 *Plusieurs auteurs observent une potentielle contamination par les matériaux plastiques utilisés pour capter les sources (Gourcy et al., 2014).*

95 % des points avec au moins 3 traceurs : validation de la méthode



TRACEURS DE TEMPS DE SÉJOUR : CFCs-SF₆ ET TRITIUM ³H – *Interprétation*

↳ *Période de basses eaux (février 2023)*



Points expliqués par un **MODÈLE PISTON (PFM)**

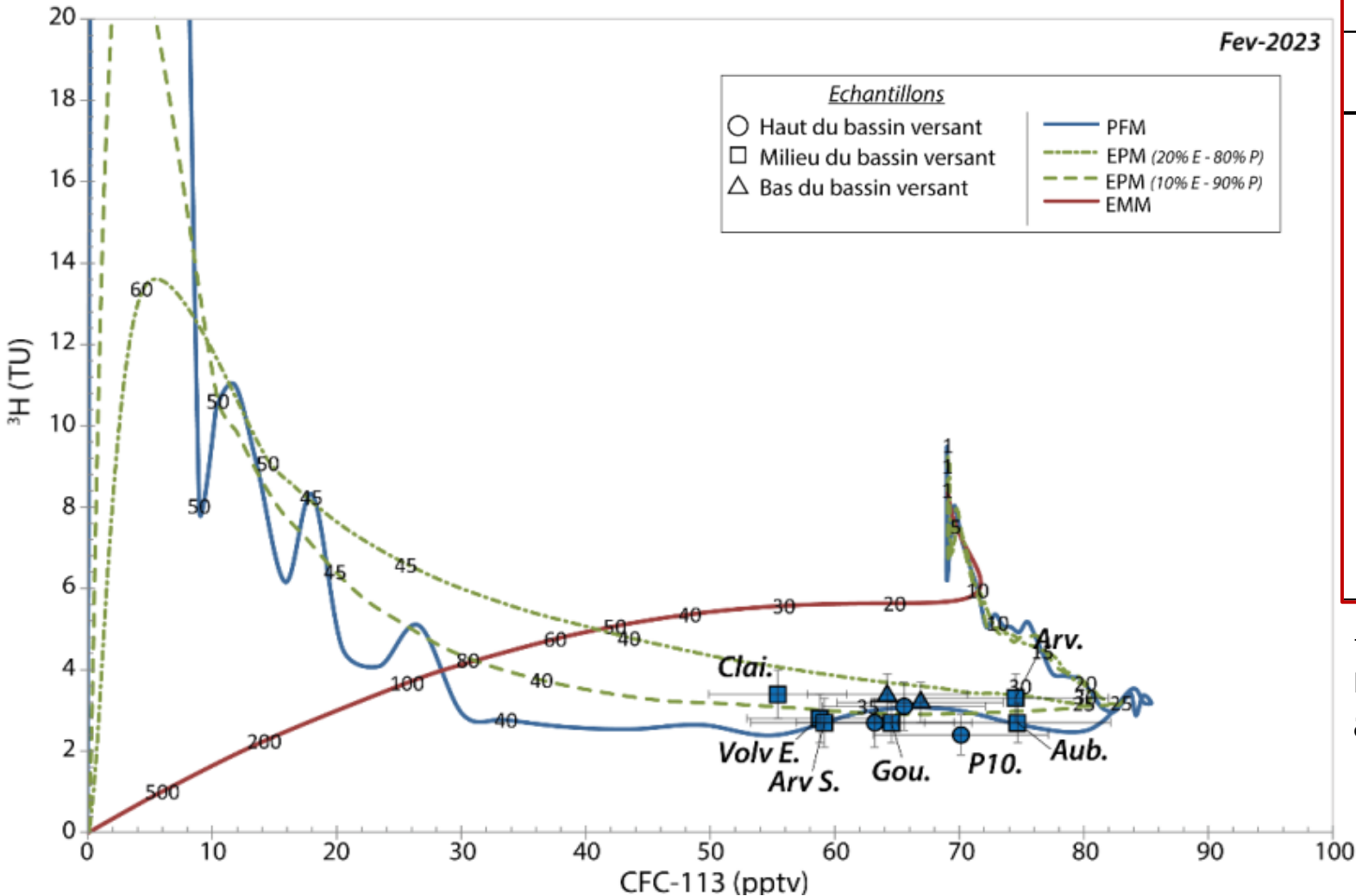
PFM : pas de mélange pendant le transit des eaux souterraines

→ Temps de résidence moyen (estimé grâce au modèle piston selon Jurgens et al. 2012) : ≈ 34 ans



TRACEURS DE TEMPS DE SÉJOUR : CFCs-SF₆ ET TRITIUM ³H – *Interprétation*

↳ *Période de basses eaux (février 2023)*



Temps de résidence moyen (³H vs CFC113) basé sur un modèle PISTON

Echantillon	Localisation	Temps		
		résidence moy. (an)	Erreur relative (%)	
Campagne terrain - Février 2023	Maar	Haut de bassin versant	34	0.05
	P10	Milieu de bassin versant	32	0.17
	M.Marc		35	0.08
	Clai.	Milieu de bassin versant	35	0.24
	Aub.		35	0.03
	Arv.		33	0.07
	Arv S.		35	0.01
	Volv E.		33	0.01
	Gou.	35	0.10	
	Pal.	Bas de bassin versant	35	0.13
	Mars.		34	0.06
		Moyenne	34.2	
		Ecart-Type	1.2	

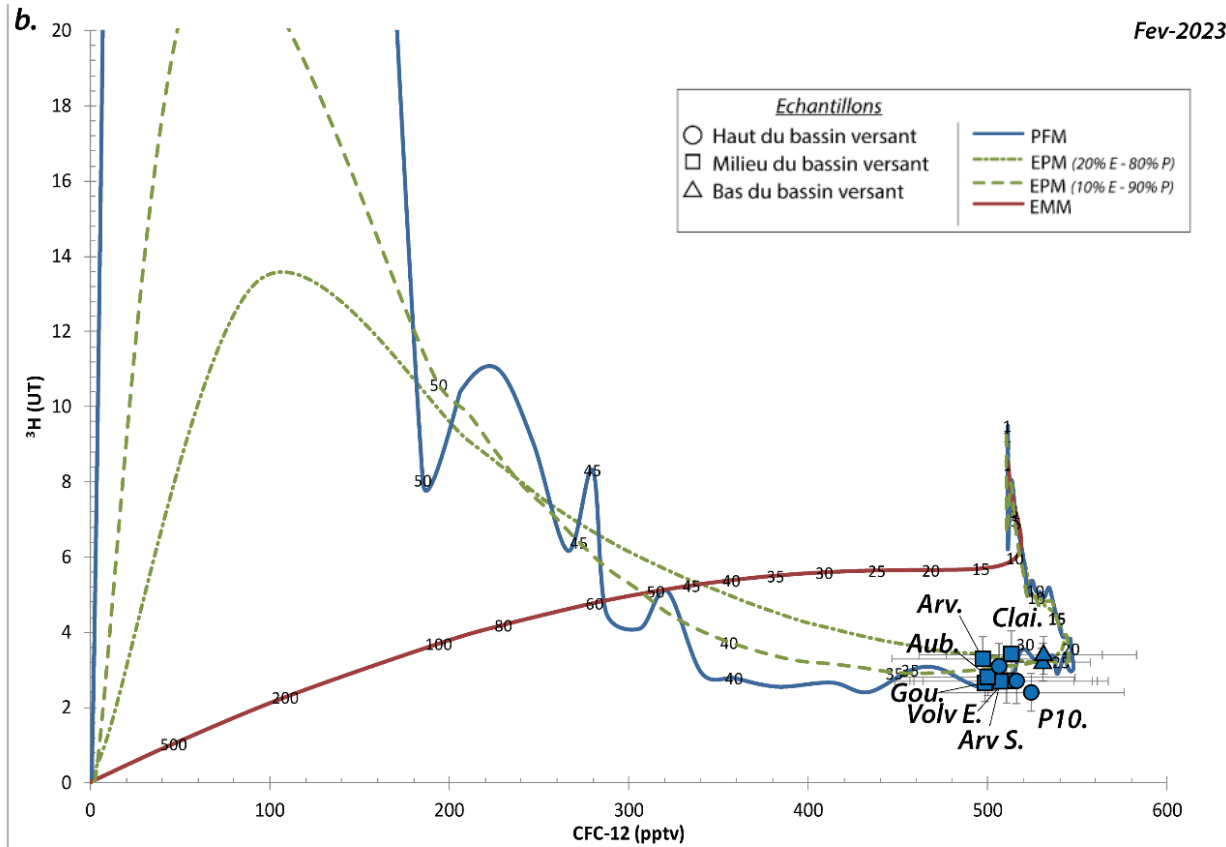
→ Temps de résidence moyen (estimé grâce au modèle piston selon Jurgens et al. 2012) : ≈ 34 ans



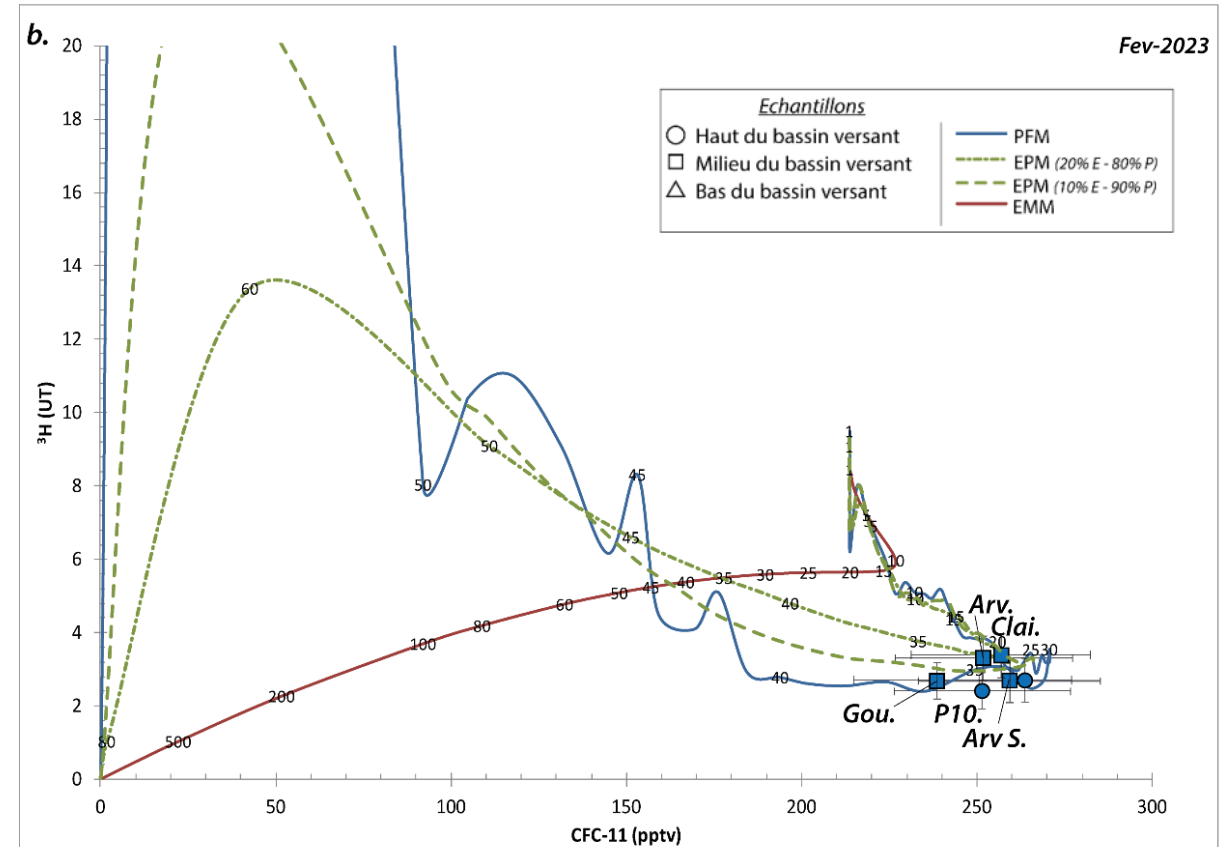
TRACEURS DE TEMPS DE SÉJOUR : CFCs-SF₆ ET TRITIUM ³H – *Interprétation*

↳ *Période de basses eaux (février 2023)*

CFC-12 vs ³H

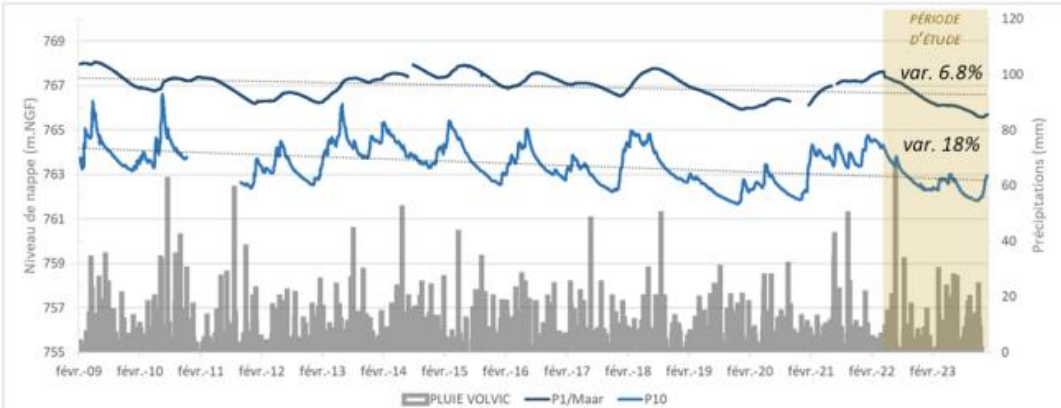
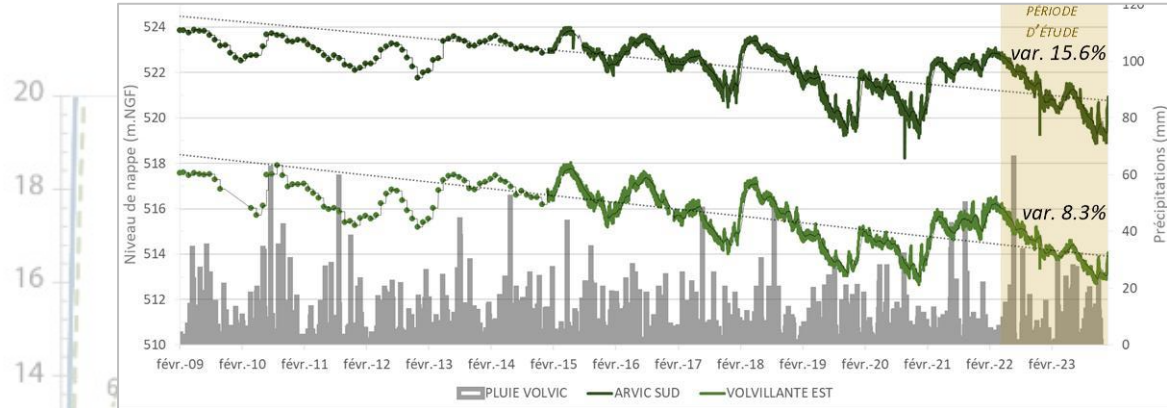


CFC-11 vs ³H

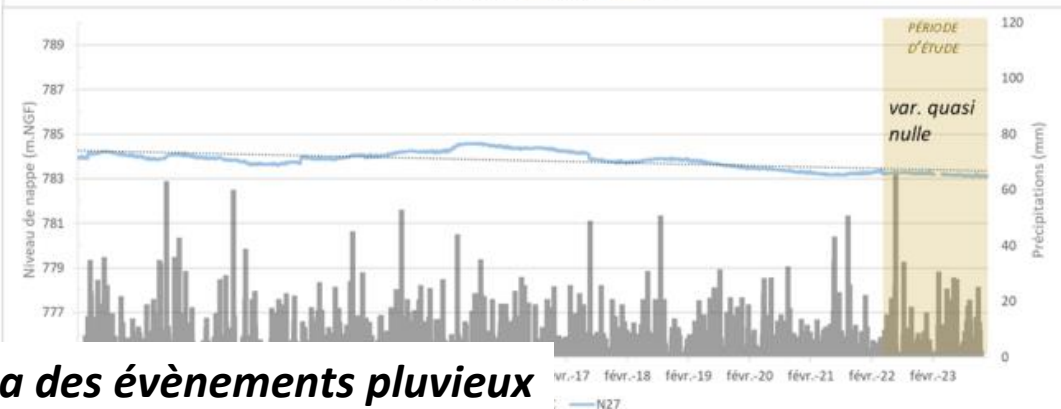
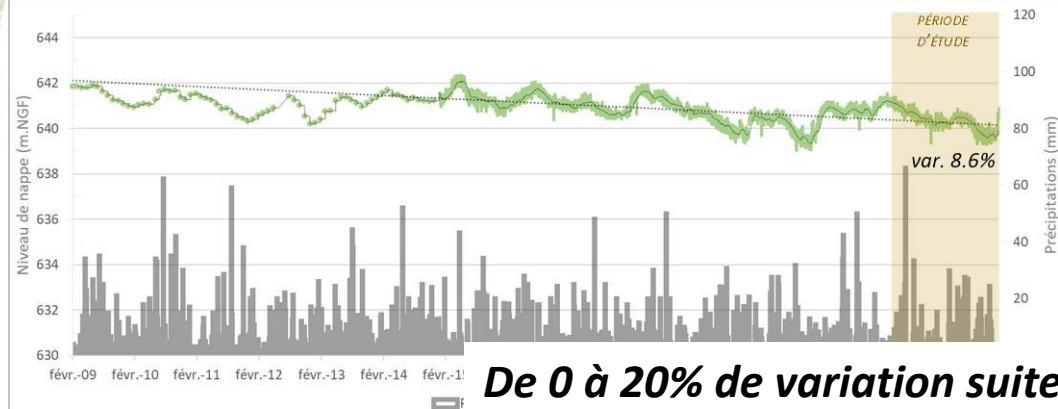


TRACEURS DE TEMPS DE SÉJOUR : CFCs-SF₆ ET TRITIUM ³H – *Interprétation*

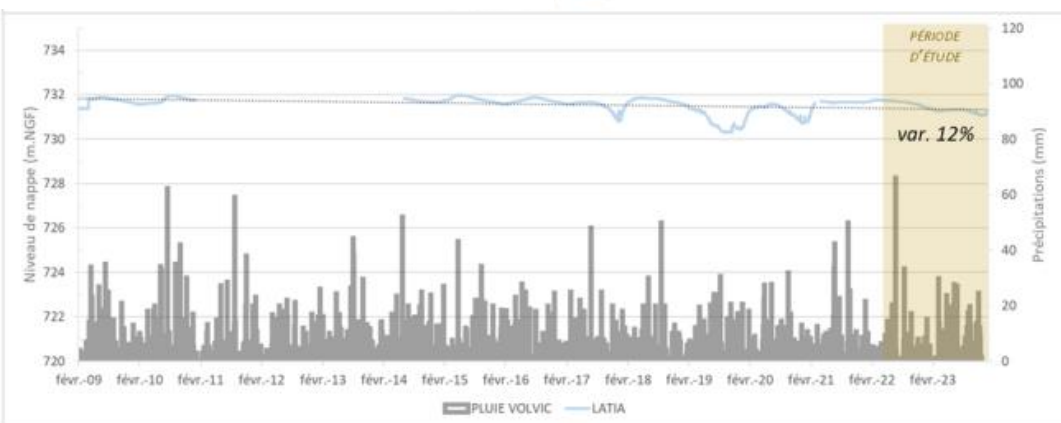
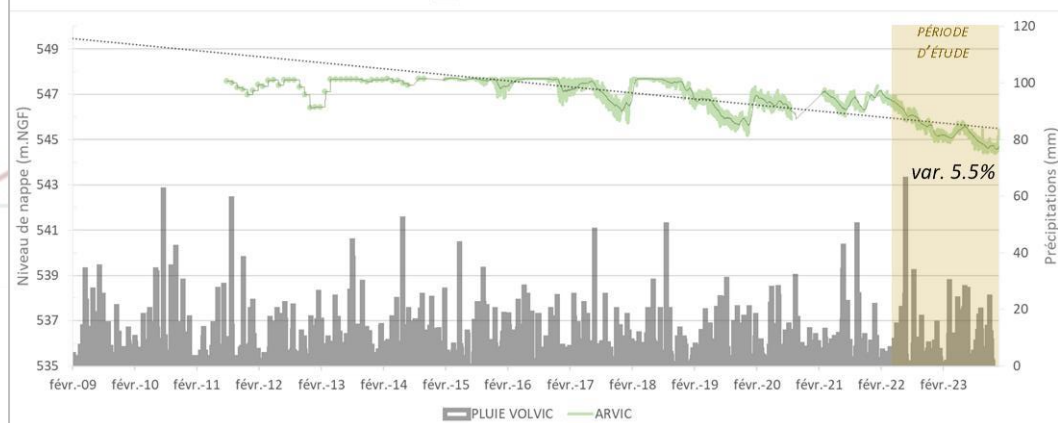
↳ *Période de hautes eaux (octobre 2022)*



³H (TU)



De 0 à 20% de variation suite a des évènements pluvieux



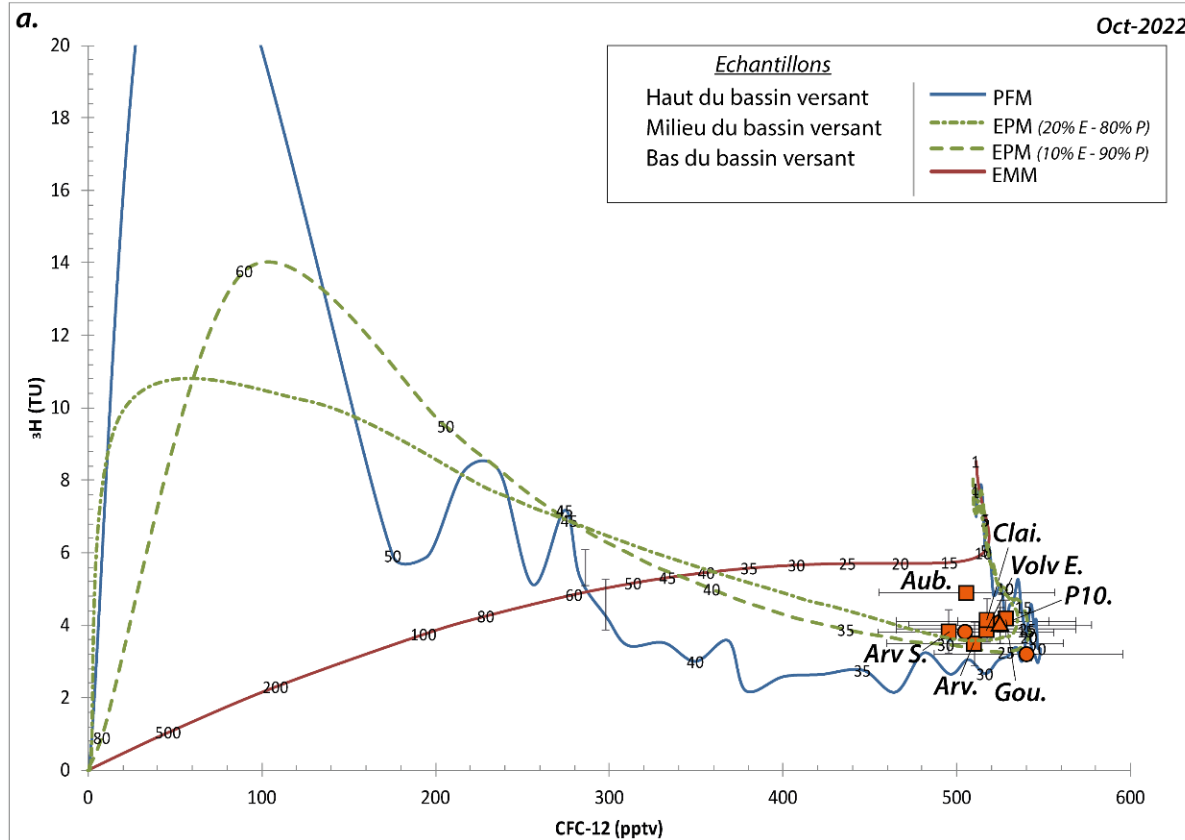
Piston

recharge

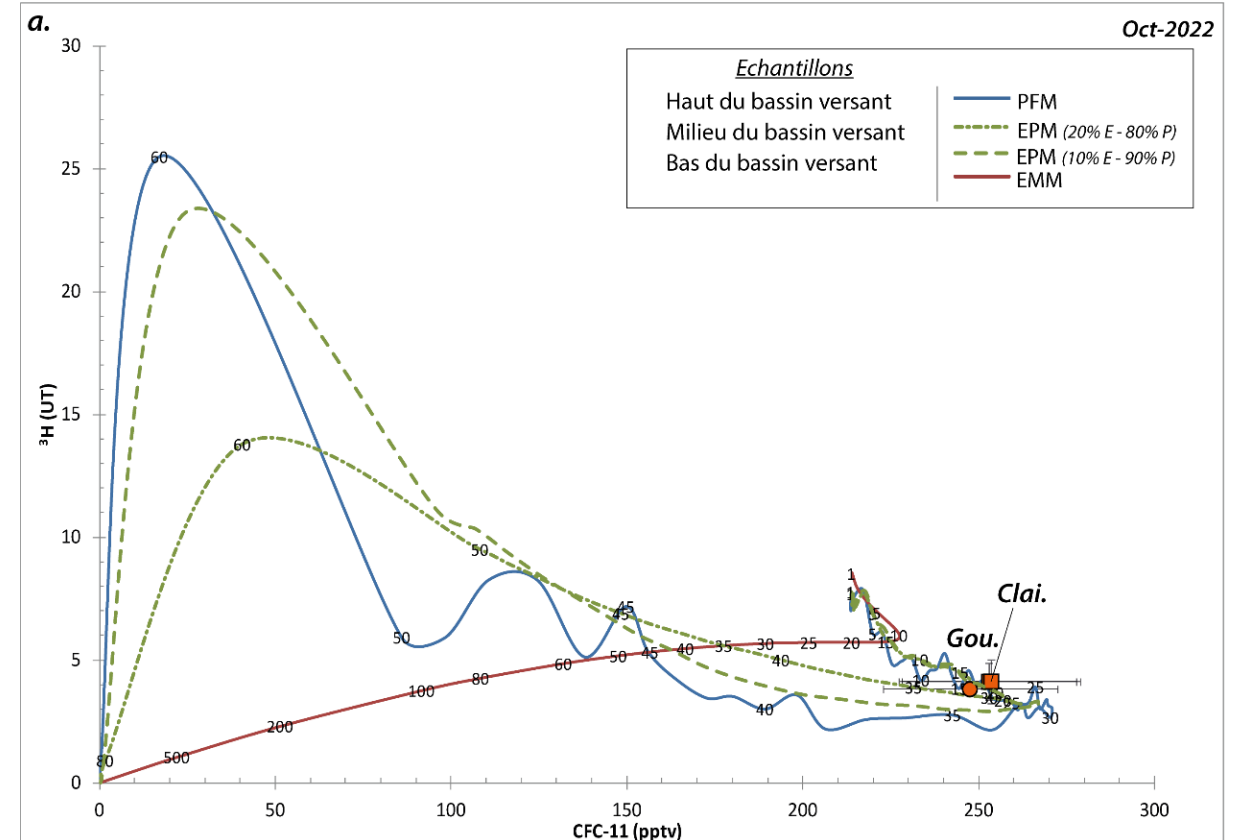
TRACEURS DE TEMPS DE SÉJOUR : CFCs-SF₆ ET TRITIUM ³H – *Interprétation*

↳ *Période de hautes eaux (octobre 2022)*

CFC-12 vs ³H

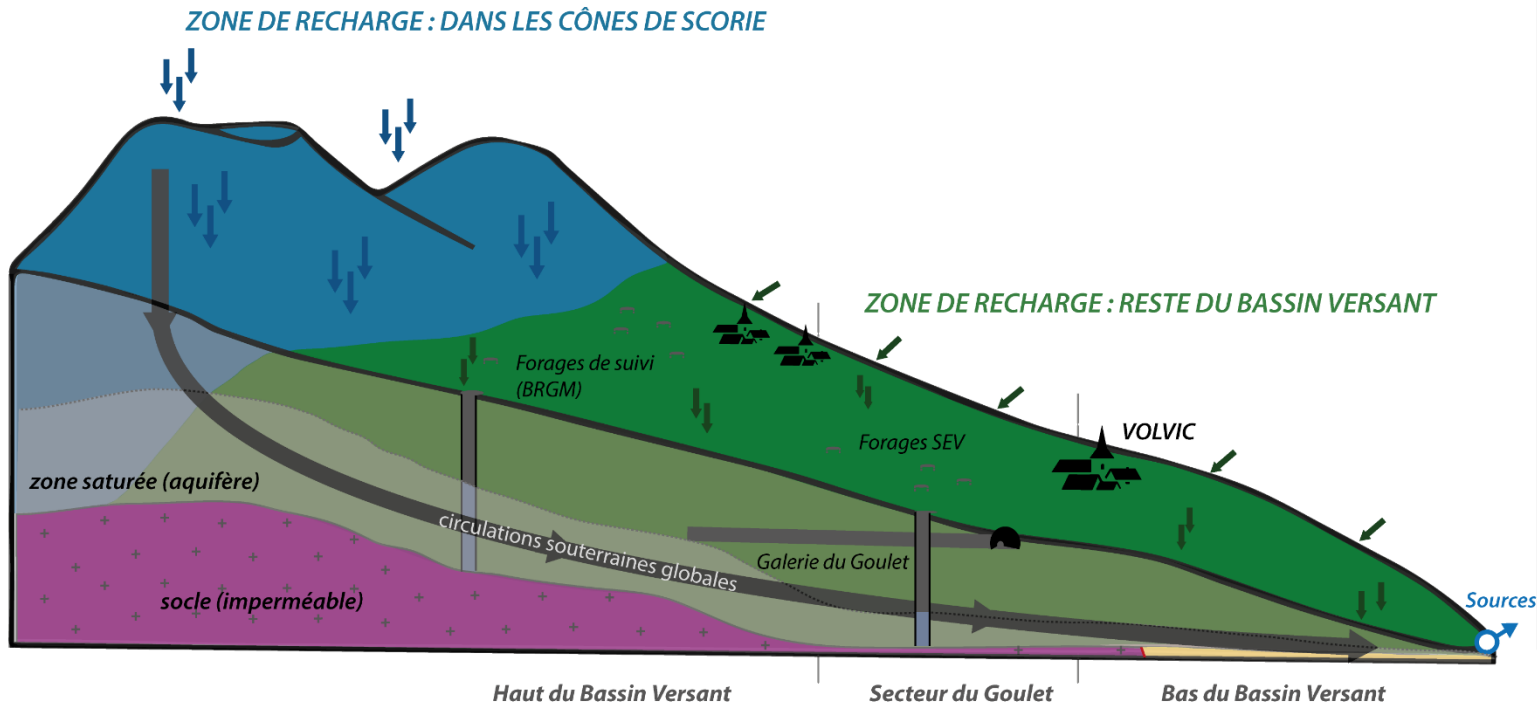


CFC-11 vs ³H

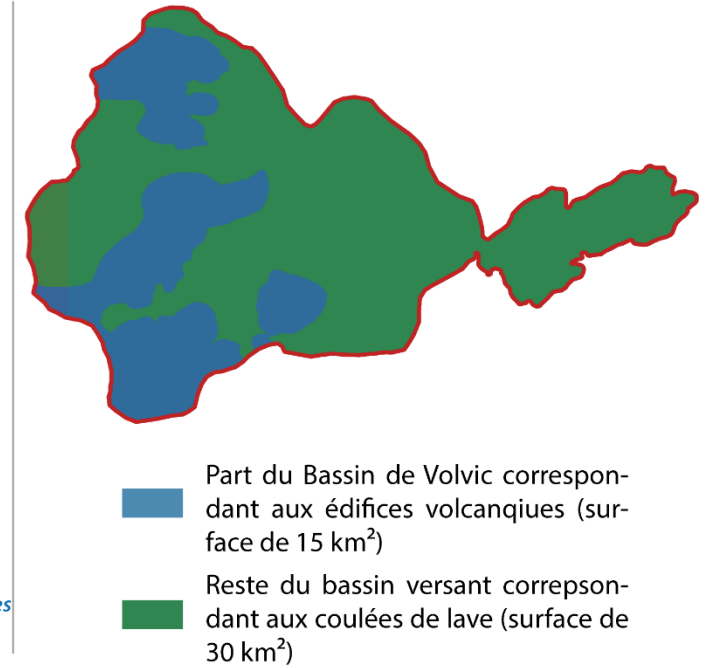


MODÈLE CONCEPTUEL – *Impluvium de Volvic*

a.

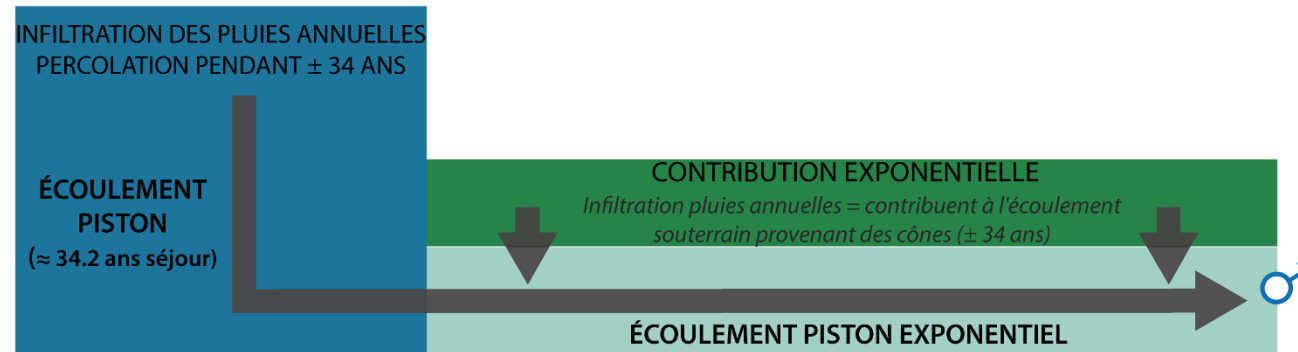


b.



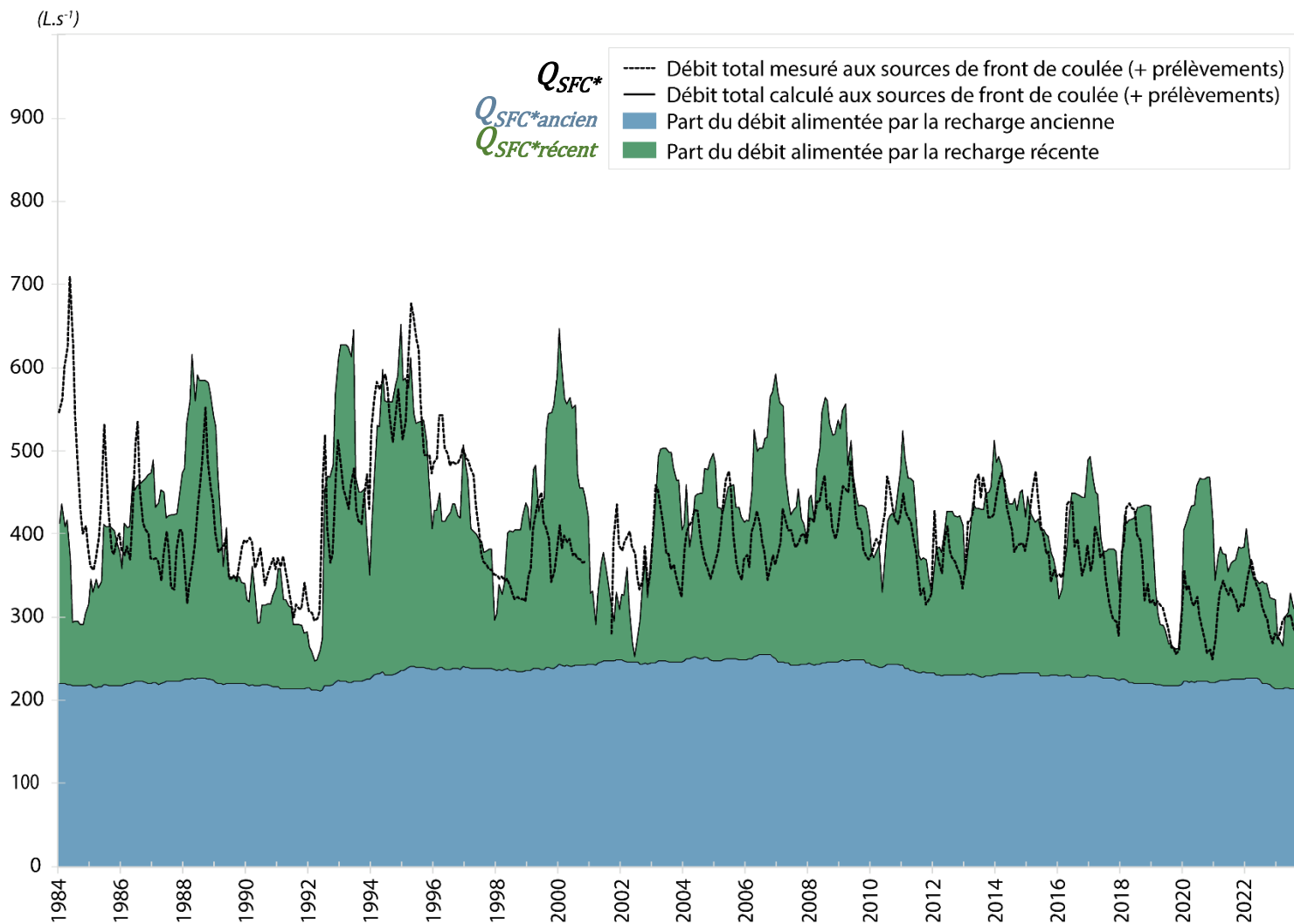
c.

REPRÉSENTATION SCHEMATIQUE



MODÈLE CONCEPTUEL - validation

↳ Mise en relation avec les débits



$$Q_{SFC^*} = Q_{SFC^*récent} + Q_{SFC^*ancien}$$

Débit total mesuré
aux exutoires
+ prélèvements
(SEV/AEP) ajoutés

recharge calculée sur la
partie haute du bassin
versant (sur ≈34 ans)

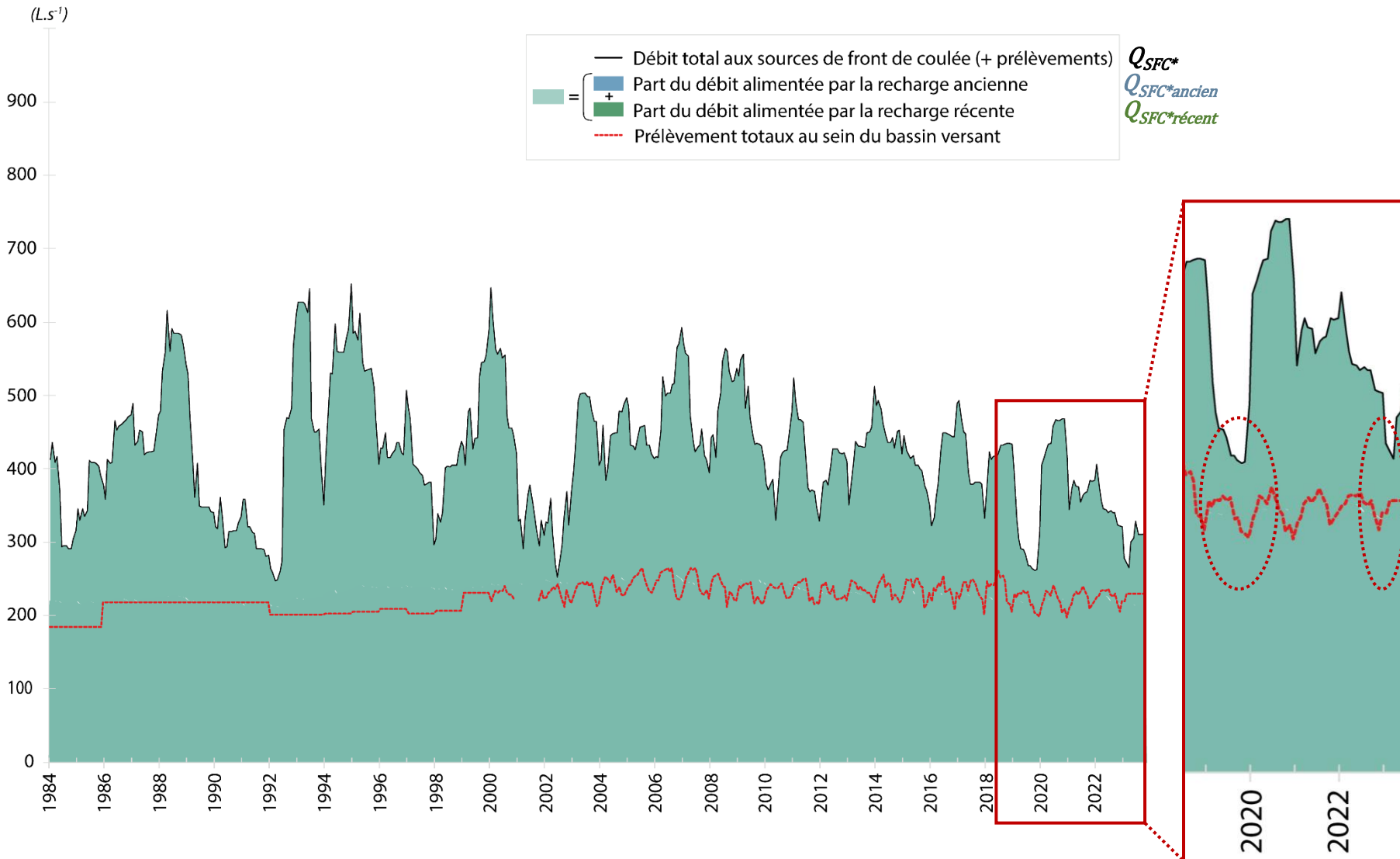
recharge calculée sur le reste du
bassin versant (annuellement)

- ▶ Débit de la **composante ancienne** stable
- ▶ **Composante récente** variable, affectée par les variations intra-annuelle de pluviométrie et la baisse de la recharge liée au changement climatique.

MODÈLE CONCEPTUEL - validation

↳ Mise en relation avec les débits

$$Q_{SFC*} = Q_{SFC*récent} + Q_{SFC*ancien}$$

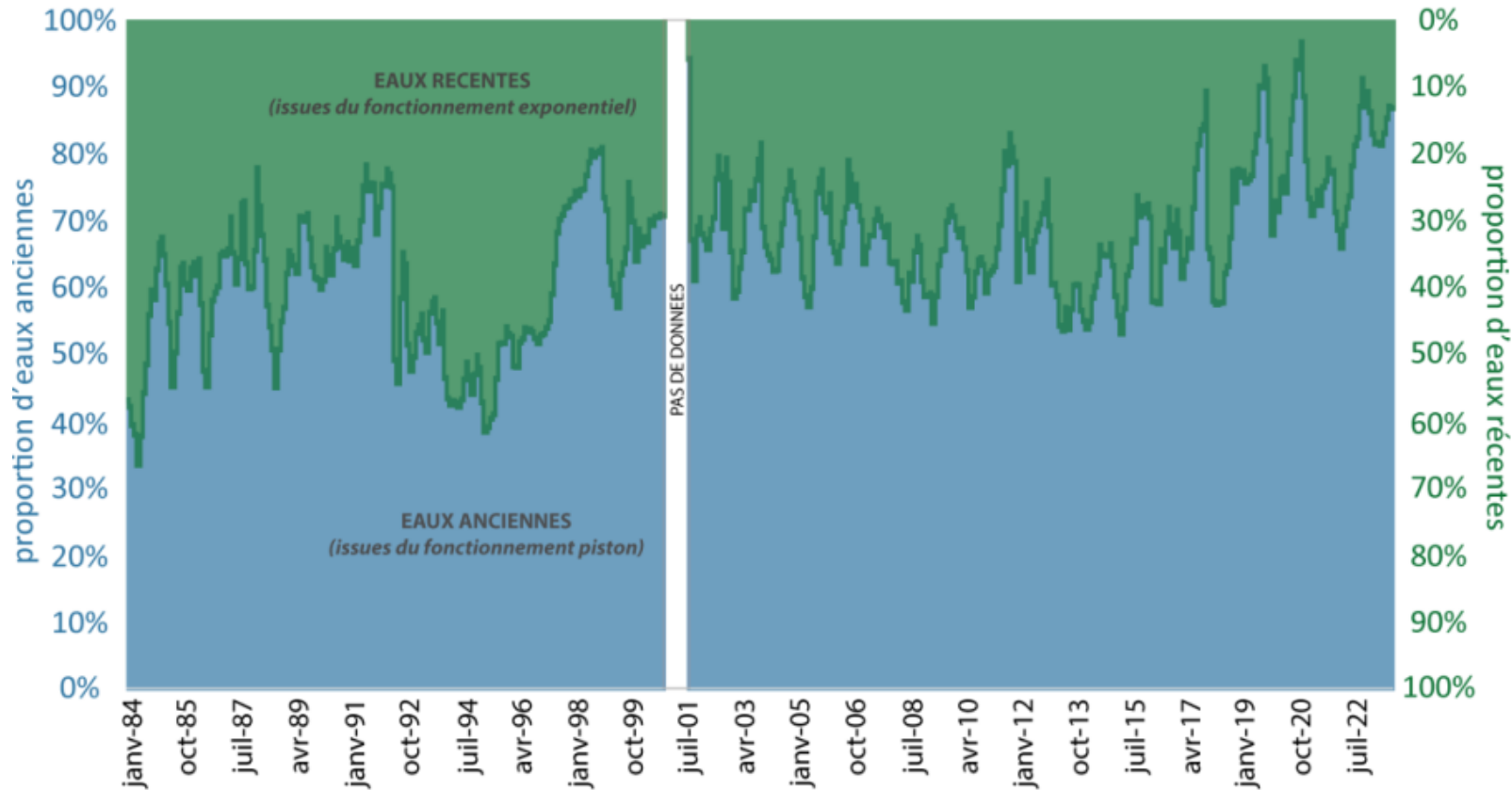


► **Total des prélèvements**
parfois proche du débit total
aux exutoires du système



MODÈLE CONCEPTUEL – aspect temporel

↳ *Parts respectives composante ancienne / composante récente (au débit total)*



- ▶ Débit actuel des sources : **composante ancienne majoritaire (≈80%)**
- ▶ Baisse de la recharge actuelle pourra avoir une conséquence sur la **composante récente** dans ≈34 ans (temps de séjour)

Modélisation mathématique pour observer l'évolution des **composantes récente et ancienne** en fonction des différents scénarios de **changement climatique**.

MODÉLISATION MATHÉMATIQUE HYDROLOGIQUE

- 1** **Modéliser/Simuler les débits aux exutoires** du système aquifère (à partir d'un modèle calibré)
- 2** Travailler sur des **simulations** pour la prévision **des impacts de l'évolution climatique** (test de différents scénarii climatiques) et/ou de **l'exploitation de la ressource** (augmentation/stabilisation/diminution).



MODÉLISATION MATHÉMATIQUE HYDROLOGIQUE

Réponse au Volet 3 : Outil d'aide à la gestion

Modélisation mathématique du système aquifère

- Modèle mathématique boîte noire entrées/sorties
- Simulations prospectives
test de différents scénarii (dérive climatique ou modifications des prélèvements) et estimation de leur impact sur la ressource
- Transfert de compétences aux gestionnaires sur modèle(s)
+ utilisation

MODÉLISATION HYDROLOGIQUE

↳ *Utilisation d'un modèle pluie/débit (données hydro-climatiques 1950-2022)*

Modèle GARDENIA (BRGM)

> Reproduire le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant avec un « **modèle à réservoir** »

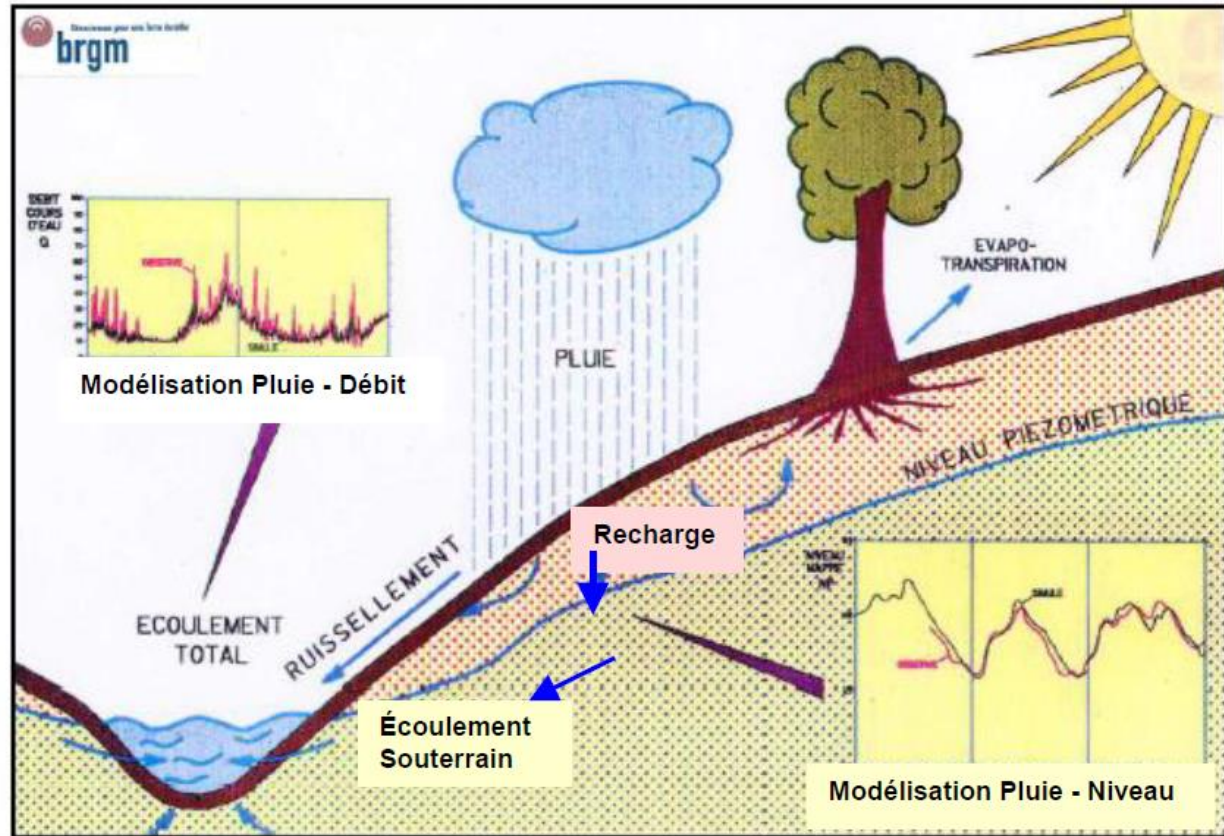


Schéma de principe de GARDENIA – extrait de notice (BRGM)

MODÉLISATION HYDROLOGIQUE

↳ Utilisation d'un modèle pluie/débit (données hydro-climatiques 1950-2022)

Modèle GARDENIA (BRGM)

> Reproduire le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant avec un « modèle à réservoir »

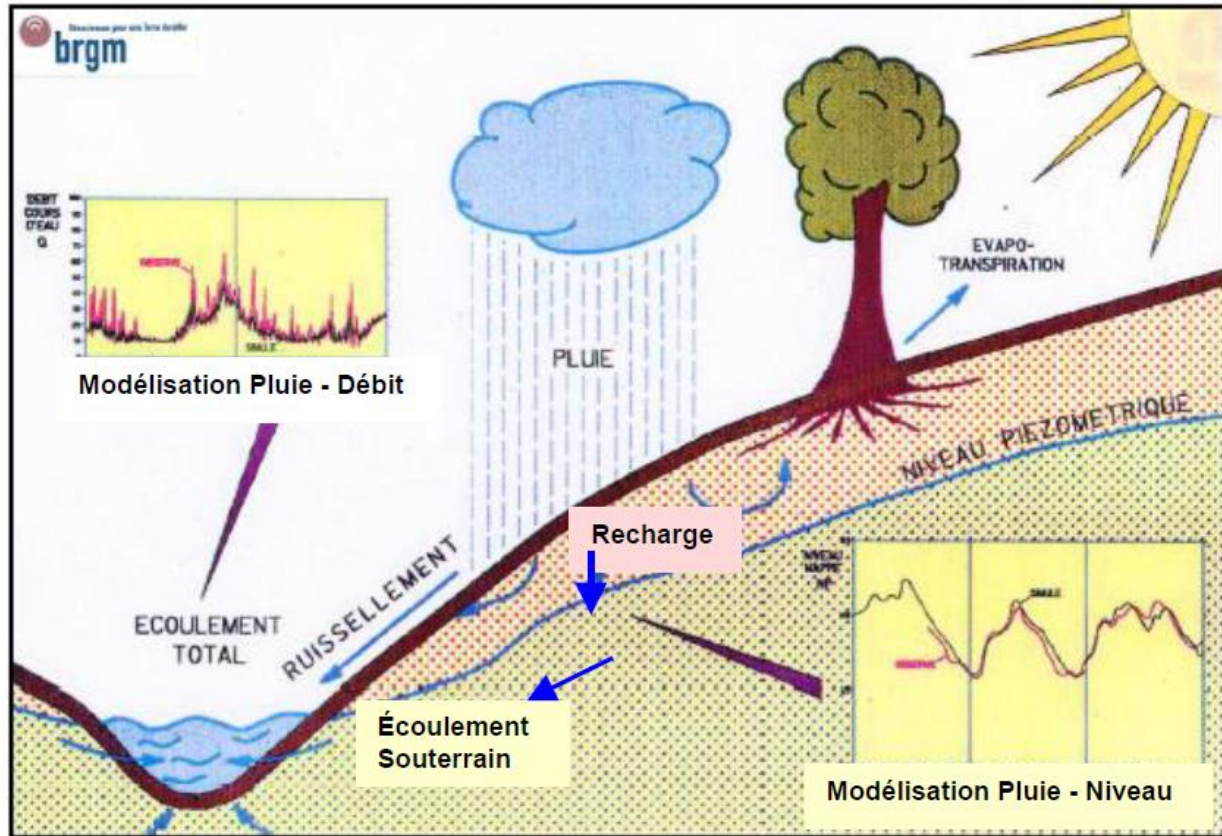
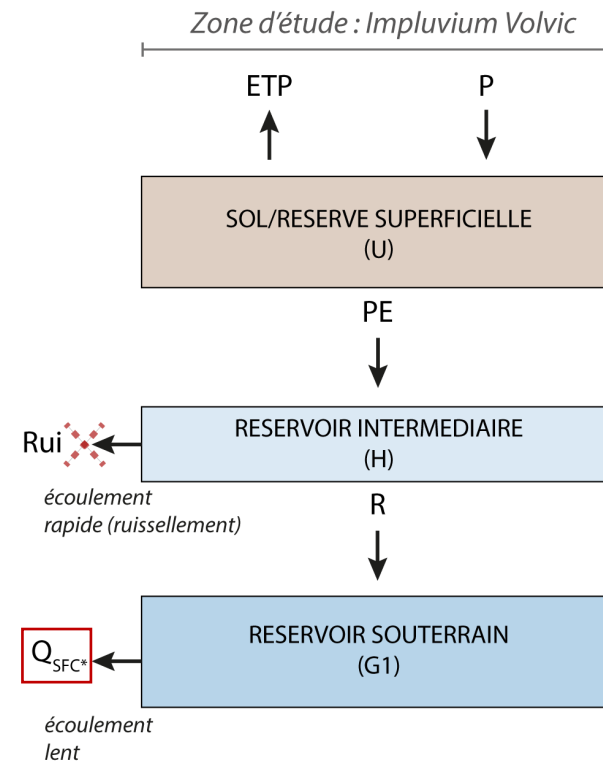


Schéma de principe de GARDENIA – extrait de notice (BRGM)

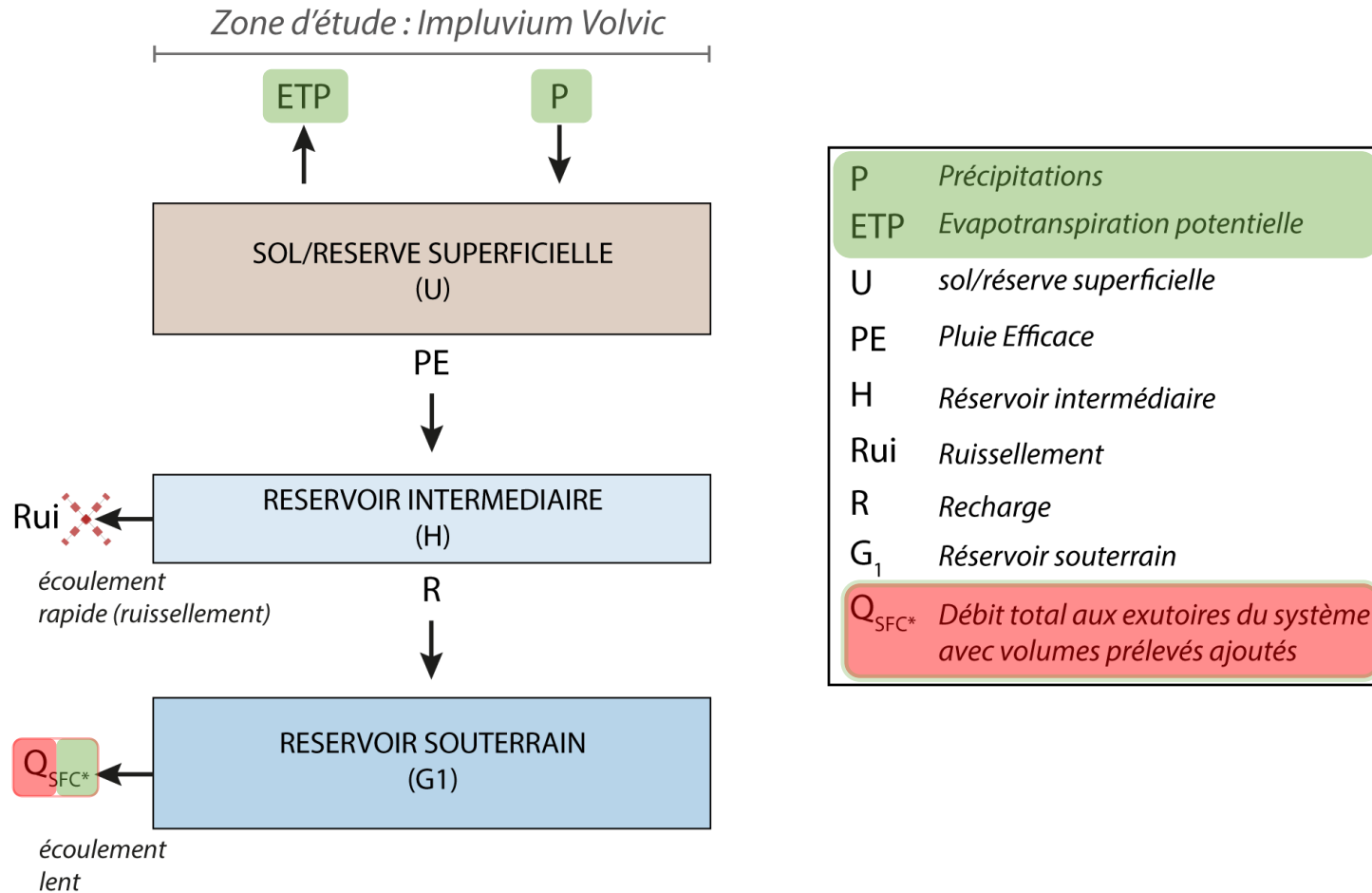


P	Précipitations
ETP	Evapotranspiration potentielle
U	sol/réserve superficielle
PE	Pluie Efficace
H	Réservoir intermédiaire
Rui	Ruissellement
R	Recharge
G ₁	Réservoir souterrain
Q _{SFC*}	Débit total aux exutoires du système avec volumes prélevés ajoutés

MODÉLISATION HYDROLOGIQUE

↳ Utilisation d'un modèle pluie/débit (données hydro-climatiques 1950-2022)

DONNEES D'ENTREE
DONNEES DE SORTIE

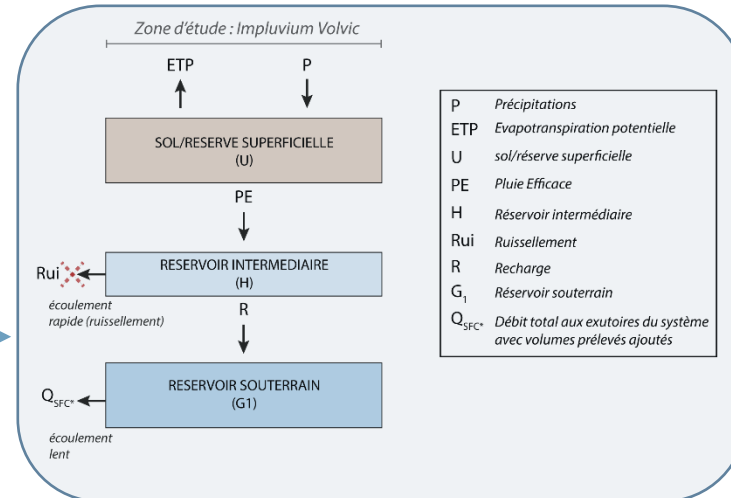
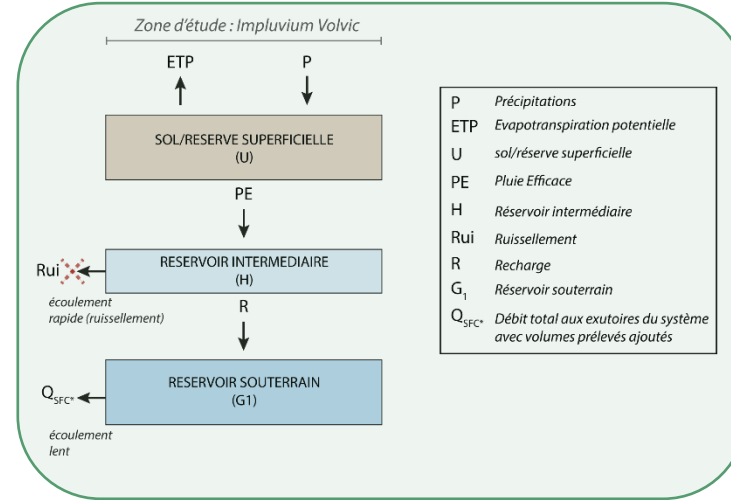
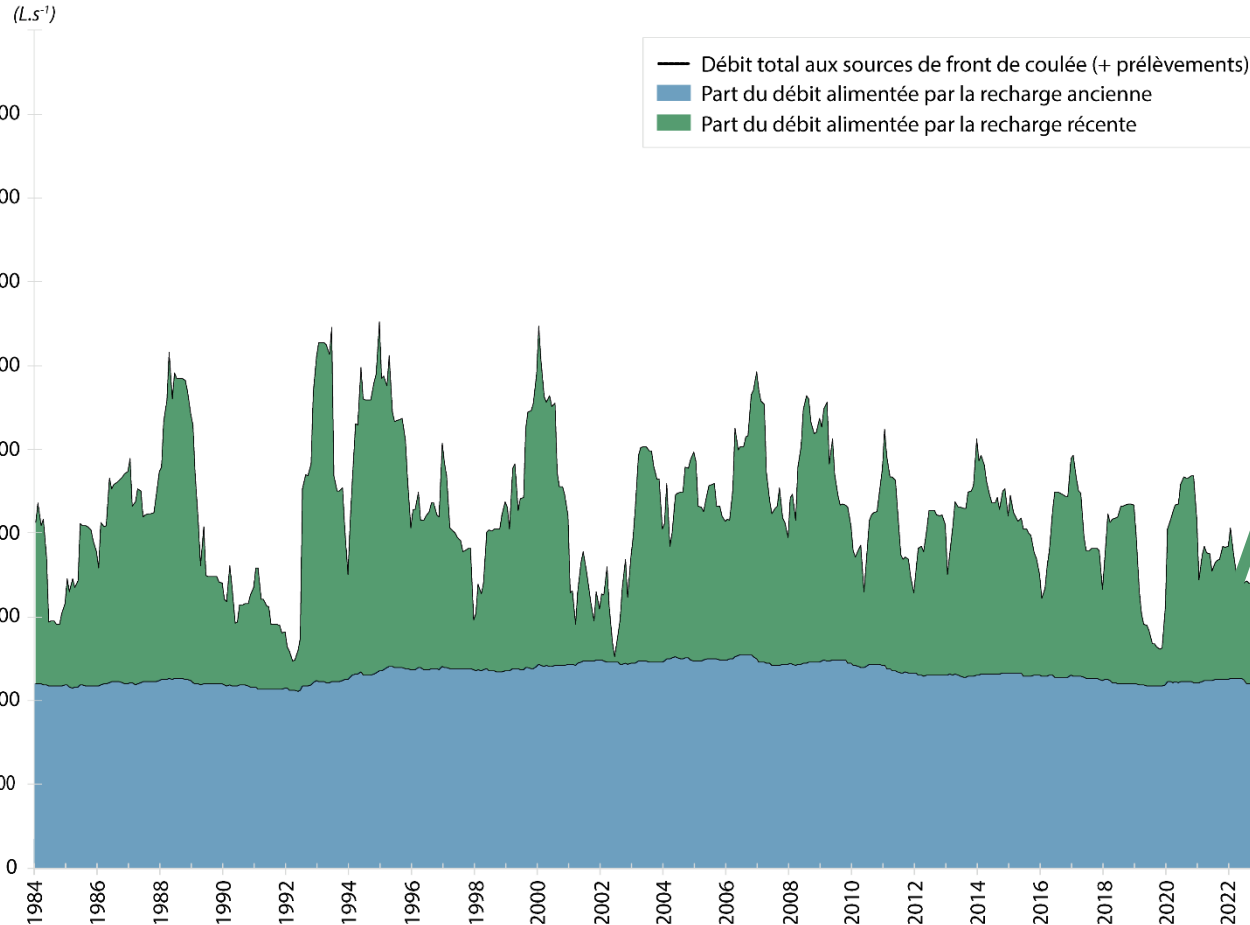


MODÉLISATION HYDROLOGIQUE

↳ Utilisation d'un modèle pluie/débit (données hydro-climatiques 1950-2022)

➔ Deux modèles pour l'Impluvium de Volvic (d'après modèle hydrogéologique conceptuel)

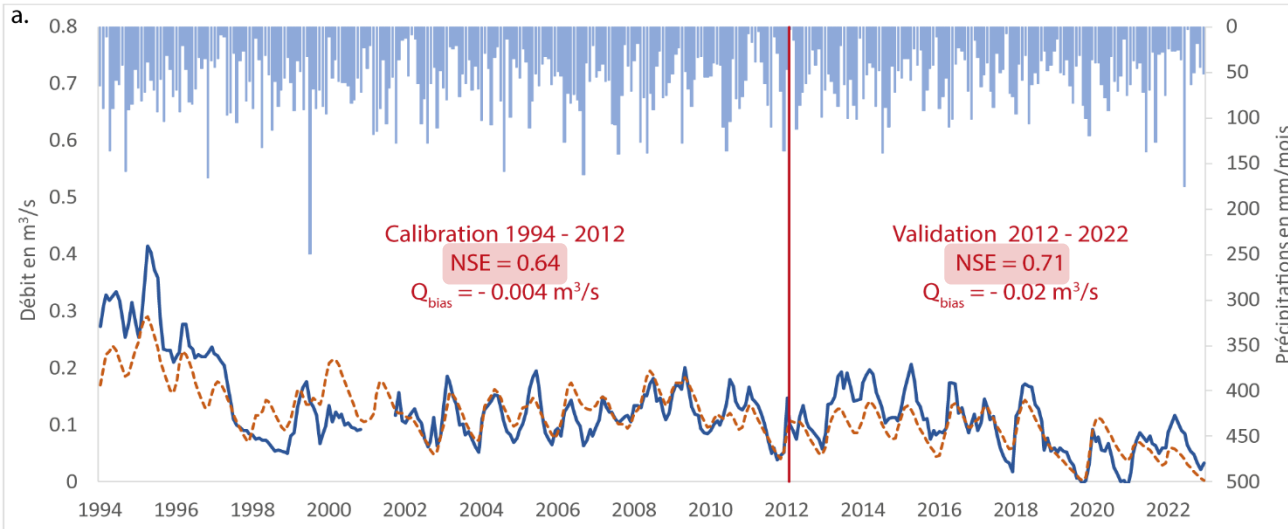
$$Q_{SFC^*} = Q_{SFC^*récent} + Q_{SFC^*ancien}$$



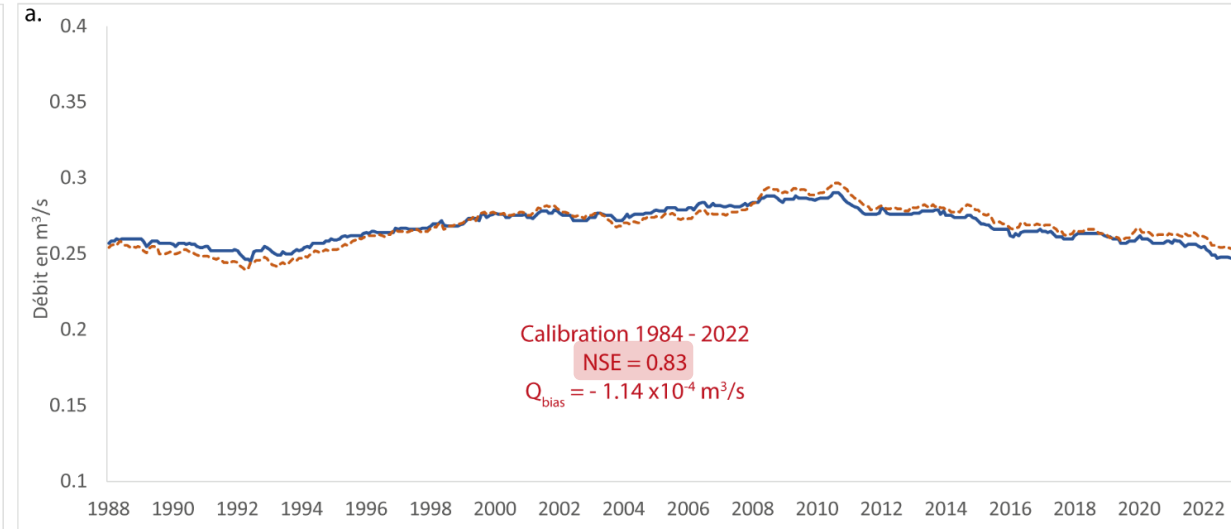
MODÉLISATION HYDROLOGIQUE

↳ Calibration des modèles pour les débits des Sources de Front de Coulées prélèvements ajoutés (Q_{SFC*})

Modèle à composante récente ($Q_{SFC*récent}$)



Modèle à composante ancienne ($Q_{SFC*ancien}$)



Evaluation de la performance	NSE
Très bonne	$0.75 < NSE \leq 1.00$
Bonne	$0.65 < NSE \leq 0.75$
Satisfaisante	$0.50 < NSE \leq 0.65$
Insatisfaisante	$NSE \leq 0.50$

Valeurs du coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe (traduit d'après McCuen et al., 2006).

LÉGENDE

- débits mesurés (Q_{SFC})
- - - débits simulés (Q_{SFC})

Evaluation de la performance	NSE
Très bonne	$0.75 < NSE \leq 1.00$
Bonne	$0.65 < NSE \leq 0.75$
Satisfaisante	$0.50 < NSE \leq 0.65$
Insatisfaisante	$NSE \leq 0.50$

Valeurs du coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe (traduit d'après McCuen et al., 2006).



MODÉLISATION HYDROLOGIQUE

↳ Simulations prospectives : choix des scénarii climatiques

Pour chaque scénario RCP, choix d'un modèle RCM -> définition de **couples RCP-RCM** pour les simulations prospectives

RCP8.5

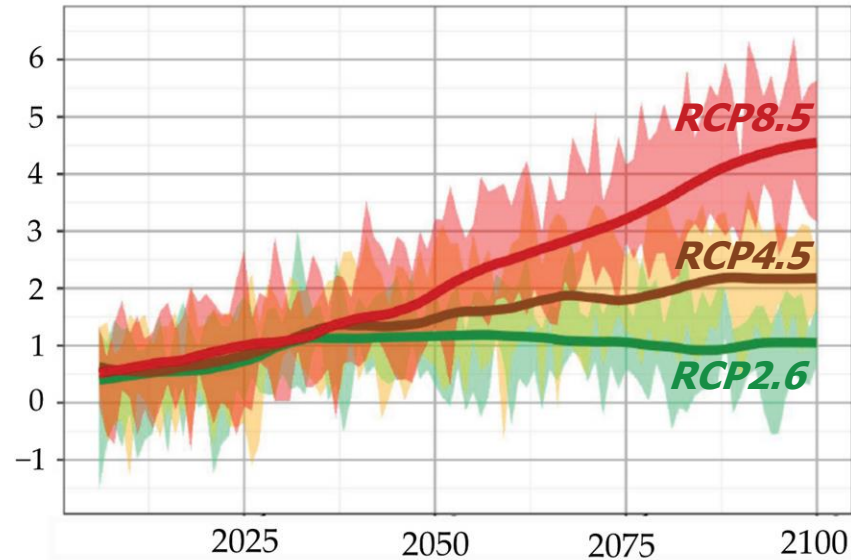
augmentation progressive des anomalies de température jusqu'en 2100

RCP4.5

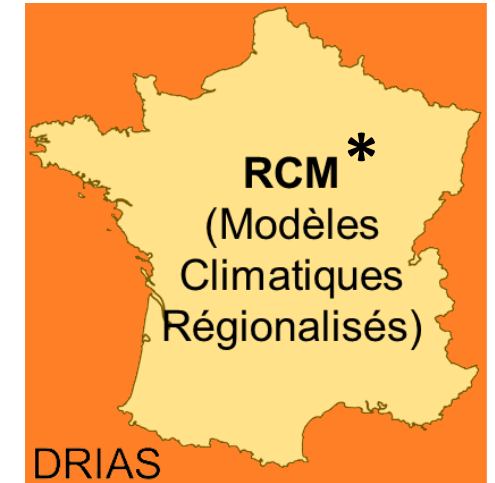
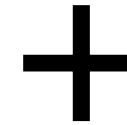
augmentation puis stabilisation des anomalies de la température de l'air avant 2100

RCP2.6

pic puis diminution et stabilisation des anomalies de la température de l'air autour de l'année 2100



Evolution de la température de l'air (°C) selon différents RCP (Scénarii d'émission des gaz à effet de serre)



Données climatiques
(DRIAS-2020 <http://www.drias-climat.fr/>)
Rapport GIEC

* Les **modèles climatiques régionaux (RCM)** affinent les données des modèles climatiques globaux en simulant le climat à une échelle locale avec une haute résolution spatiale, permettant une meilleure représentation des phénomènes géographiques et climatiques spécifiques.



MODÉLISATION HYDROLOGIQUE

↳ Simulations prospectives : choix des scénarii climatiques

Pour chaque scénario RCP, choix d'un modèle RCM -> définition de **couples RCP-RCM** pour les simulations prospectives

RCP8.5

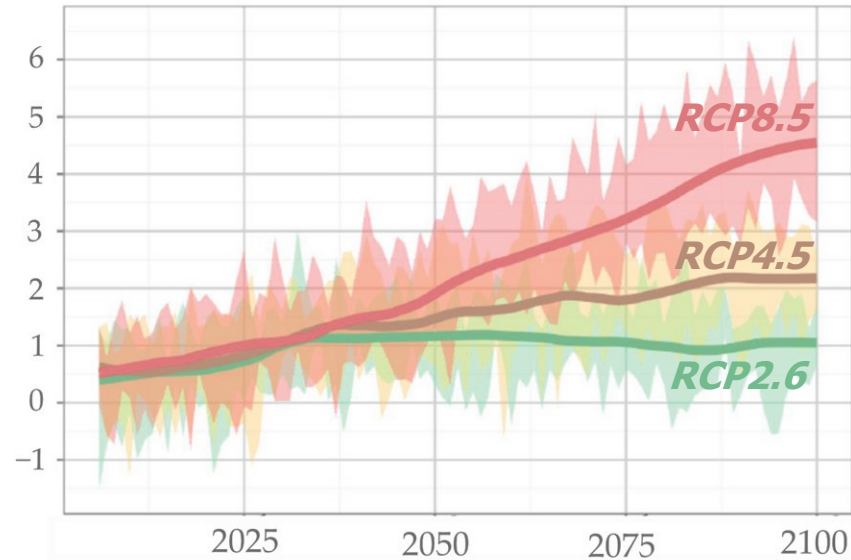
augmentation progressive des anomalies de température jusqu'en 2100

RCP4.5

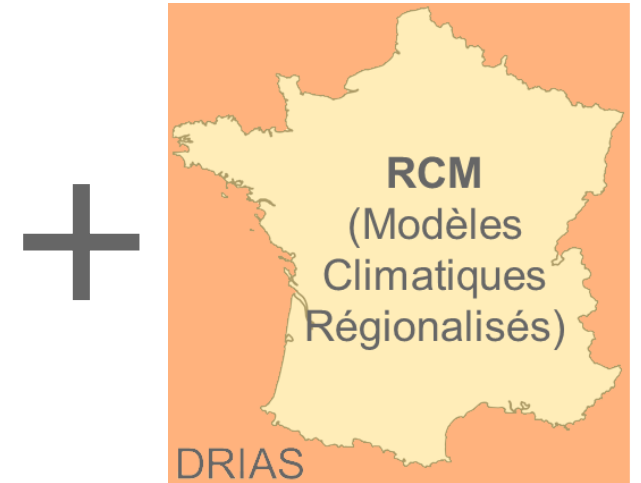
augmentation puis stabilisation des anomalies de la température de l'air avant 2100

RCP2.6

pic puis diminution et stabilisation des anomalies de la température de l'air autour de l'année 2100



Evolution de la température de l'air (°C) selon différents RCP (Scénarii d'émission des gaz à effet de serre)



Données climatiques (DRIAS-2020 <http://www.drias-climat.fr/>) Rapport GIEC

« SCÉNARIO OPTIMISTE »

Modèle Climatique Régionalisé **Aladin63**

Scénario de faible émission des GES **RCP2.6**

« SCÉNARIO INTERMÉDIAIRE »

Modèle Climatique Régionalisé **RACMO22E**

Scénario d'émissions intermédiaire des GES **RCP4.5**

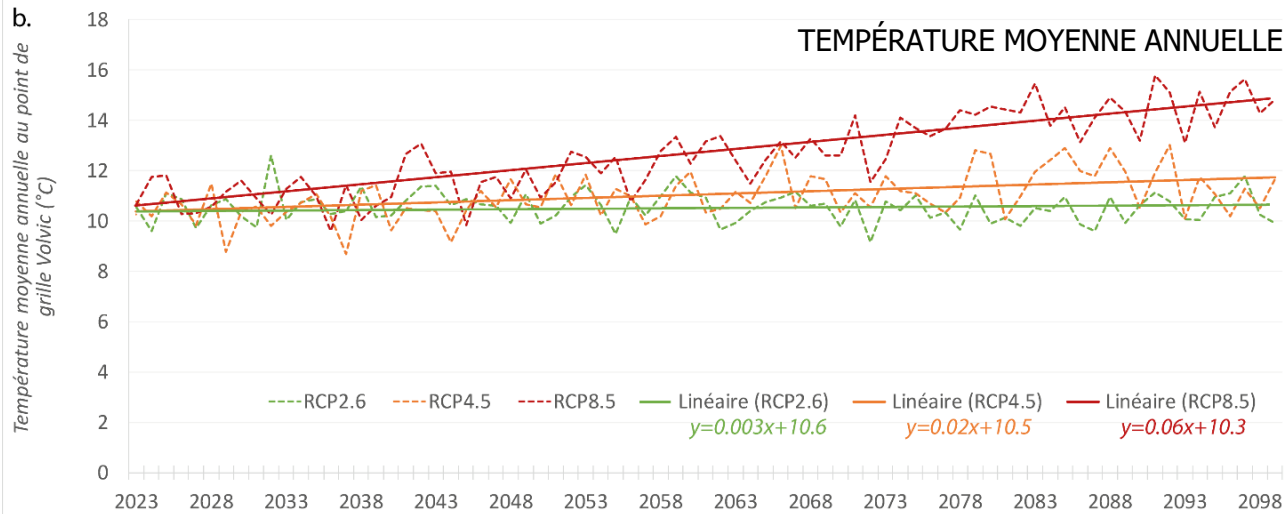
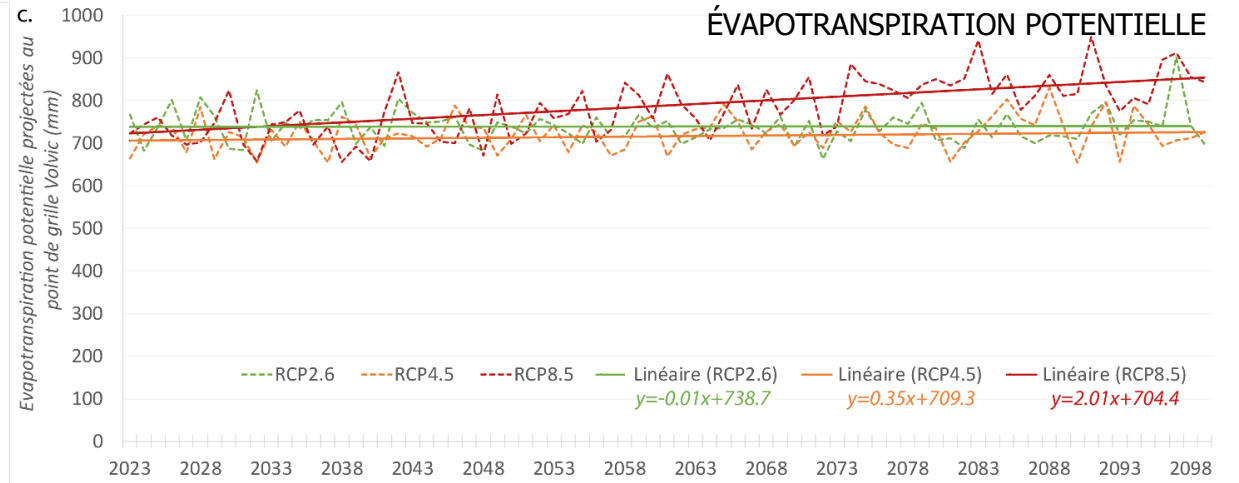
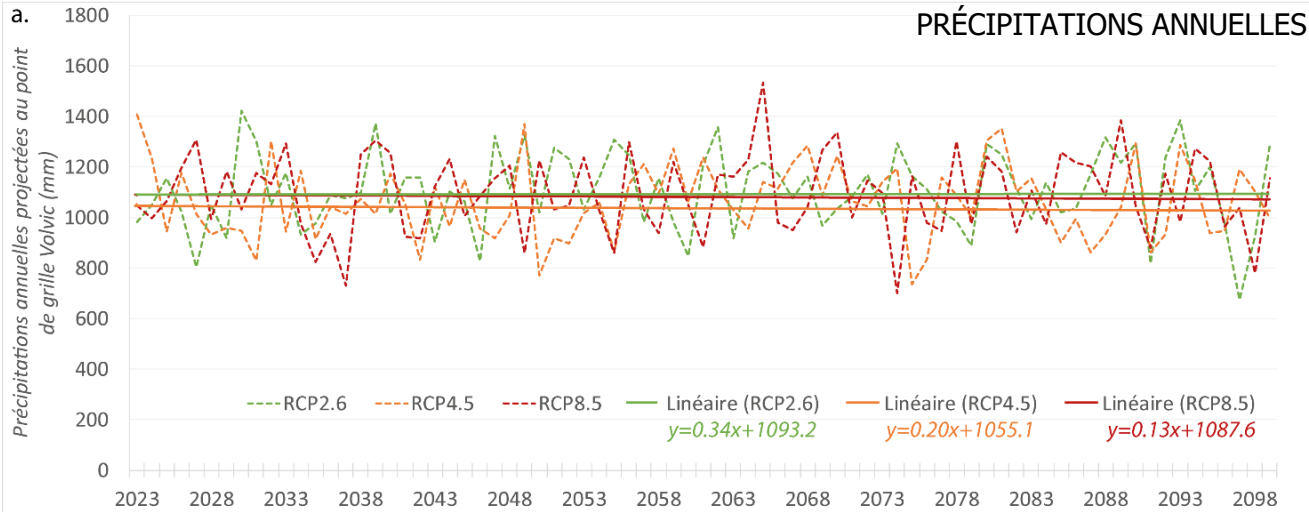
« SCÉNARIO AGGRAVÉ »

Modèle Climatique Régionalisé **RegCM4-6**

Scénario de forte émission des GES **RCP8.5**

MODÉLISATION HYDROLOGIQUE

↳ *Simulations prospectives : scénarii climatiques testés à Volvic (évolution des paramètres météorologiques au point de grille)*



« SCÉNARIO OPTIMISTE »

RCP2.6 – RCM Aladin63

« SCÉNARIO INTERMÉDIAIRE »

RCP4.5 – RCM Racmo22e

« SCÉNARIO AGGRAVÉ »

RCP8.5 – RCM RegCM4-6

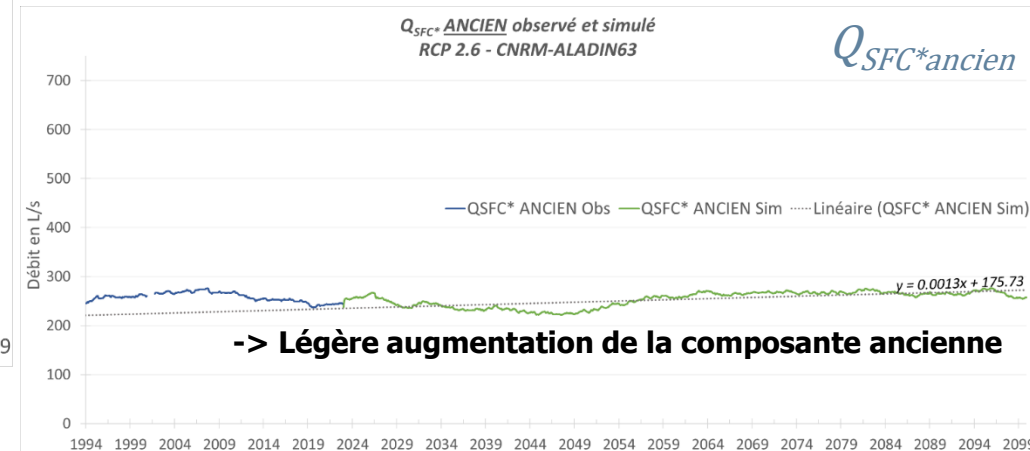
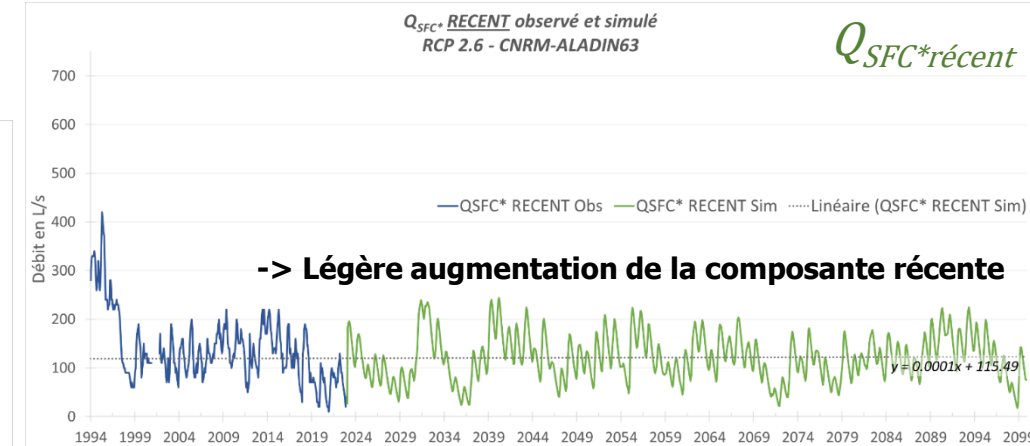
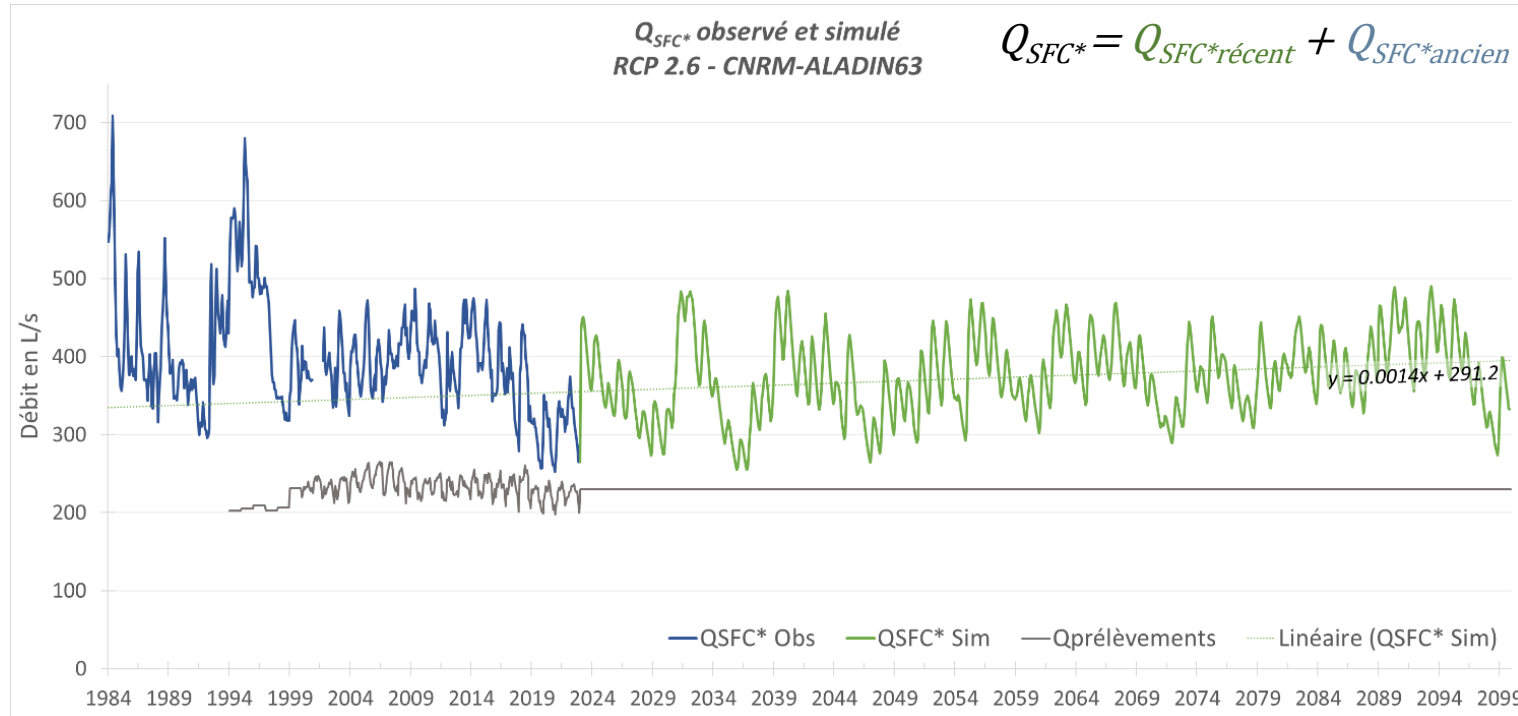


MODÉLISATION HYDROLOGIQUE

↳ *Simulations prospectives : scénario favorable RCP 2.6 – RCM Aladin 63*

« SCÉNARIO OPTIMISTE »

RCP2.6 – RCM Aladin63



Le **scénario 2.6** n'est validé que dans 10% des 300 scénarios testés (Valérian et al., 2022) le rendant **peu probable**.

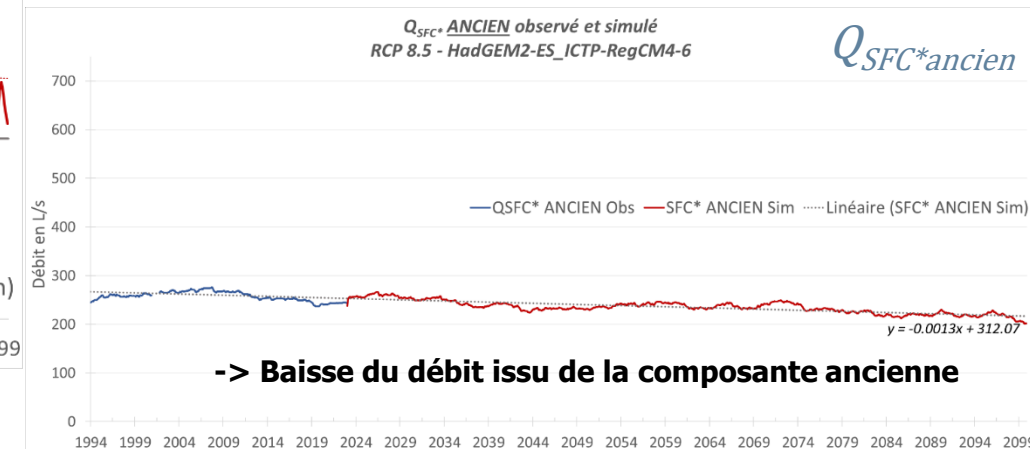
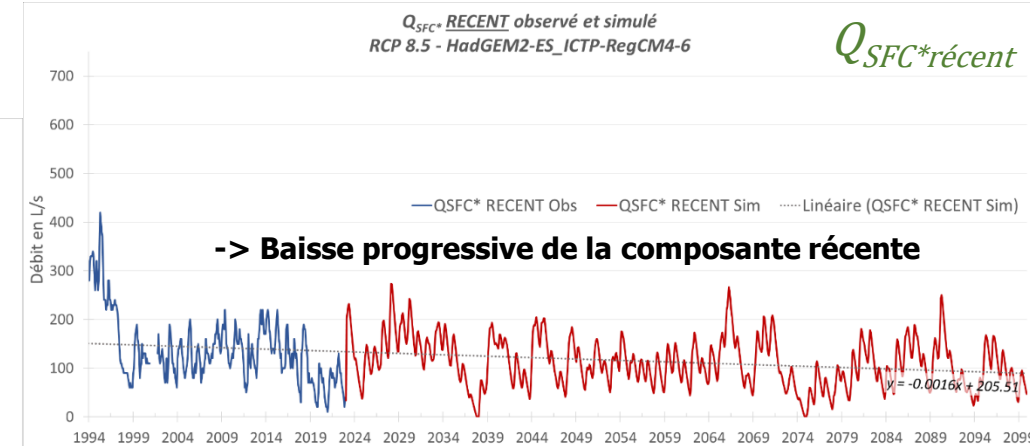
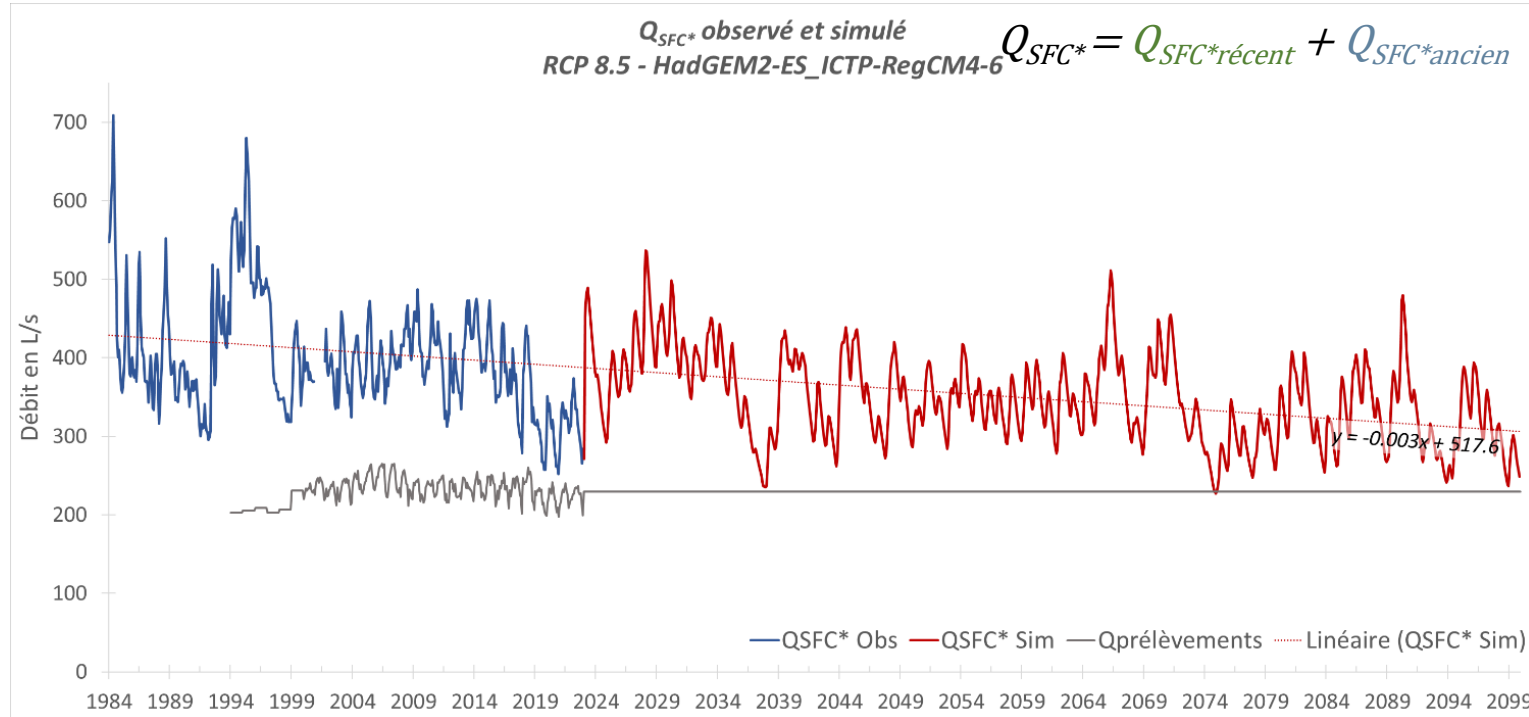


MODÉLISATION HYDROLOGIQUE

↳ *Simulations prospectives : scénario pessimiste RCP 8.5 – RCM RegCM4-6*

« SCÉNARIO AGGRAVÉ »

RCP8.5 – RCM RegCM4-6



Le **scénario 8.6** n'est validé que dans 10% des 300 scénarios testés (Valérian et al., 2022) le rendant **peu probable**.

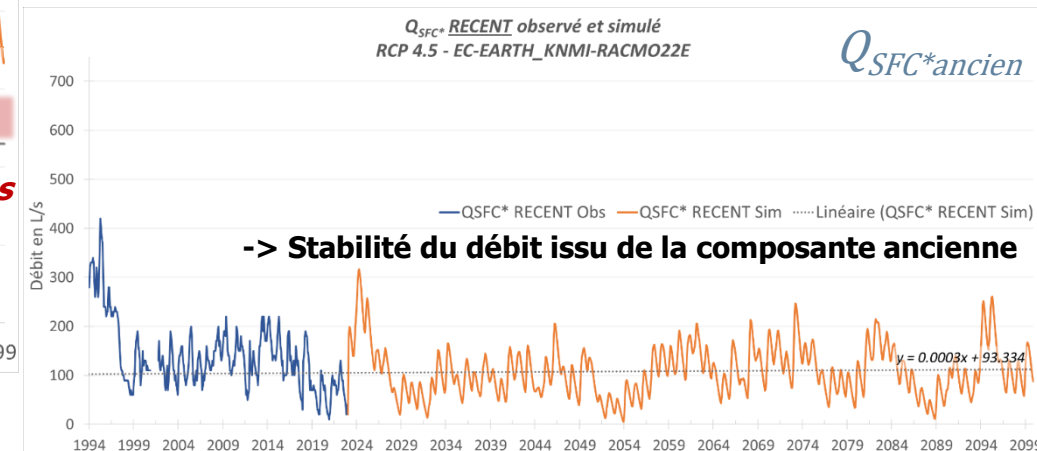
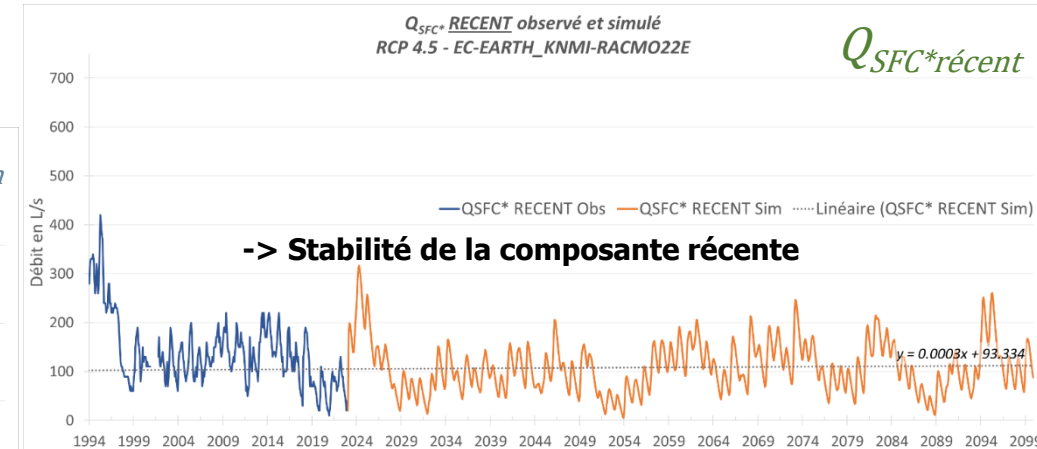
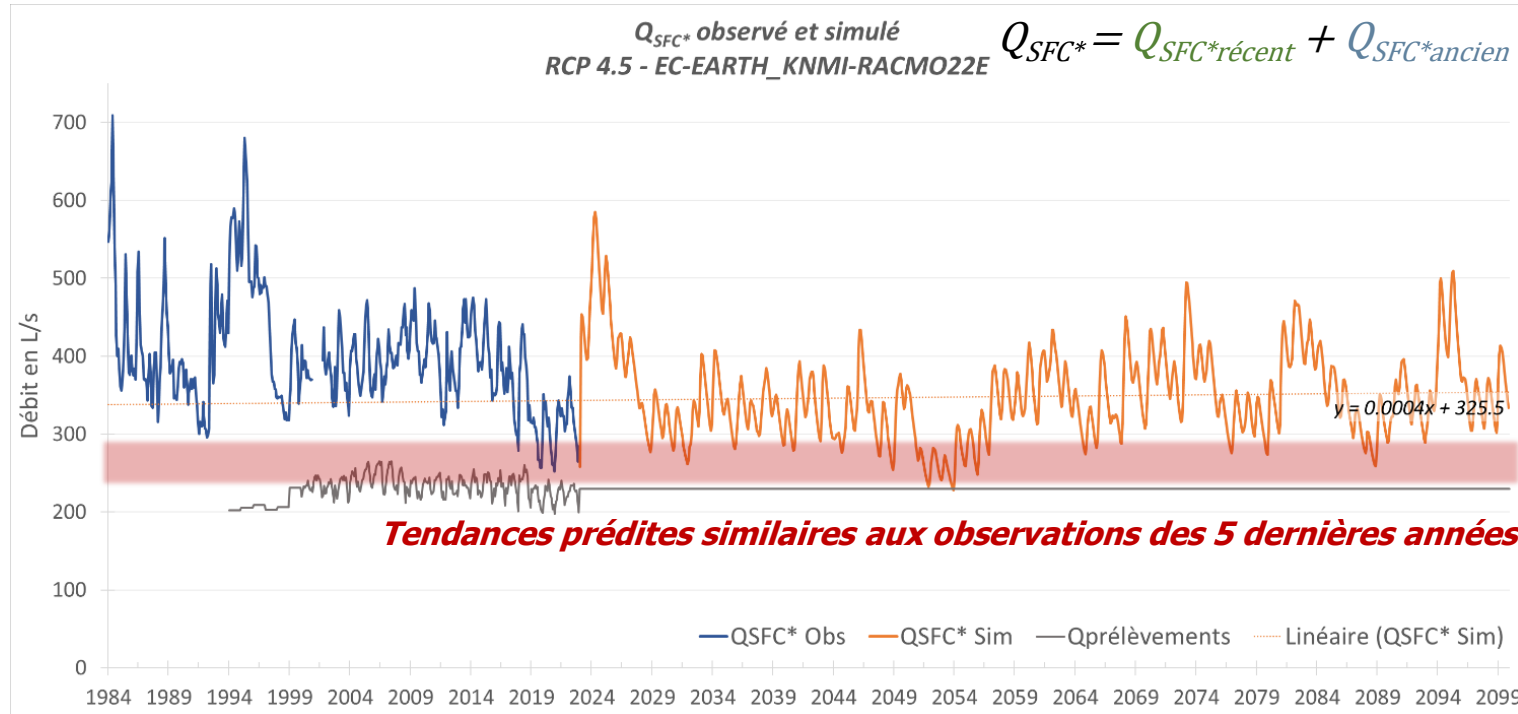


MODÉLISATION HYDROLOGIQUE

↳ *Simulations prospectives : scénario intermédiaire RCP 4.5 – RCM Racmo22E*

« SCÉNARIO INTERMÉDIAIRE »

RCP4.5 – RCM Racmo22e



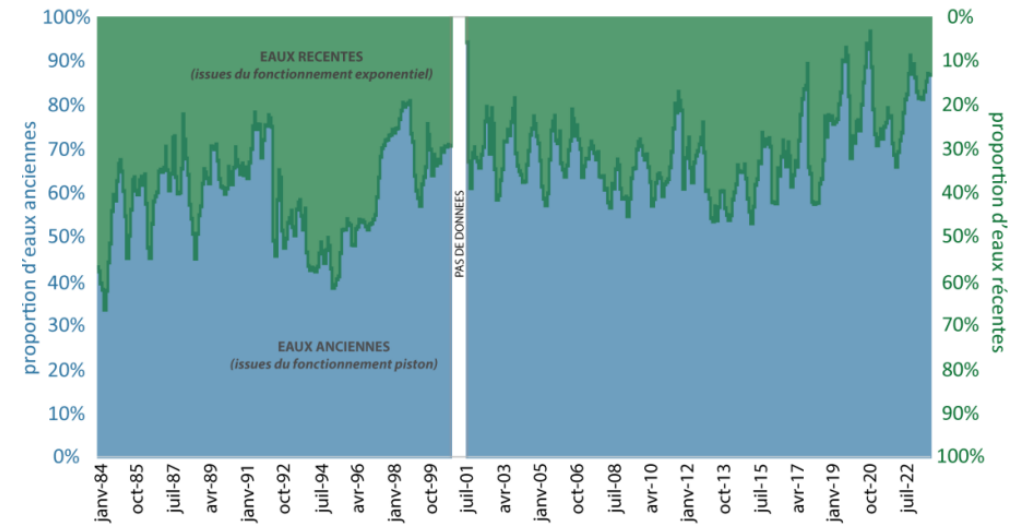
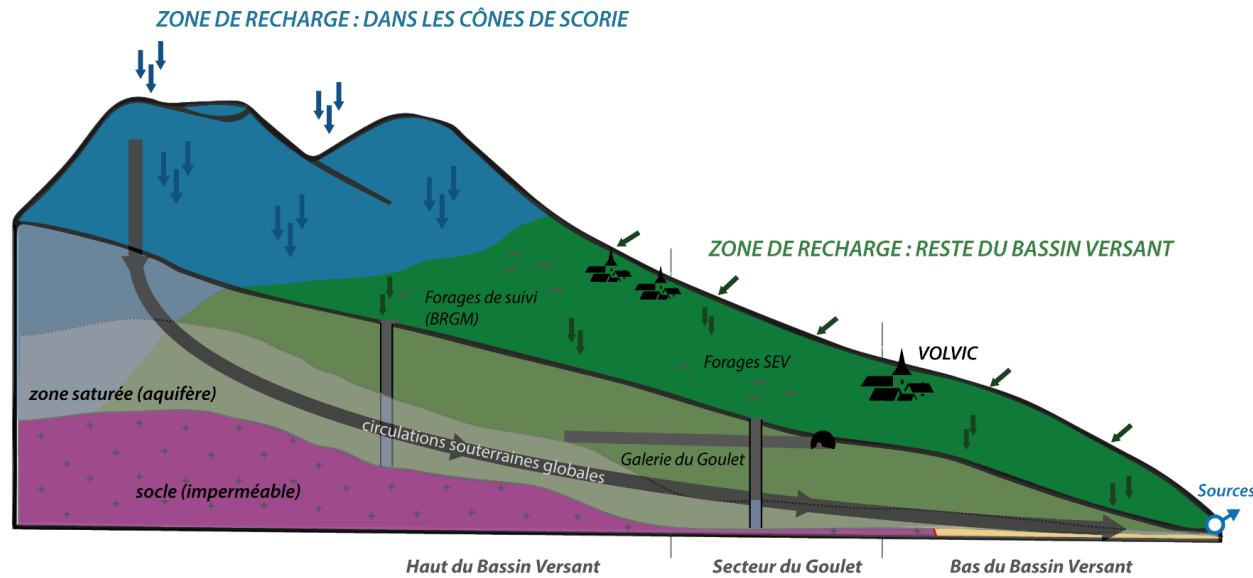
Le scénario 4.5 est pour le moment **le plus probable** (Valérian et al., 2022)

A priori pas de baisse ni d'augmentation des composantes ancienne et récente MAIS périodes de hautes et basses eaux plus contrastées.
= **périodes d'étiage comme celle de 2019 de plus en plus récurrentes.**



INFORMATIONS À RETENIR

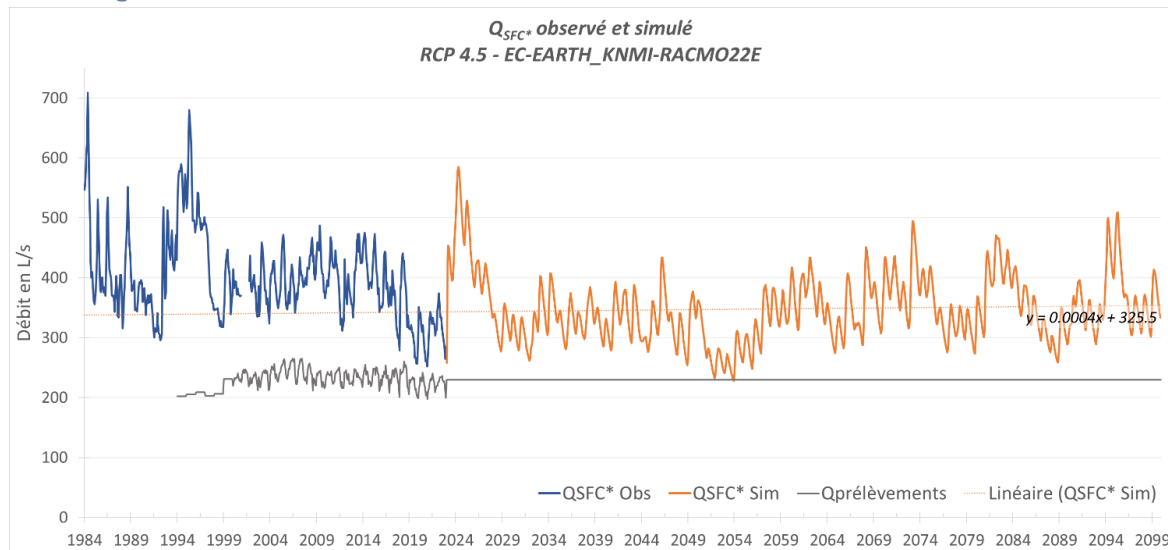
MODÈLE CONCEPTUEL



Système constitué d'une **composante ancienne** à laquelle s'ajoute une **composante récente** issue de la recharge annuelle.

Tendance à la **diminution progressive** (depuis 1980) de la contribution de la **composante récente** en lien avec le climat.

MODÈLE MATHÉMATIQUE



Scénario médian le plus probable (RCP 4.5 – RACMO22E)
= périodes d'étiage prononcé de plus en plus récurrentes

A envisager : test d'autres scénarii et nouveaux scénarii SSP (6^e rapport GIEC) bientôt disponibles : évolution socio-économique.





MERCI DE VOTRE ATTENTION