

AQUIFER PROJECT: “Innovative instruments for an integrated management of groundwater in a context of an increasing scarcity of hydrological resources”

ATELIERS DE FORMATION

Date: 30/04/2023

TABLE DES MATIERES

1. Introduction	2
2. Description de l'activité	2
3. Atelier de formation en France	2
3.1. Participation	3
3.2. Agenda	3
3.3. Diaporamas.....	4
3.4. Photos	4
4. Atelier de formation au Portugal	5
4.1. Participation	5
4.2. Agenda	6
4.3. Diaporamas.....	7
4.4. Photos	7
5. Atelier de formation en Espagne	8
5.1. Participation	8
5.2. Agenda	8
5.3. Diaporamas.....	10
5.4. Photos	10
ANNEXES	11

1. INTRODUCTION

Le projet Interreg Sudoe AQUIFER intitulé "Outils innovants pour l'intégration des eaux souterraines dans un contexte de raréfaction des ressources en eau" est financé par le Fonds européen de développement régional (FEDER) dans le cadre du programme Interreg SUDOE V (2014-2020). Son objectif principal est de capitaliser, tester, diffuser et transférer des pratiques innovantes pour la préservation, la surveillance et la gestion intégrée des aquifères, utiles lors de la prise de décision en matière de gestion des ressources en eau souterraine. Pour atteindre cet objectif, le projet est divisé en 4 groupes de tâches spécifiques regroupant 15 tâches concrètes avec 25 livrables et 10 résultats. De plus, le projet comprend trois groupes de tâches transversales regroupant 17 tâches concrètes.

Ce document se réfère à l'activité 3.1 – Mise en place d'un service d'aide à la décision pour la gestion des eaux souterraines. Il a été écrit par Sandra Beranger (BRGM), responsable du projet AQUIFER pour le BRGM.

2. DESCRIPTION DE L'ACTIVITE

Activité: 3.1 – Mise en place d'un service d'aide à la décision pour la gestion des eaux souterraines.

Livrable : E.3.1.2. Atelier de formation

Afin de former les gestionnaires de l'eau aux nouveaux outils disponibles, un atelier de formation a été mis en place en France. Il a été dupliqué en Espagne et au Portugal afin de présenter les travaux réalisés en France et dans le pays hôte et de sensibiliser les acteurs aux possibilités de transfert en exposant les données requises et méthodes mises en œuvre.

Ces ateliers s'adressaient aux gestionnaires de l'eau et organisations associées, aux institutions, aux chercheurs et universitaires, aux associations en organisations travaillant dans le domaine de l'eau.

Les chapitres suivants détaillent la mise en œuvre de ces ateliers dans chaque pays.

3. ATELIER DE FORMATION EN FRANCE

Date : 4 avril 2023

Horaires : 14h00-17h00

Lieu : Le Belvédère, Toulouse

L'atelier de formation a été organisé par les partenaires français du projet SUDOE AQUIFER (BRGM et Aqua-Valley) et animé par Sandra Béranger et Pierre Le Cointe (BRGM).

3.1. PARTICIPATION

Un total de 26 participants étaient présents à l'atelier (liste reprise en annexe 2). La plupart d'entre eux sont issus d'organismes publics ou privés ayant trait à la gestion de la ressource en eau (universitaires, représentants de l'Etat et de la Région Occitanie, entreprises privées, etc.).

3.2. AGENDA

L'atelier a été divisé en 3 temps d'une heure chacun :

- Le logiciel GARDENIA, modélisation des niveaux des eaux souterraines
- Le site internet MétéEAU'nappes, prévision du niveau des eaux souterraines, Application au bassin Adour-Garonne
- Le site internet VigiNappe, prévision des volumes prélevables en eaux souterraines, Application à la plaine alluviale de la Garonne, du Tarn et de l'Aveyron dans le département de Tarn-et-Garonne.

Il a été organisé à la suite de la conférence de clôture du projet, qui avait lieu le matin même. Le programme de cet après-midi a été inséré dans l'invitation à la conférence de clôture et est disponible dans le livrable associé à cet évènement (T2.3.1). Les participants ont ainsi pu assister aux deux demi-journées.

Les participants étaient invités à poser des questions au fil de l'eau.

3.3. DIAPORAMAS

Trois diaporamas ont été préparés. Les premières pages sont reprises sur l’Illustration 1 tandis que la version complète est disponible dans l’annexe 1.



ILLUSTRATION 1 – PREMIERE PAGE DE CHAQUE DIAPORAMA PRESENTE EN FRANCE

3.4. PHOTOS

Une photo de l’atelier est disponible sur l’Illustration 2.



ILLUSTRATION 2 – ATELIER DE FORMATION EN FRANCE

4. ATELIER DE FORMATION AU PORTUGAL

Date : 14 mars 2023

Horaires : 14h00-18h20

Lieu : LNEC, Lisbonne

L'atelier de formation a été organisé par les partenaires portugais du projet SUDOE AQUIFER (Université de Lisbonne et Portuguese Water Partnership) et animé par Sandra Béranger (BRGM).

4.1. PARTICIPATION

Un total de 10 à 15 participants étaient présents à l'atelier. Les participants sont principalement issus d'organismes publics et du monde de la recherche. La liste des personnes présentes jusqu'à la fin de l'atelier est jointe en annexe 4.

4.2. AGENDA

L'atelier a été divisé en 3 temps d'une heure chacun :

- The GARDENIA software : groundwater level modelling
- The MétéEAU'Nappes website : groundwater level forecasts
- The VigiNappe website : groundwater withdrawal forecasts

Il a été organisé à la suite de la conférence de clôture du projet, qui avait lieu le matin même. Le programme de cet après-midi a été inséré dans l'invitation à la conférence de clôture et est disponible dans le livrable associé à cet événement.

Les participants étaient invités à poser des questions au fil de l'eau, mais un temps d'échange était également prévu en fin de journée pour discuter de la transférabilité de nos travaux au Portugal, des besoins en données, en historiques de suivi, en modélisation.

4.3. DIAPORAMAS

Trois diaporamas ont été préparés. Les premières pages sont reprises sur l’Illustration 3 tandis que la version complète est disponible dans l’annexe 3.



ILLUSTRATION 3 – PREMIERE PAGE DE CHAQUE DIAPORAMA PRESENTE AU PORTUGAL

4.4. PHOTOS

Une photo de l’atelier est disponible sur l’Illustration 2.



ILLUSTRATION 4 – ATELIER DE FORMATION AU PORTUGAL

5. ATELIER DE FORMATION EN ESPAGNE

Date : 29 mars 2023

Horaires : 10h00-16h40

Lieu : DAMM, El Prat de Llobregat

L'atelier de formation a été organisé par un des partenaires espagnols du projet SUDOE AQUIFER (CUADLL) et animé par Vivien Hakoun et Sandra Béranger (BRGM).

5.1. PARTICIPATION

Un total de 25 participants étaient présents à l'atelier (liste disponible en annexe 7). Les participants étaient issus principalement de l'ICRA-CERCA, CUADLL, UB, ACA, IGME, AMPHOS 21, MAIMA UB, UPC, CWP et IDAEA-CSIC.

5.2. AGENDA

L'atelier a été divisé en 4 temps :

- The GARDENIA software : groundwater level modelling

- The MétéEAU'Nappes website : groundwater level forecasts
- The VigiNappe website : groundwater withdrawal forecasts
- Example Llobregat site application

Le programme de cette journée est repris en annexe 5.

Les participants étaient invités à poser des questions au fil de l'eau, mais un temps d'échange était également prévu pour discuter de la transférabilité de nos travaux à l'Espagne, des besoins en données, en historiques de suivi, en modélisation.

L'organisation sur la journée a permis de dédier un temps à la mise en pratique du logiciel GARDENIA : chaque participant a téléchargé le logiciel sur son ordinateur portable et a pu mettre en pratique ce logiciel sur un cas concret, guidé par les formateurs du BRGM.

Le temps de la pause méridienne a été l'occasion d'échanger avec les participants de l'atelier autour d'un buffet pris en charge par le BRGM.

5.3. DIAPORAMAS

Trois diaporamas ont été préparés. Les premières pages sont reprises sur l’Illustration 5 tandis que la version complète est disponible dans l’annexe 6.



ILLUSTRATION 5 – PREMIERE PAGE DE CHAQUE DIAPORAMA PRESENTE EN ESPAGNE

5.4. PHOTOS

Une photo de l’atelier est disponible sur l’Illustration 6.



ILLUSTRATION 6 – ATELIER DE FORMATION EN ESPAGNE

ANNEXES

- ANNEXE 1. Diaporamas des ateliers de formation en France
- ANNEXE 2. Liste des participants en France
- ANNEXE 3. Diaporamas des ateliers de formation au Portugal
- ANNEXE 4. Liste des participants au Portugal
- ANNEXE 5. Programme des ateliers de formation en Espagne
- ANNEXE 6. Diaporamas des ateliers de formation en Espagne
- ANNEXE 7. Liste des participants en Espagne

ANNEXE 1.

DIAPORAMAS DES ATELIERS DE FORMATION EN FRANCE

Atelier de formation
4 avril 2023
Toulouse, France

Projet AQUIFER

Atelier technique :
Introduction à la modélisation
Logiciel GARDENIA

Pierre Le Cointe, BRGM

Le projet AQUIFER est financé par le programme Interreg Sudoe et le Fond de Développement Régional Européen (FEDER)

Modélisation hydro(géo)logique

Modèles globaux
(modèles "pluie-débit" ou "pluie-niveau")

"Black box"

On ne connaît ni les processus ni les paramètres qui régissent le processus global. On se contente de décrire le processus global par une fonction de transfert.

Plan de base hydrologique :

Modèles locaux
(procédés : précipitation ou infiltration, etc.)

Modèles de type "boîte grise" ou "boîte blanche". On connaît les processus et les paramètres qui régissent le processus global. On se contente de décrire le processus global par une fonction de transfert.

Le cycle de l'eau

Modèle hydrologique global à réservoirs

- Approche simplifiée du cycle de l'eau sur un petit bassin versant, prenant en compte une entrée homogène (pluie et évapotranspiration potentielle) et une seule sortie (débit de rivière et/ou niveau piézométrique)
- Un processus en 2 étapes : une fonction de "production" et une fonction de transfert

Fonction de **production** : calcule l'eau qui entre dans le système, i.e. la **pluie efficace**

Fonction de **transfert** : calcule comment l'eau se répartit et quand elle atteint l'aquifère sous-jacent puis sort du bassin (débit de rivière à l'exutoire)

Le cycle de l'eau Un rapide aperçu

Modèle hydrologique global à réservoirs GARDENIA

Schéma de GARDENIA avec un réservoir souterrain

Principes généraux du code de calcul GARDENIA

- Transferts entre réservoirs régis par des **lois de décroissance exponentielles** (spécifiques à chaque réservoir)
- Lois définies par des **paramètres dimensionnels** du modèle (capacité de rétention en eau du sol, temps de transfert, seuils de débordement...)

En raison du caractère global (à l'échelle d'un bassin versant) de cette schématisation et de la complexité du véritable système hydrologique, ces paramètres, bien qu'ayant un sens physique, sont **difficiles à définir a priori à partir des caractéristiques physiographiques** du bassin versant (géologie, nature et occupation du sol...).

Ces paramètres doivent donc être **déterminés par calibration**.

Liens de téléchargement

- GARDÉNIA** (acronyme pour « modèle **G**lobal **A** Réservoirs pour la simulation des **D**ébits et des **N**iveaux **A**quifères »)
- Accès libre (Version 8.8. mai 2021): <https://www.brgm.fr/fr/logiciel/gardenia-logiciel-modelisation-hydrologique-globale-bassin-versant>
- Documentation :**
 - RP-62797-FR:** Guide de l'utilisateur
 - RP-61720-FR:** Tutoriels avec GARDENIA "vos premiers modèles"
 - RP-64500-FR:** Comparaison entre GARDENIA et les modèles physiques

Principes généraux du code de calcul GARDENIA

- Capacité de stockage en eau du réservoir sol progressif (mm)** permet le calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR) et de la pluie efficace
- Hauteur d'équi-ruissellement percolation (mm)** permet le calcul de la répartition de l'écoulement entre ruissellement superficiel et percolation / recharge / infiltration vers la nappe
- Temps de demi-percolation (mois)** détermine le temps de transfert de la recharge vers l'aquifère sous-jacent
- Temps de demi-tarissement (mois)** détermine le temps de vidange du réservoir souterrain représentant l'aquifère vers la sortie du bassin versant : cette sortie correspond au débit de base du cours d'eau
- Niveau de base de la nappe (m NGF)
- Coefficient d'emménagement de la nappe (%)

Application

- Extension ou reconstitution de chroniques de débit ou de niveaux piézométriques** sur une période durant laquelle on ne connaît que les données d'entrée (pluie, ETP)
- Simulations prédictives / prévisions** des débits de rivière et/ou des niveaux piézométriques (évaluation statistique dans le cas de GARDENIA)
- Evaluation des paramètres à utiliser pour un **bassin non-jaugé** en appliquant une formule de **transposition** régionale (à utiliser avec précaution car il est nécessaire d'avoir un grand nombre de calibrations sur des bassins versants de la même région et un minimum de jaugeages ponctuels)
- Estimation des différents termes du **bilan hydrique** (avec précaution)
- Préparation d'un modèle hydrodynamique / maillé** (Paramètres hydro-climatiques, détermination des zones de recharge homogènes...)

Principes généraux du code de calcul GARDENIA

Débit = ruissellement + débit de base

RUMAX

RUIPER Niveau piézométrique

THG

NP-G/S+NB

TG

Données requises

- Chroniques sans trou** dans les données d'entrée: **pluie et évapotranspiration** (et éventuellement température de l'air, si on prend en considération la fonte de la neige).
- Option: chronique de prélèvements sur le bassin : débits de pompage ou d'injection, en nappe, en rivière ou les deux.
- Chroniques d'observation (débit à l'exutoire du bassin versant ou niveau piézométrique). Elles peuvent **avoir des trous**, mais elle doivent couvrir la période des données d'entrée. Ces observations seront comparées aux données de sortie du modèle.
 - Trous dans les chroniques de débits de rivière: code '-2'
 - Trous dans les chroniques de niveaux piézométriques : code '9999'
- Le format de la date : "jj/mm/aaaa".
- Date et valeurs peuvent être séparées par une tabulation, un espace ou un point-virgule.
- Tous les fichiers doivent être placés dans le même répertoire.
- Configuration de l'ordinateur : le séparateur de décimales doit être un point, jamais une virgule.
- Pour mettre en forme les séries de données, les pas de temps..., l'outil interne Shalimar est disponible avec la distribution Gardénia, sinon, des scripts **R**, **Python**... peuvent faire ce travail.

Analyse de données préliminaire

- Fonctionnement hydrogéologique**
 - Hétérogénéités vs. Approche globale
 - Surface du bassin versant hydrologique (Est-il différent du bassin versant topographique ?)
 - Modifications apportées par l'homme: canaux, prélèvements, déviation d'eau...
 - ...
- Pluie et ETP**
 - Reconstitution de données manquantes
 - Contrôle de l'homogénéité
 - ...
- Niveaux piézométriques et débits de cours d'eau**
 - Précision des données mesurées (repères de mesure, incertitudes...)
 - => Pour définir ce qu'on peut attendre des simulations
 - Analyses descriptive, statistique des variables (niveaux piézométriques, pluie) – analyses de chroniques
 - => Pour identifier les processus spécifiques que le modèle devra reproduire (analyses des chroniques avec le package R: ESTHER).

Cycle annuel précipitations - recharge

Capacité du sol = 100 mm (bilan RUMAX / Thornthwaite)

Modèles conceptuels avec GARDENIA

1 seul réservoir souterrain

2 réservoirs souterrains

1 réservoir souterrain avec 2 sorties

+ nouvelle option : un seuil de débordement dans le réservoir intermédiaire H peut être ajouté, l'eau qui s'écoule par ce seuil peut quitter le système, être ajoutée à l'écoulement souterrain ou redirigée vers le réservoir souterrain.

Bilan dans le réservoir sol – Fonction de « Production »

- Réservoir sol progressif (Edijatno et Michel)**

On veut la capacité maximale de stockage en eau du réservoir sol progressif.

$$S_x = \frac{P - ETP}{1 - \frac{ETP}{P}}$$

« S_x » (mm) = capacité maximale de stockage en eau du réservoir sol progressif

La combinaison de deux réservoirs sols en série est possible :

- Un réservoir de type « réserve utile » et
- Un « réservoir sol progressif ».

L'expérience montre toutefois que cette pratique n'améliore pas les résultats des simulations. Le réservoir sol progressif seul est généralement le plus adapté.

Bilan dans le réservoir sol – Fonction de « Production »

- La capacité de stockage en eau du réservoir sol est la « réserve d'eau disponible pour l'évapotranspiration » ou la « capacité de rétention en eau du sol », excluant l'eau liée. Elle intègre aussi la capacité d'interception des parties aériennes de la végétation, de même que de possibles dépressions dans le sol (fauces, sillons...).
- Deux schémas sont possibles :
 - Un réservoir de type « réserve utile » fonctionnent en « tout ou rien »
 - Un réservoir progressif avec des lois de reprise/vidange quadratiques (recommandé)
- Schéma de distribution du réservoir sol de type « réserve utile » (Thornthwaite)
 - S(t) désigne le remplissage du réservoir sol en fonction du temps.
 - RUMAX = capacité maximale de stockage en eau du réservoir sol « réserve utile », correspondant au paramètre à définir / caler dans GARDENIA.
 - La pluie efficace Pn est calculée de la manière suivante :

Bilan dans le réservoir intermédiaire – Fonction de « Transfert »

Le réservoir H représente la zone non saturée. La hauteur d'eau qu'il contient à un instant donné est notée H. Il est alimenté en eau par la pluie nette ALIMH provenant des réservoirs sol, et est vidangé par deux exutoires :

- Percolation dans le réservoir souterrain G1 suivant une loi linéaire (vidange exponentielle) de constante de temps THG :

$$ALIMG = H \cdot dt / THG$$
 (dt = durée du pas de temps)
- Écoulement à l'extérieur du bassin, sous forme d'une composante rapide QH du débit, selon une loi non-linéaire contrôlée par le paramètre RUIPER. Ce paramètre RUIPER est en fait la hauteur d'eau dans le réservoir H pour laquelle la percolation ALIMG et l'écoulement QH sont égaux :

$$QH = H \cdot dt / (THG \cdot RUIPER / H)$$

- « RUIPER » (mm) = Niveau d'équi-ruisselement percolation
 - RUIPER faible = ruissellement prépondérant
 - RUIPER élevé = percolation prépondérante
- « THG » (mois) = Temps de demi-percolation
 - Temps au bout duquel la moitié du réservoir intermédiaire s'est vidangé dans le réservoir souterrain.
 - Caractérise la vitesse de recharge de la nappe.

Bilan dans le réservoir souterrain G1

Le réservoir souterrain G1 produit l'écoulement lent. Il représente généralement l'aquifère. La hauteur d'eau qu'il contient à un instant donné est notée G1.

« TG1 » (mois) = Temps de demi-tarissement souterrain n°1

- Temps au bout duquel, en l'absence de recharge, le débit de la composante lente est divisé par deux.

« TG2 » (mois) = Temps de demi-transfert vers la nappe profonde

- Caractérise la vitesse de transfert du réservoir G1 vers le réservoir G2

G1 est alimenté en eau par le réservoir intermédiaire H.

G1 est vidangé, dans le cas le plus général, par deux exutoires :

- Par écoulement vers l'exutoire du bassin sous forme de débit lent QG1, suivant une loi de vidange exponentielle de constante de temps TG1 : $QG1 = G1 \cdot dt / TG1$
- Par drainage dans le réservoir souterrain lent G2 (acquifère profond), suivant une loi de vidange exponentielle de constante de temps TG12 : $ALIMG2 = G1 \cdot dt / TG12$

Echange souterrain externe

Dans les bassins versants ayant une composante souterraine conséquente, il est fréquent qu'un échange de débit souterrain se produise avec l'extérieur :

- Il peut arriver qu'une partie de la composante souterraine n'apparaisse pas dans le débit mesuré à l'exutoire. Cette partie de l'écoulement souterrain peut se propager dans la nappe souterraine latéralement vers l'extérieur du bassin, ou bien « sous » la section de jaugeage. On a donc une perte de débit (échange souterrain négatif). Ce débit perdu réapparaît dans un bassin voisin, ou bien dans la mer.
- A l'opposé, il peut arriver qu'un débit souterrain additionnel provienne d'un bassin versant voisin. On a alors un gain de débit (échange souterrain positif).

Cet échange souterrain est modélisé par un coefficient d'échange souterrain externe :

Cas avec un seul réservoir souterrain G1 :

$$Q_{\text{Echange Souterr}} = \text{Fact_Echang} \cdot QG1_{\text{Avant Echange}}$$

d'où :

$$Q_{\text{Echange Souterr}} = QG1 \times \text{Fact_Echang} / (1 + \text{Fact_Echang})$$

Cas avec deux réservoirs souterrains G1 et G2 :
La composante souterraine pérenne est le débit QG2.

$$Q_{\text{Echange Souterr}} = QG2 \times \text{Fact_Echang} / (1 + \text{Fact_Echang})$$

Dans tous les cas, l'échange souterrain affecte la composante souterraine du débit calculé mais n'affecte pas le niveau du réservoir souterrain. Il n'affecte donc pas le niveau de nappe calculé.

« Fact_Echang » (%) = Facteur d'échange souterrain externe

- Apport ou export de débit souterrain.
- Utilisé uniquement en cas de calcul de débit de rivière

Bilan dans le réservoir souterrain profond G2

Ce réservoir facultatif, quand il existe, représente un aquifère profond ou une partie inférieure de l'aquifère. La hauteur d'eau qu'il contient à un instant donnée est notée G2.

Il est alimenté en eau par le réservoir souterrain G1 ; il est vidangé uniquement par un « débit très lent » ou « écoulement souterrain lent » QG2. Un tel débit QG2 est parfois nécessaire pour représenter une composante très lente dans un écoulement.

« TG2 » (mois) = Temps de demi-tarissement souterrain n°2

- Temps au bout duquel, en l'absence d'alimentation, le débit de la composante très lente est divisé par deux.

Cette option peut être intéressante pour tenir compte d'un débit de perte par infiltration, variable au cours du temps, vers un horizon profond. Il faut cependant être conscient que ce débit peut généralement difficilement être estimé directement. Il faudra donc vérifier que les valeurs calculées par le modèle sont plausibles...

Calcul du niveau piézométrique (1/2)

« SG » ou « Coef_Emmag » (%) = Coefficient d'emmagasinement équivalent de la nappe

- Utilisé uniquement en cas de calcul de niveau de nappe
- A comparer en ordre de grandeur à une valeur de coefficient d'emmagasinement en nappe libre ou de porosité efficace, si existante.
- Optimisé par GARDENIA par régression linéaire pour « mettre à l'échelle » les fluctuations du niveau du réservoir où se trouve le piézomètre (G1, G2 ou G) reflètent par rapport aux fluctuations observées dans la chronique piézométrique.

Bilan dans le réservoir souterrain double

Un tel réservoir simule par exemple la mise en action d'une deuxième sortie quand le niveau d'eau dépasse un seuil.

Un tel réservoir à deux exutoires peut également simuler une cote de débordement ou bien simplement représenter le fait qu'une courbe de tarissement descende plus rapidement au début, quand les deux exutoires débitent simultanément, qu'à la fin, quand seul l'exutoire le plus profond est actif. La hauteur d'eau qu'il contient à un instant donné est notée G.

« SEUIL » (mm) = Seuil d'écoulement souterrain

- Seuil de remplissage du réservoir souterrain au-dessus duquel se produit un écoulement souterrain rapide

Un tel réservoir, qui remplace alors le réservoir G1 et l'éventuel réservoir G2, produit donc, suivant le cas, une ou deux composantes de débit par lesquels il se vidange :

$$QG2 = G \cdot dt / TG2$$

et

$$QG1 = (G - \text{SEUIL}) \cdot dt / TG1 \quad \text{si } G > \text{SEUIL}$$

$$QG1 = 0 \quad \text{si } G \leq \text{SEUIL}$$

Comme pour le réservoir G2, il est possible de décider sur option que le débit QG2 correspond à un écoulement profond non contrôlé par les mesures de débit à l'exutoire.

Calcul du niveau piézométrique (2/2)

« NB » (m NGF) = Niveau de base local de la nappe

- Utilisé uniquement en cas de calcul de niveau de nappe
- Correspond au niveau de nappe qui serait atteint au bout d'un temps infini en l'absence totale de recharge.
- Optimisé par GARDENIA par régression linéaire pour « mettre à la bonne hauteur » la chronique piézométrique simulée par rapport à la chronique observée.

Résumé des paramètres de calibration

Paramètre	Unité	Description	Unité	Unité	Unité	Unité	Unité
α		Coefficient de correction du bassin versant					
β		Coefficient de correction globale de la pluie					
γ		Coefficient de correction globale de l'ETP					
τ		Temps de réaction du débit des cours d'eau					
H_{max}		Seuil de débordement optionnel					
Q_{ext}		Débit extérieur					
O		Constante de ruissellement					
λ		Temps de demi-réaction					
λ_{stab}		Temps de demi-stabilisation					

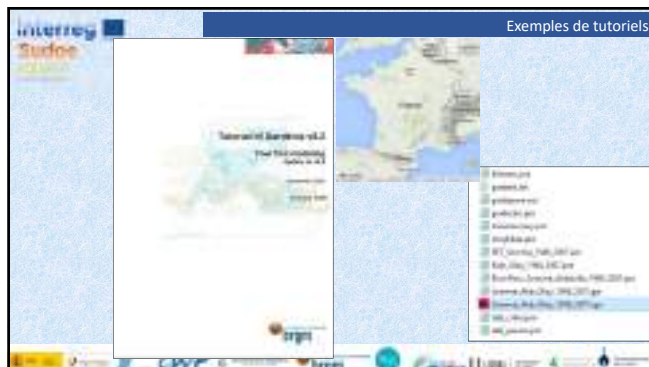
Charlier, 2017

- ### Pas de temps
- Les séries temporelles d'entrée doivent respecter un pas de temps constant, les pas suivants étant considérés comme « standards » :
 - Journalier
 - Pas de temps de 5 jours (73 PT/an)
 - Hebdomadaire (52 PT/an)
 - Décadaire : 365 jours / 36 (i.e. environ 10 jours)
 - Mensuel : 365 jours / 12, soit 3 décades/mois
 - Il est aussi possible de définir des pas de temps « non-standard » time step :
 - Par exemple : 5 minutes, une demi-heure ou 2 jours...
 - Chaque variable peut avoir un pas de temps différent, mais la pluie doit avoir le pas de temps le plus fin
 - Par exemple : pluie journalière, ETP mensuelle et niveau piézométrique décadaire
 - Le calcul sera fait au pas de temps le plus fin, soit celui de la chronique pluviométrique
 - Pour faciliter l'initialisation du modèle, il faut des données météorologiques disponibles avant le début des observations de débit et/ou niveau piézométrique.

- ### Autres paramètres de calibration potentiels
- Facteur de correction du bassin versant** (sans unité)
 - Déconseillé, sauf si taille du BV hydrogéologique mal connu (système karstique).
 - Coefficient de correction globale de la pluie (%)**
 - Déconseillé, sauf si pluies locales mal connues (région montagneuse par exemple).
 - Coefficient de correction globale de l'ETP (%)**
 - Conseillé, car l'ETP est plus difficile à estimer, et dépend de l'occupation des sols.
 - Temps de réaction du débit des cours d'eau (retard)**
 - Temps pour QH et QG d'atteindre la sortie.
 - Uniquement pour les calculs de débit.
 - Seuil de débordement optionnel dans le réservoir intermédiaire H**
 - Seuil de ruissellement par débordement : en mm.
 - Durée de demi-ruissellement par débordement : en nombre de pas de temps.
 - Valeur maximale de demi-durée de ruissellement : en mois.
 - Débit extérieur Qext**
 - Import (Qext > 0 ; gain), export (Qext < 0 ; perte)
 - Qcalc = QH + QG1 + QG2 + Qext (constante)
 - O, calculé en mm par pas de temps, est transformé en débit en m3/s (multiplié par la surface du bassin versant et divisé par la longueur du pas de temps)

- ### Séries de données d'entrée
- Les chroniques d'entrée du modèle doivent respecter un certain nombre de contraintes :
- GARDENIA ne lit pas les dates dans les fichiers de chroniques :
 - Les données doivent donc être continues.
 - La date de début est définie dans le fichier de paramètres.
 - Toutes les chroniques doivent donc avoir la même longueur...et commencer le même jour !
 - Pas de trou possible dans les données météorologiques :
 - Pluie, ETP (et température si on simule la neige)
 - Il faut donc compléter les chroniques « à trous » avant la première simulation.
 - Trous possibles dans les chroniques d'observation :
 - Débites de rivière : code « -2 » (débit négatif impossible)
 - Niveaux piézométrique : code « 9999 » (pas de niveau piézométrique possible à la cote 9999 m NGF...)

- ### Prélèvements en eaux souterraines - Pompages
- 1 chronique de pompages (ou injections) avec le même pas de temps que les séries de pluie.
 - 3 options: influence du pompage sur le débit des cours d'eau, sur les niveaux piézométriques ou sur les deux simultanément
 - 3 (ou 6) paramètres à optimiser :
 - Coefficient d'influence du pompage** sur le débit de la rivière et/ou les niveaux de nappe :
 - Caractérise l'amplitude de l'influence sur le débit de la rivière et/ou le niveau de la nappe des débits pompés (ou injectés).
 - En m ou m²/s par unité de débit de pompage ; ex : m/(m²/j) ou (m²/s)/(m²/j)
 - Ex: coefficient = 0.01, un pompage de 100 m³/j abaissera, une fois stabilisé, le niveau piézométrique de 1 m
 - Temps de demi-réaction** du débit et/ou du niveau de la nappe au pompage (en mois) :
 - C'est le temps qui caractérise la vitesse de réaction du débit de la rivière et/ou du niveau de la nappe à une variation de débit de pompage, suivant une loi exponentielle.
 - Temps de demi-stabilisation de l'influence du pompage** (en mois) :
 - C'est le temps qui caractérise la vitesse de stabilisation de l'influence d'un échelon de variation de débit de pompage sur le niveau de la nappe, suivant une loi exponentielle.



Principe de calibration des paramètres

- Le modèle est calibré en utilisant une **méthode semi-automatique** : l'utilisateur fournit un ensemble de valeurs initiales, indique les paramètres qui doivent être optimisés et les bornes inférieures et supérieures de variation.
- Un **algorithme d'optimisation non-linéaire** adapté de la méthode de **Rosenbrock (1960)** est utilisé pour fournir un ensemble de paramètres fournissant des valeurs calculées aussi proche que possible des observations (**critère de Nash**).
- L'utilisateur juge du besoin d'essayer une nouvelle optimisation avec un jeu de paramètres qu'il est libre de modifier comme il le souhaite :
 - Qualité de la simulation : appréciation visuelle + critère d'ajustement numérique
 - Examen des paramètres optimisés
 - Contrôle du bilan hydrologique
- Analyse de sensibilité** : permet d'explorer différents paramètres dans un intervalle donné autour de la valeur optimisée. Ceci permet de définir la gamme de paramètres représentant le cycle de l'eau.

Interprétations et sur-interprétation

La séparation entre écoulement rapide et écoulement lent ne doit pas être identifiée sans précautions comme une séparation entre écoulement superficiel et écoulement souterrain.

- Un écoulement peut toujours être décomposé en deux composantes, mais cette décomposition n'est pas forcément unique et dépend de la formulation du modèle. Deux jeux de paramètres peuvent produire des résultats qualitativement comparables, mais avec une décomposition de l'écoulement très différente. **Ce risque est diminué quand le modèle est calibré simultanément sur une série de débits à l'exutoire et sur une série de niveaux piézométriques.**
- On peut affirmer que l'écoulement lent est...plus lent que l'écoulement rapide, mais il n'y a pas de certitude qu'il s'agisse réellement d'écoulement souterrain.
- Dans le cas de calibration **uniquement sur une série d'observations de niveaux piézométriques, le bilan qui est réalisé ne doit donc être interprété comme une analyse de flux qu'avec d'extrêmes précautions**. Bien que ce soit une méthode d'analyse un peu dangereuse de la recharge, c'est souvent la seule disponible et il ne convient pas de la rejeter *a priori*.

Principe de calibration du modèle

- Prêter attention à la **longueur de la chronique** disponible (et des situations hydrologiques contrastées) et à **l'initialisation du modèle** (années de départ)
- Principe de parcimonie : la calibration doit être faite avec le moins de paramètres possible**
« Il peut arriver que plusieurs jeux de paramètres produisent des simulations équivalentes (calibration non-unique). Ce risque de compensation est réduit quand seulement un faible nombre de paramètres est optimisé. »

Application

- 10 piézomètres localisés sur le bassin Adour-Garonne (France),
- 2 piézomètres localisés sur la plaine du Lobregat (Espagne),
- 1 piézomètre localisé au Campo de Cartagena (Espagne),
- 2 piézomètres localisés dans la vallée du Taje (Portugal)



Critère d'ajustement numérique

- GARDENIA calibre le modèle pour maximiser le **critère de Nash** (Nash et Sutcliffe, 1970) pour le débit des cours d'eau et les niveaux piézométriques.
- Possible de minimiser le biais du débit des cours d'eau.

$$NASH = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_{m,i}(t) - X_{o,i}(t))^2}{\sum_{i=1}^n (X_{m,i}(t) - \bar{X}_{m,i})^2}$$

1 - Erreur quadratique moyenne normée par la variance des observations

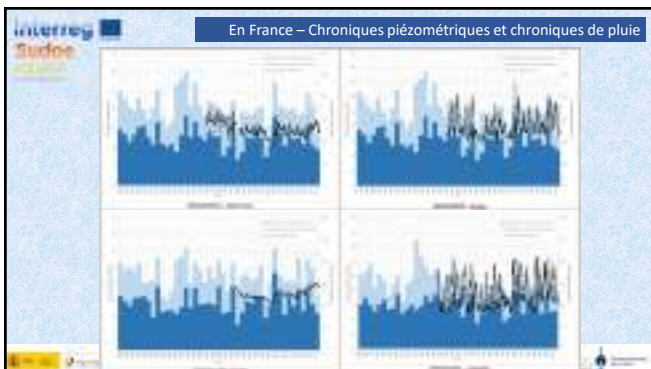
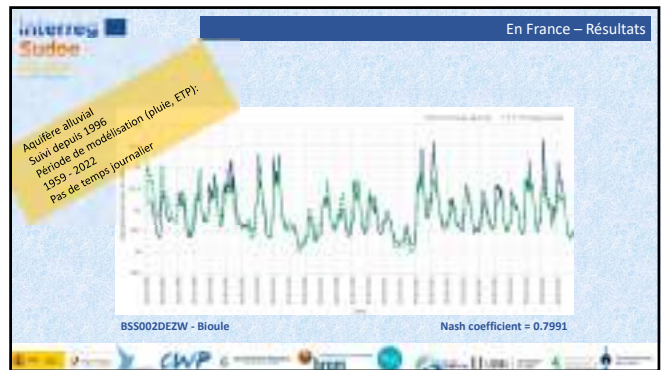
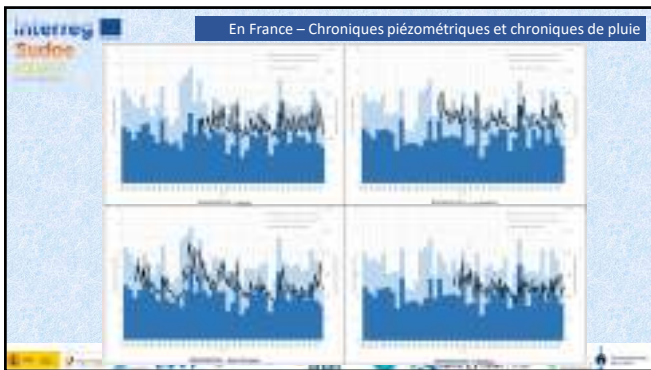
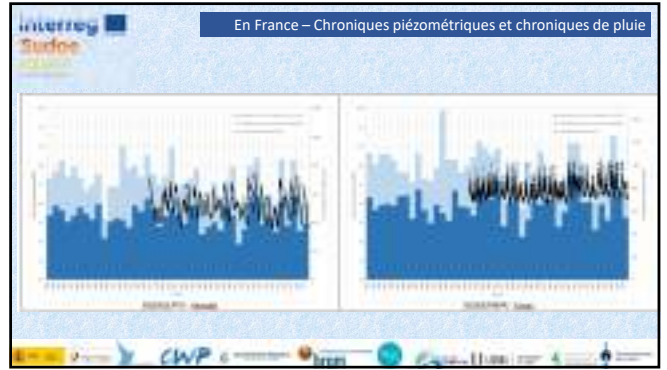
$$BIAS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{m,i}(t) - X_{o,i}(t))$$

Différence entre le débit moyen simulé et le débit moyen observé

- Pour les débits, l'utilisateur peut **choisir de donner plus de poids aux valeurs à l'étiage** (critère de Nash sur la racine carrée, voire le logarithme des débits).

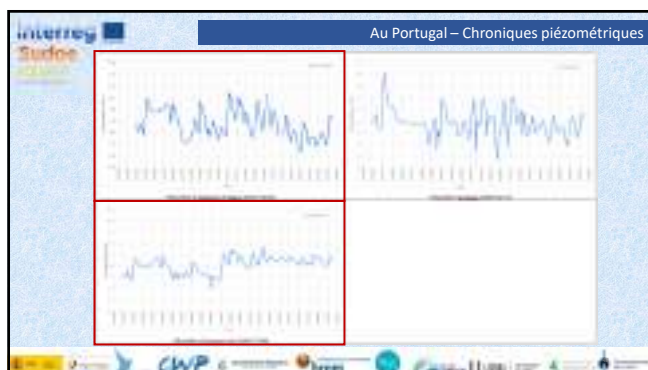
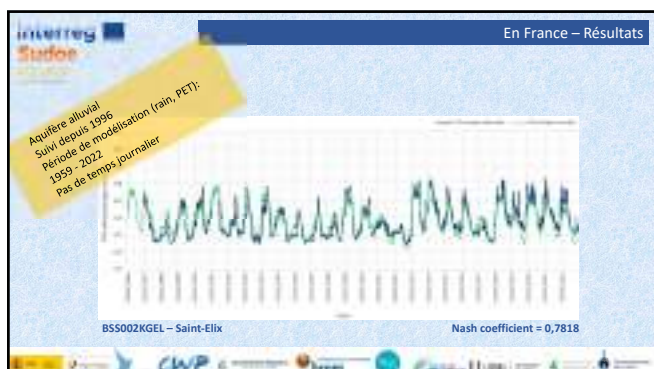
En France - Localisation

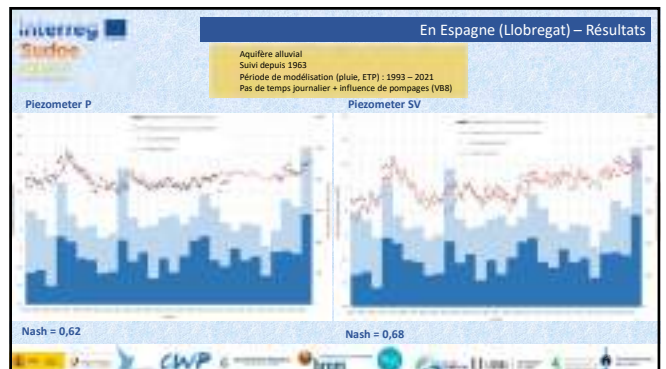
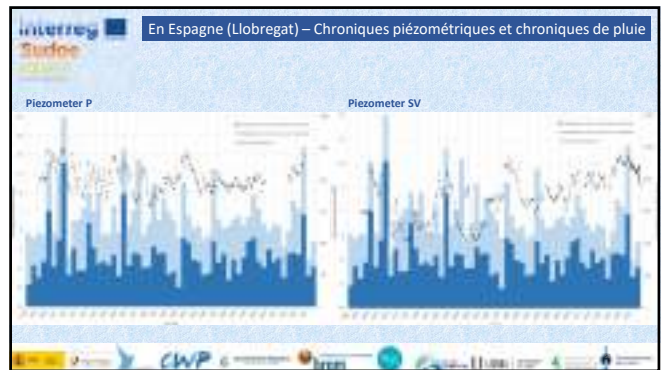
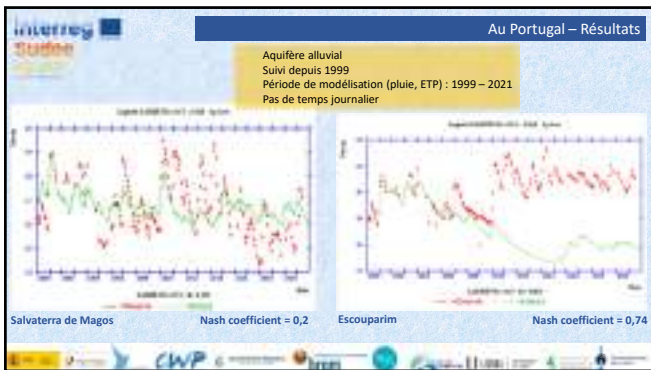
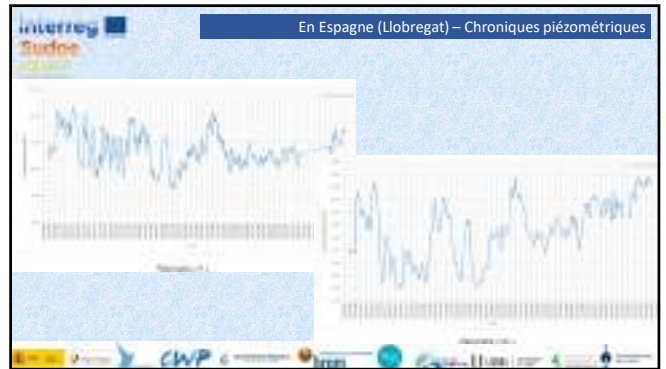
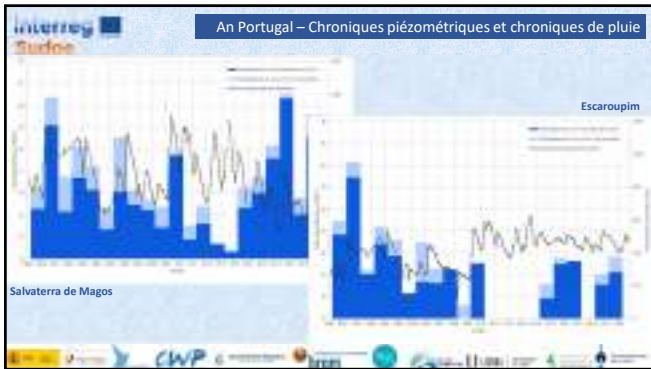


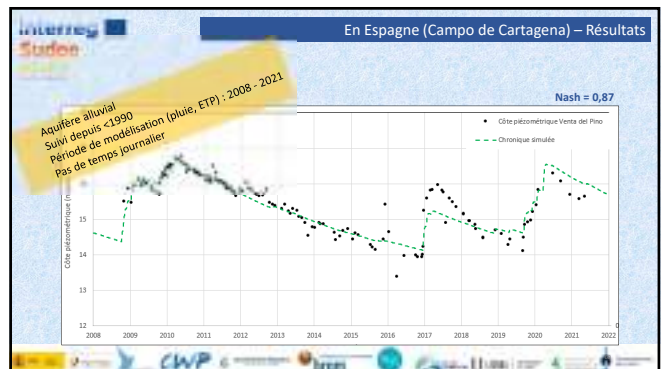
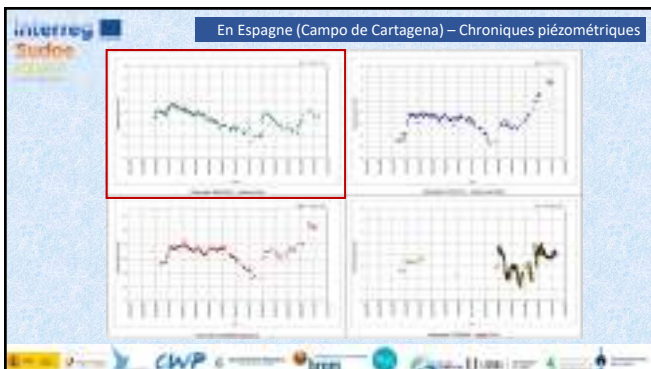
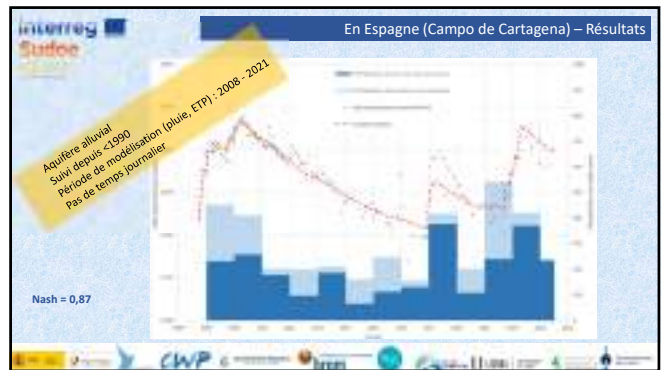
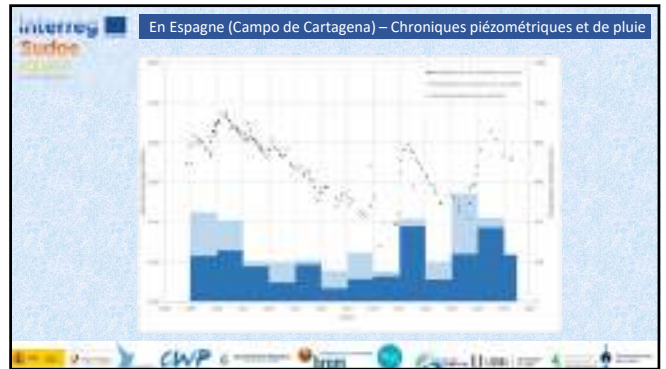
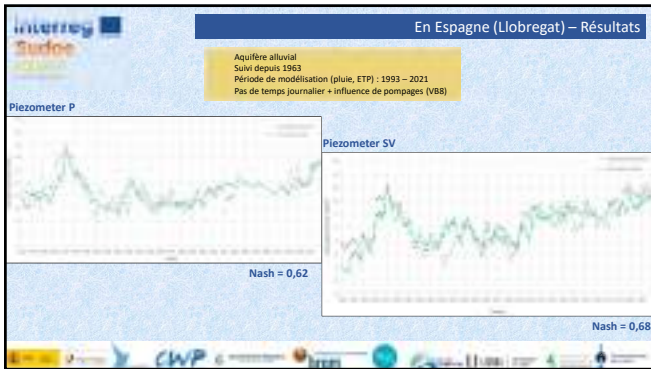




Commune	Département	Piezomètre	N°_BSS	Pluie	ETP	Prélevements	Hypothèses de modélisation retenues	Créneau de Nash	Créneau de génération
Saint-Nicolas-De-La-Grave	82	POMÈS	0904002051P	CASTELSARRASIN (82033005)	BLAGNAC (13090002)	PLV_POMÈS	Prélevements ordinaires, doublets entre 2006 et 2014	0.797	0.823
Les Barthes	82	LES BARTHES	0903002081P	CASTELSARRASIN (82033005)	BLAGNAC (13090001)	PLV_1441	Prélevements ordinaires standard	0.838	0.865
La Ville-Dieu-Du-Temple	82	PÉDELOUP	0903002081P	CASTELSARRASIN (82033005)	BLAGNAC (13090001)	PLV_1441	Prélevements ordinaires standard	0.809	0.804
Saint-Porquier	82	SAINT-PORQUIER	0903002081P	MONTAUBAN (82121002)	BLAGNAC (13090001)	PLV_ST-PORQUIER	Prélevements ordinaires standard doublets de 1977 à 1990	0.785	0.697
Lacourt-Saint-Pierre	82	SAINT-PIEBRE	0907002046P	MONTAUBAN (82121002)	BLAGNAC (13090001)	PLV_1441	Reservoir souterrain double Prélevements ordinaires standard	0.918	0.859
Saint-Etienne-De-Talmon	82	PRADAS	0911002091P	MONTAUBAN (82121002)	BLAGNAC (13090001)	PLV_1441	Reservoir souterrain double Prélevements ordinaires standard	0.885	0.888
Bioule	82	BIOULE	0912100061P	MONTAUBAN (82121002)	BLAGNAC (13090001)	PLV_1441	Reservoir souterrain double Prélevements ordinaires standard	0.795	0.885
Tarsac	32	TARSAC	0979002011P	MAULAUSSON (32245001)	TARBES (65340001)	PLV_TARSAC	Prélevements ordinaires standard doublets de 1982 à 2021	0.826	0.897
Saint-Elix-Le-Château	31	SAINT-ÉLIX-LE-CHÂTEAU	1034002091P	MURET-LHERM (31290001)	BLAGNAC (13090001)	PLV_1441	Prélevements ordinaires standard	0.781	0.875
Verniolle	09	VERNIOLLE	1057002051P	MONTALUT (09090002)	BLAGNAC (13090001)	PLV_1441	Reservoir souterrain double Prélevements ordinaires standard	0.878	0.933


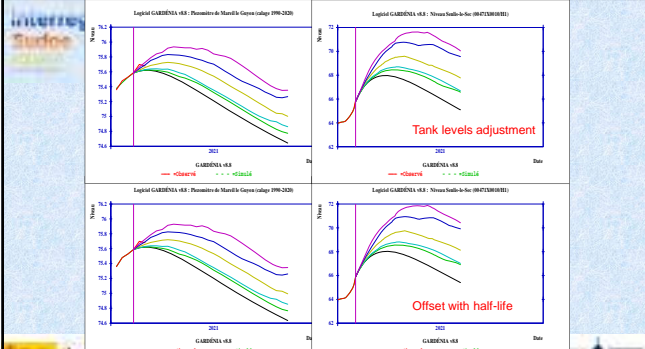






Modélisation prédictive (1/3)

- Evaluation probabiliste du débit d'un cours d'eau et/ou de niveaux de nappe :**
 - Durée de la prévision (ex : 3 mois) : du 01/04/2020 au 30/06/2020
 - Si 50 ans de données de précipitations sont disponibles, 50 simulations sont effectuées du 01/04 au 30/06/2020 en utilisant les chroniques de pluie de chaque année disponible
 - A chaque pas de temps, à partir des états du modèle (niveaux de ses réservoirs), GARDENIA calcule donc 50 valeurs de débits de rivière et/ou de niveaux de nappe.
 - Pour un jour donné, GARDENIA calcule le débit de probabilité de non-dépassement X% en classant tout simplement les 50 réalisations et en calculant le quantile X%. Ce calcul est fait séparément pour chaque pas de temps.
 - GARDENIA édite et dessine les probabilités de non-dépassement suivantes :
 - 10% sec, 20% sec, 50%, 20% humide, 10% humide
 - Equivalent à décennale sèche, quinquennale sèche, médiane, quinquennale humide, décennale humide (si dynamique annuelle)
 - Prévision sans aucune pluie (« niveau garanti »)
- Données nécessaires pour la prévision :**
 - Chroniques de pluie (le plus longue possible)
 - En option, chroniques d'ETP (sinon, ETP moyenne utilisée)

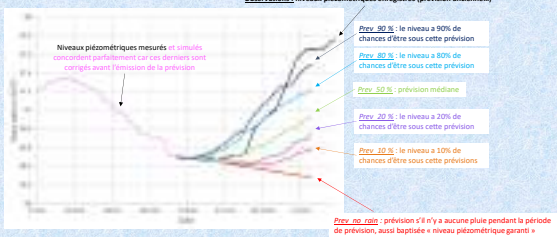



Modélisation prédictive (2/3)

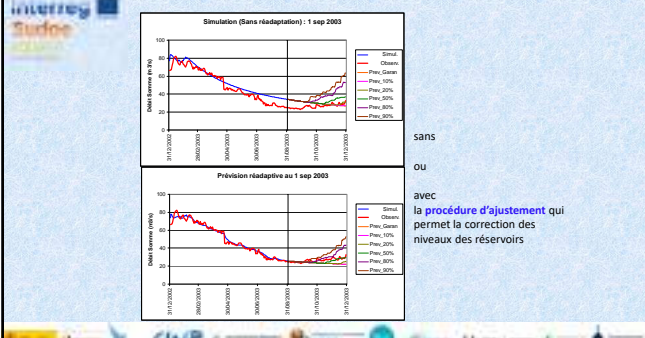
Un exemple de prévision des niveaux piézométriques

Observations : niveaux piézométriques enregistrés (prévision ancienne...)

Niveaux piézométriques mesurés et simulés comparés généralement car les données sont corrigés avant l'émission de la prévision



- Prev. 99.9%** - le niveau à 99.9% de chances d'être sous cette prévision
- Prev. 99%** - le niveau à 99% de chances d'être sous cette prévision
- Prev. 90%** - le niveau à 80% de chances d'être sous cette prévision
- Prev. 50%** - prévision médiane
- Prev. 20%** - le niveau à 20% de chances d'être sous cette prévision
- Prev. 10%** - le niveau à 10% de chances d'être sous cette prévisions
- Prev. de 0%** - prévision d'il n'y a aucune pluie pendant la période de prévision, aussi baptisée « niveau piézométrique garanti »



sans
OU
avec
la procédure d'ajustement qui permet la correction des niveaux des réservoirs

Modélisation prédictive (3/3)

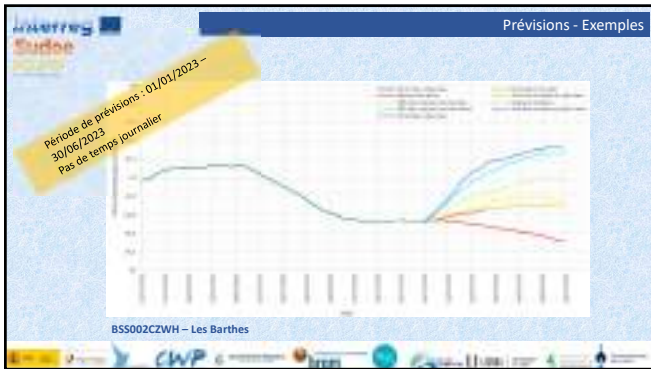
- Deux méthodes pour corriger le biais à la date d'émission de la prévision**
- Par ajustement optimal des niveaux des réservoirs du modèle** (méthode la plus robuste)
 - Procédure adaptative qui permet de très légèrement corriger les niveaux des réservoirs du modèle pour limiter la dérive entre débits ou niveaux piézométriques simulés et observés.
 - Correction des niveaux/débits proportionnelle à l'écart-type des alimentations de chaque réservoir.
 - Une étape de préparation où le modèle calcule l'écart-type des alimentations de chaque réservoir et le coefficient de correction optimal est nécessaire ; la précision dépend ainsi de la longueur de la prévision.
- En recalant le niveau simulé sur le niveau observé au début de la prévision puis en faisant décroître cette correction initiale de manière exponentielle**
 - Paramètre de la décroissance exponentielle = **temps de demi-vie de la correction initiale** (en jours).
 - Seule méthode implémentée dans EROS, logiciel « cousin » de GARDENIA et utilisé dans MétéEAU Nappes.

Prévisions - Exemples

Période de prévisions : 01/01/2023 - 30/06/2023
Pas de temps journalier



BSS002DEZW - Bioule



Pour aller plus loin...

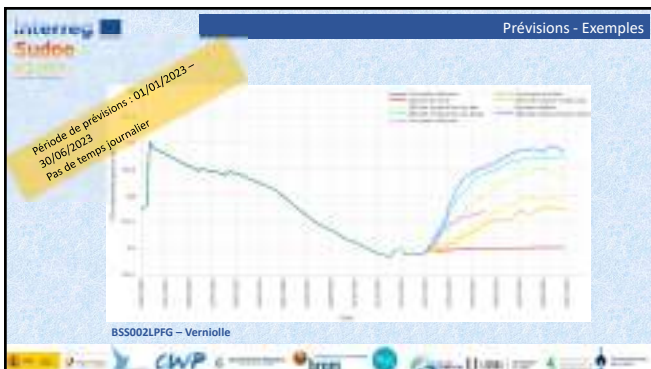
- Possibilité de modéliser plusieurs bassins versants indépendants successivement dans la même simulation (aussi possible avec le logiciel EROS).
- GARDENIA : modélisation hydrologique globale d'un bassin versant
 - <https://www.brgm.fr/fr/logiciel/gardenia-logiciel-modelisation-hydrologique-globale-bassin-versant>
- EROS : modélisation hydrologique semi-globale appliquée à un bassin versant divisé en sous-bassins
 - <https://www.brgm.fr/fr/logiciel/eros-logiciel-modelisation-hydrologique-semi-globale-bassin-versant-decoupe-sous-bassins>
 - Exemple : 9 sous-bassins avec 5 rivières dont le débit est mesuré.



Merci de votre attention

Pour plus d'informations :

Sandra BERANGER - Pierre LE COINTE
Ingénieurs hydrogéologues, Cheffes de projet
s.beranger@brgm.fr ; p.lecointe@brgm.fr
+33 5 62 24 14 53
www.brgm.fr



Atelier de formation
4 avril 2023
Toulouse, France

Projet AQUIFER

Atelier technique :
Le site internet [météo-nappes](https://www.meteo-nappes.fr) : prévoir le niveau des eaux souterraines

Sandra BERANGER, BRGM

Le projet AQUIFER est financé par le programme Interreg Sudoe et le Fond de Développement Régional Européen (FEDER)

Secteurs d'intérêts : sécheresse, inondations, gestion de l'irrigation

Arrestés de limitation de l'usage de l'eau

PROPLU

What will the water table situation look summer 2022?
Should we take water restriction measures?
Did the recent heavy rainfall events have an impact on the water table?

brgm

MétéEAU Nappes

Un outil d'aide à la décision pour caractériser en temps presque réel l'état quantitatif de la ressource en eau souterraine et prévoir son évolution

<https://www.brgm.fr/en/website/meteeau-nappes>

Un travail collaboratif

Projet de développement interne BRGM de 2015 à 2018 (projet de maturation depuis 2019)

Nicolas et al., 2020

1700 stations including
-1600 managed by BRGM
-100 GPRS stations
(*) General Packet Radio Service, data received daily

Objectifs

- Suivi du niveau de la nappe
- Enregistrement du niveau de la nappe
- Chronique de suivi du niveau de la nappe
- Bulletin de suivi hydrologique (BSH)
- Prévisions du niveau de la nappe

- Déploiement d'un outil de communication capable d'assembler des données de différentes sources (météorologie, débit des rivières, piézométrie) pour définir en temps presque réel l'état quantitatif de la ressource
- Prévoir l'évolution des niveaux piézométriques et permettre un accès public aux données en temps quasi-réel (cartes et graphiques)
- Valoriser les connaissances techniques et scientifiques, de la mise à disposition de la donnée à la création d'information
- Offrir un service à haute valeur ajoutée, résultant d'un travail de modélisation
- Contribuer, participer, aider à une meilleure gestion de la ressource dans les territoires

Un outil basé sur la télétransmission des niveaux piézométriques

Saint-Porquier (09306X0091M) | Piézomètre localisé dans un aquifère alluvial

Indicateur Piézométrique Standardisé | Indicateur Piézométrique Standardisé (IPS)

Un symbole décrit le niveau piézométrique par rapport aux niveaux enregistrés dans le passé

Une implication régionale

- ~50 modèles hydrogéologiques identifiés (pluie-piézométrie-débit) Gardenia et Tempo © BRGM
- 10 cas d'étude (bassins versants) sélectionnés sur 7 régions françaises

- Sécheresse
- Changement climatique
- Inondations

10 cas d'étude – Résultats de modélisation

Bassins versants (surface) / modèles / prélèvements / coefficient de corrélation :

Région	Bassin versant	Station hydrologique	Piezomètre	Type modèle	Prélèvements	Période Amont	Période aval	Coeff. corrélation débit	Coeff. corrélation pluie	Coeff. corrélation débit
CHA	Sarthe	Pouébois-Valent 143 km²	Valley	P-NP-Q	OU (déb.)	1972-2018	1994-2017	0.94	0.94	0.94
HNO	Arve	Moy 402 km²	Mourette	P-NP-Q	OU (déb.)	1990-2018	1995-2017	0.88	0.82	0.93
BRE	Saône	Yarabé (Marnand) 25.6 km²	Rochevaux	P-NP-Q	NON	1980-2018	2001-2017	0.83	0.88	0.92
PC	Saône	Reigny-sur-Ouche 425 km²	Caillon-Flemarchon	P-NP	OU (niveau)	1970-2018	1976-2017	0.81	0.86	0.88
PC	Somme	Abbeville 506 km²	Saillaie-Sac	P-NP-Q	NON	1980-2018	1992-2017	0.83	0.88	0.88
BOU	Yonne	Changéville 128 km²	Sourbise	P-NP-Q	NON	1980-2018	1995-2017	0.89	0.92	0.93
DF	-	-	Pertheville	P-NP	NON	1961-2018	1980-2017	-	-	0.97
DF	-	-	Thiébaucourt	P-NP	NON	1961-2018	1995-2017	-	-	0.96
DF	-	-	Mareil-Le-Guyon	P-NP	NON	1961-2018	1987-2017	-	-	0.96
DF	-	-	Commeny	P-NP	NON	1961-2018	1980-2017	-	-	0.98

Environ 10 cas d'étude

- 10 piézomètres de 7 régions françaises
- 9 masses d'eau souterraines
- 4 formations géologiques : craie, calcaires, granite et gneiss

Région	Dept	N° MSP piézomètre	Commune piézomètre	P. Eau	Ind. Piéz. Press.	MESO associée	Objectifs de l'étude
CHA	18	02925028P	Valley	oui	oui	Craie de Champagne sud et centre	volumes prélevables
HNO	27	018050036	Mourette	oui	oui	Craie alluviale du Neubourg / Iron / Plaine de Saint André	modélisation crasse du BV de l'Arve
BOU	21	043880002	Rochevaux	oui	oui	BV Saône (craie piézométr.)	hydrogéologie
PC	16	040732010S1	Caillon-Flemarchon	oui	oui	Craie picarde	sécheresse (prévision débit)
PC	16	041730005P22012	Saillaie-Sac	oui	oui	Craie de la vallée de la Somme	crise
BOU	21	043880002S090	Rochevaux	oui	oui	Calcaires jurassiques du sud et des Côtes et arénosédiments du Bourgoign	changement climatique
DF	18	031440004S1	Pertheville	oui	oui	Craie et sables de Marais à l'Empress	sécheresse (prévision débit)
DF	18	032200004S2008	Thiébaucourt	oui	oui	Sables et Craie du Yvelis Française	sécheresse (prévision débit)
DF	18	034030009P1	Mareil-Le-Guyon	oui	oui	Craie et Tertiaire du Marais à l'Empress	sécheresse (prévision débit)
DF	18	034030009P2	Commeny	oui	oui	Sables et Tertiaire du Marais à l'Empress	sécheresse (prévision débit)

- Volumes prélevables
- Modèle maillé
- Sécheresse et alimentation en eau potable
- Sécheresse (prévision sécheresse)
- Inondation
- Changement climatique
- Relations nappe / rivière

Besoin de mettre à jour les modélisations hydrologiques

Graphs souhaités

Différents contextes hydrogéologiques

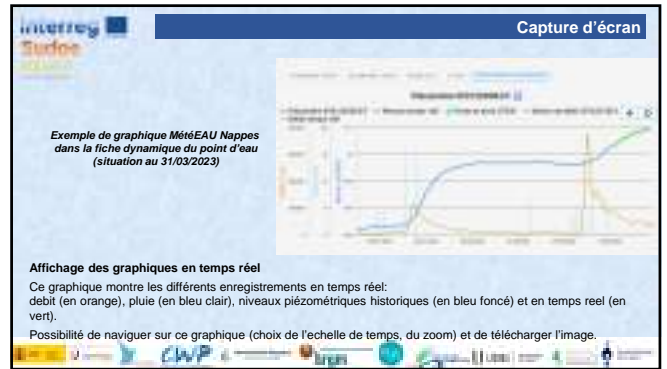
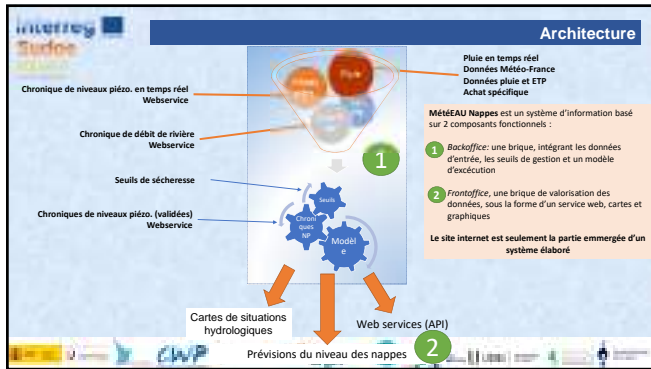
CHA 02982X002S/F Craie Marnaise Et Marnes Du Turonien Inférieur	BOU 04398X0002/SONDAG Calcaires Jurassiques
HNO 01805X0036 Craie Du Séno-Turonien Du Bassin Parisien	DF 01825X0091/P1 Calcaires Et Sables Du Lutétien
01516X0004/S1 Craie Du Séno-Turonien Du Bassin Parisien	LIM 06882X00213/F1 Socle Métamorphique

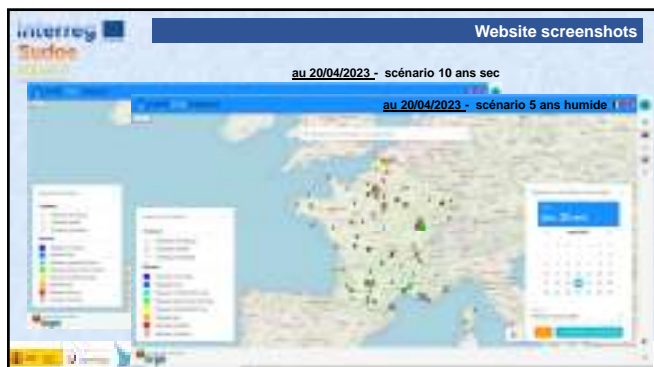
Cartes souhaitées


Le bulletin de situation hydrologique

=> Evaluation mensuelle de l'état de la ressource en eau souterraines, faite par le BRGM pour le compte du Ministère de l'Environnement et de l'Ecologie

Prévisions dans 3 mois ?








- Un outil avec beaucoup de fonctionnalités et services pour connaître les niveaux des nappes à la date d'aujourd'hui et dans le futur
- Mise à disposition des dernières données de pluie, de niveaux piézométriques et de débits de rivières
- Outil d'aide à la décision pour la gestion de l'eau à l'échelle des territoires (intégration des seuils de gestion, assistance dans la gestion des conflits d'usage)
- Facile à utiliser et interface web compréhensible (cartes, graphiques en temps-reel, fiches dynamiques)
- Un logiciel BRGM exécutable en ligne avec des mises à jour des prévisions possible tous les mois

<https://meteeauappes.brgm.fr/>

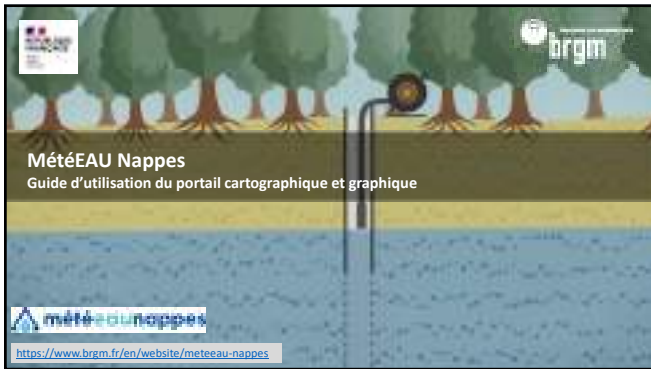
 **Un site internet ouvert**
Une Application Programming Interface (API) publique / privée







- un outil de communication utile croisant différentes source de données de référence du cycle de l'eau en quasi temps réel (cartes, graphiques)
- un réel besoin de services de données climatiques ouvertes (pluie, ETP)
- un outil capable de montrer les conséquences de scénarios climatiques sur la ressource en eau souterraines, à l'échelle locale
- Un outil d'aide à la décision en temps réel pour les régulateurs (gestionnaires de l'eau)
- Une réponse à un besoin des parties prenantes françaises
 - Services déconcentrés de l'Etat
 - Services de prévision des crues
 - Agences de l'Eau
 - Régions, Départements, Municipalités
 - Presse et Média
 - Agriculteurs
 - Réseaux eau potable
 - Industrie



Droits d'accès au site internet

	Public	Expert	Contributeur	Administrateur
Prévision de l'IPS	✓	✓	✓	✓
Prévisions à 15 jours	✓ ¹	✓ ¹	✓ ¹	✓
Prévisions complètes	X	✓ ²	✓ ²	✓
Gestion des capteurs	X	X	✓ ³	✓
Gestion des seuils	X	X	✓ ³	✓
Faire une nouvelle prévision avec un modèle	X	X	✓ ²	✓
Créer un modèle	X	X	X	✓

1 - Limité aux modèles publics
2 - Limité à une sélection de modèles associée à un groupe d'utilisateurs
3 - Limité à une sélection de capteurs associée à un groupe d'utilisateurs

Accès au site internet

URL:
<https://meteeau.nappes.brgm.fr>

Cette page d'accueil permet de :

- Introduire l'outil
- Consulter les références bibliographiques
- Accéder à l'application : <https://app.meteeau.nappes.brgm.fr/>
- Découvrir les actualités
- Envoyer un e-mail grâce au formulaire de contact

Partie cartographique du site internet

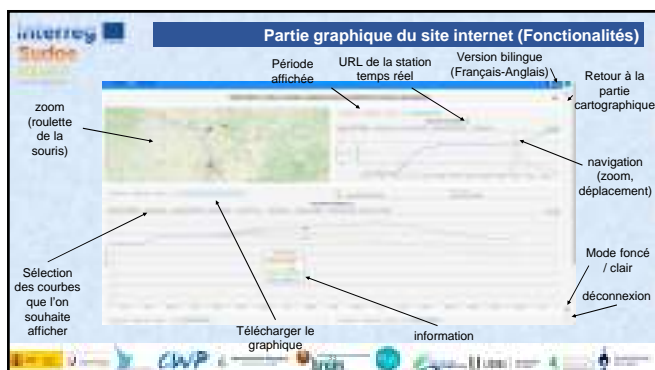
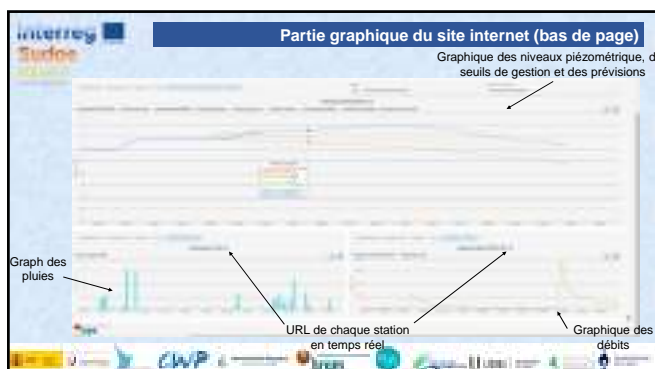
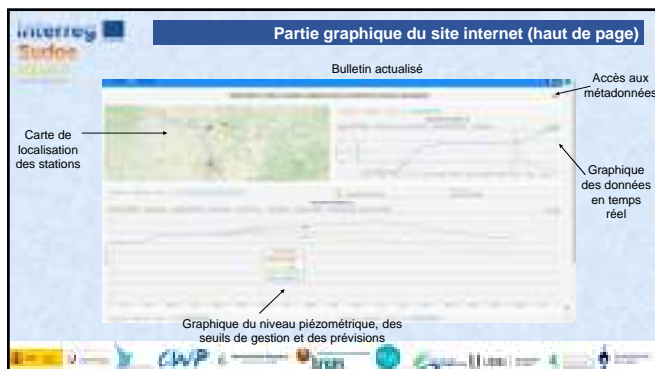
Accès au site internet (utilisateurs)

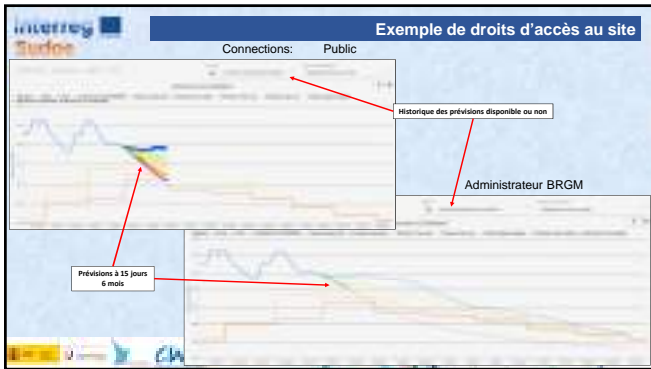
Pour accéder à l'application, chaque utilisateur doit créer un compte avec un e-mail et un mot de passe.

En fonction des utilisateurs, différents droits sont définis :

- Public
- Expert
- Contributeur

Partie cartographique du site internet (situation actuelle)



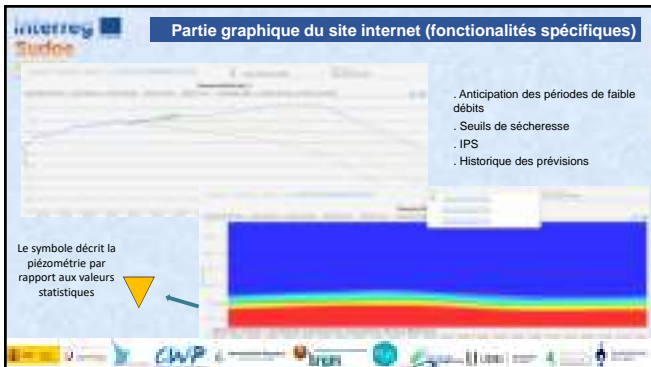
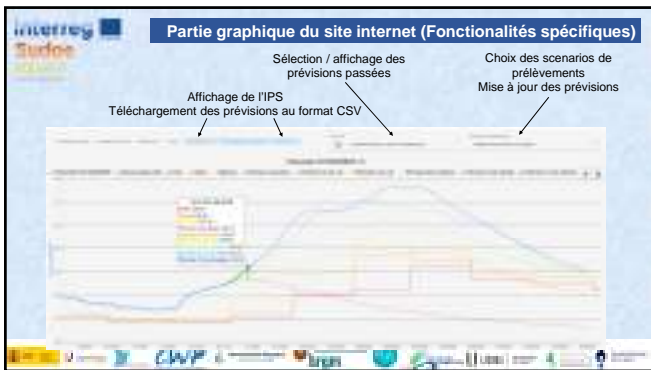


Merci de votre attention

Pour plus d'information :

BERANGER Sandra
Ingénieur hydrologue, Chef de projet
s.beranger@brgm.fr
+33-5-62-24-14-53
www.brgm.fr

This is a 'Thank you' message page with a light blue background. It contains contact information for Sandra Beranger, an engineer and project manager. The text is centered and includes an email address, a phone number, and a website URL. The 'interreg Sudoc' logo is visible in the top left corner.



Atelier de formation
4 avril 2023
Toulouse, France

Projet AQUIFER

Atelier technique :
Le site internet **viginappe** : prévoir les volumes
prélevables en eau souterraine

Sandra BERANGER, BRGM

Le projet AQUIFER est financé par le programme Interreg Sudoe et le Fond de Développement Régional Européen (FEDER)

Modèle hydrogéologique en 3D
MARTE, développé par le BRGM

Objectifs

Suivi du niveau de la nappe → Enregistrement du niveau de la nappe → Chronique de suivi du niveau de la nappe → Bulletin de suivi hydrologique (BSH) → Prévisions du niveau de la nappe → Prévisions des volumes prélevables en eau souterraine

- Prévoir les volumes prélevables en eau souterraine à partir des prévisions du niveau de la nappe
- Valoriser la connaissance et l'expertise scientifique et technique, de la mise à disposition des données à la création de services
- Mettre à disposition des services à haute valeur ajoutée, résultat de travaux de modélisation
- Contribuer, participer, promouvoir une meilleure gestion des eaux souterraines dans les territoires

Contexte géo-climatique

Géographie :

- A l'Est du bassin Aquitain.
- A la confluence de 3 rivières / fleuve importants : Garonne, Tarn et Aveyron.
- Plaine alluviale entourée de coteaux molassiques tertiaires et, à l'est, des plateaux karstiques du Causse de Caylus qui font partie des Causses du Quercy.

Climat :

- Hivers doux et humides et étés chauds, généralement secs.
- Pluie homogène sur la région.
- Variation inter-annuelle importante : de 420 to 1000 mm/yr.

Pluie moyenne
700 mm/an

Area of alluvial plains
1000 km² - 30%
Of the Tarn-et-Garonne department surface

interreg Sudoe | **viginappe**

Outil d'aide à la décision pour la gestion des eaux souterraines de l'aquifère alluvial dans le département de Tarn-et-Garonne (82)

Objectif : Prévoir les volumes prélevables en eau souterraine à partir des niveaux de la nappe observés ou prévus et de la recharge en cours

Prévisions des niveaux de la nappe | Modélisation hydrodynamique en 3D
Logiciel MARTE, développé par le BRGM

Contexte géologique

Fonctionnement en terrasses :

- Une plaine alluviale avec des conditions hydrogéologiques favorables...
- ...mais une faible profondeur (épaisseur moyenne de 5 à 8 m).
- Système en **terrasses étagées**, avec, lorsqu'on s'éloigne du cours d'eau :

↗ Âge du dépôt et de l'altération des sédiments.
 ↗ Fraction fine : + argile, - sable / argile.
 ↘ Propriétés hydrodynamiques (perméabilité...)
 ↘ Débit de base

DESSEIN DU SYSTEME DE TERRASSES ETAGEES

CARTE GEOLOGIQUE SIMPLIFIEE

Pompages en eau souterraine

Une ressource fortement exploitée:

Usages des eaux de surface et souterraines :

- Volumes pompés par usage, en moyenne sur la période 2006-2012, en millions de m³ et en %.
- Secteur agricole: maraichage, maïs, céréales, tournesol...
- Golfech = centrale nucléaire.

Nombre de puits (2015)
1239

Usage	Eau souterraine	Eau de surface
Eau potable	4.4 Mm ³	11.0 Mm ³
	27%	23%
Industrie (sans Golfech)	1.0 Mm ³	0.6 Mm ³
	6%	1%
Agriculture (irrigation)	10.8 Mm ³	36.3 Mm ³
	67%	76%
Total (sans Golfech)	16.2 Mm³	47.8 Mm³
Golfech (net)	-	39.7 Mm ³

Sources : BRGM, DDT 82

Définition des volumes prélevables

CASIERS DE GESTION DES EAUX SOUTERRAINES

A l'échelle de la maille :

A l'échelle des casiers de gestion :

- 21 casiers de gestion
- Volumes prélevables en eau souterraines définis à l'échelle du casier
- Homogène d'un point de vue hydrogéologique
- Compatibles avec les périmètres élémentaires (PE) des "Organismes Uniques de Gestion Collective" (OUGC).

Sources : BRGM, DDT 82

Modélisation hydrodynamique

Modèle hydrodynamique

- Géologie**
 - Carte géologique
 - Log géologique
 - Géométrie : couches du modèle
- Hydroclimatologie**
 - Chronique de pluie, ETP
 - Paramètres associés au sol
 - Chronique de recharge
- Réseau hydrographique**
 - Chronique de hauteur d'eau en temps réel
 - Campagnes de mesure des hauteurs d'eau dans les cours d'eau
 - Géométrie des cours d'eau
 - Lits, hauteurs / débits (Manning-Strickler)
 - Calibration
- Hydrogéologie**
 - Chroniques piézométriques / captés
 - Campagnes piézométriques / captés
 - Test de pompage
 - Perméabilité, coefficient de stockage
 - Calibration
- Sorties du modèle**
 - Niveaux d'eau / débits
 - Eau de surface / Eau souterraine
 - Pas de temps : jour
 - Période : 01/08/1959 à présent
- Pompages**
 - Eau souterraine / Eau de surface
 - Eau potable / Industrie / Irrigation
 - Données annuelles
 - Programmes spatialisés sur 4 mails

MARTHE (Logiciel BRGM)
Volumes finis
• Multi-casiers
• 250 m x 250 m

Définition des volumes prélevables

1^{re} étape

Niveaux objectifs de basses eaux :

- Critique
- Equilibre
- Sauvegarde

Modèle hydrodynamique 3D

Volumes prélevables en eau souterraine :

- Critique
- Equilibre
- Sauvegarde

Modélisation hydrodynamique

Résultats de calibration

Source : BRGM

Réseau de suivi

PRIORISATION DE L'EQUIPEMENT DES CASIERS DE GESTION

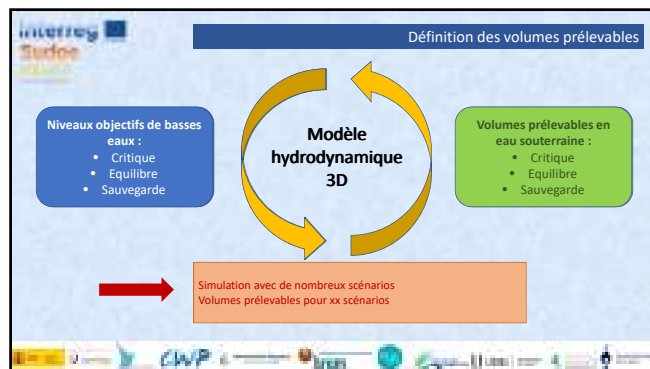
Réseau de suivi :

- 5 casiers de gestion équipés en temps réel et télétransmission. Enregistrement des niveaux d'eau depuis + de 15 ans (entre 25 et 40 ans).
- 7 casiers de gestion équipés récemment (1 an de suivi). Sélection basée sur les volumes prélevés.
- 7 casiers de gestion sans point de suivi : correspondent aux casiers les - prélevés.

Source : BRGM

Réseau de suivi

Casier	Code BSS	Nom du point de suivi	Nom du point de référence	Casier	Code BSS	Nom du point de suivi	Nom du point de référence
1	BSS002DAWG	Pédeloup	Pédeloup	12			
2	BSS004DFVD	Négrepelisse		13	BSS002CZMA	Pomiès	Pomiès
3	BSS002EGZN	Bezette		14			
4	BSS002DDZV	St-Pierre	St-Pierre	15	BSS004DFVQ	Finhan	
5	BSS002DEZW	Bioule	Bioule	16	BSS002DDXS	Callony	
6	BSS002DETB	Pradas	Pradas	17	BSS004DFVR	Valence_Quercy	
7				18	BSS004DFVP	Savenès	
8				19			
9				20	BSS004DFVG	Donzac	
10	BSS002DCXR	Escatalens	St-Porquier	21			
11	BSS002DACM	Garnouillac					



Définition des niveaux objectifs de basses eaux

Exemple : 2 chroniques

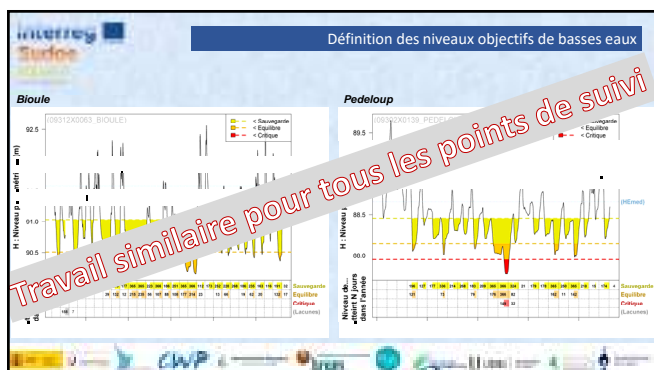
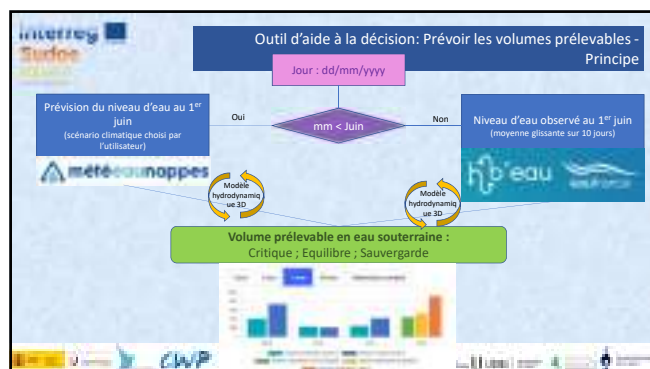
Pour chaque chronique de suivi :

- Définition des hautes eaux et basses eaux
- Définition de la médiane des hautes eaux annuelles (HEmed)
- Définition et classement statistique de la « recharge apparente »

Bioule

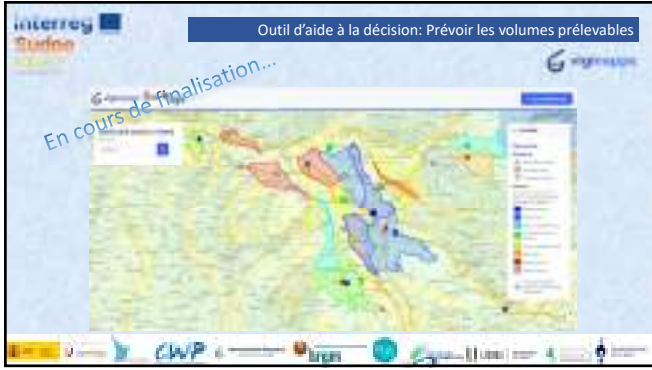
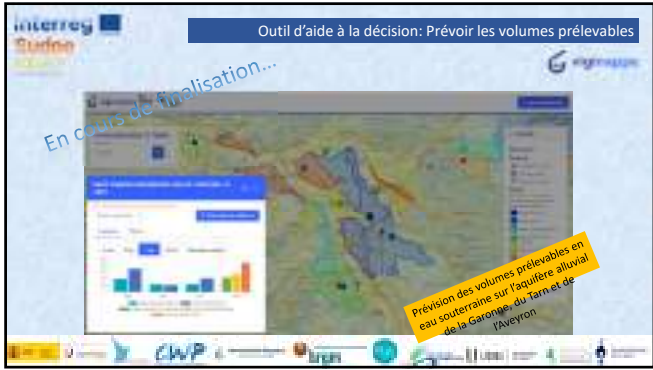
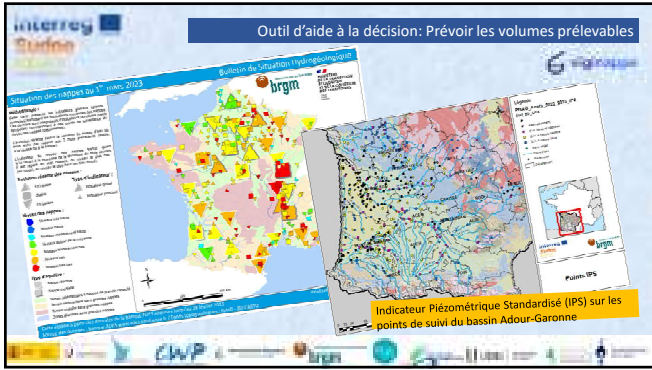
Pedeloup

- Définition de 3 niveaux objectifs :
 - Niveau objectif critique
 - Niveau objectif d'équilibre
 - Niveau objectif de sauvegarde



Outil d'aide à la décision: Prévoir les volumes prélevables

Disponible prochainement... www.vignappe.brgm.fr



ANNEXE 2.

LISTE DES PARTICIPANTS EN FRANCE

Interreg

Sudoe

AQUIFER

Cooperation Interregio-Operational Group



EUROPEAN UNION












4 avril 2023 - Toulouse
Conférence de clôture
Projet AQUIFER


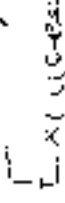

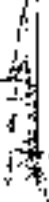
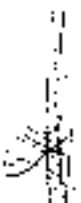
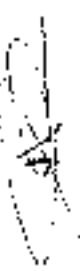

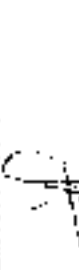
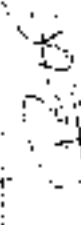
NOM	Prénom	STRUCTURE	SIGNATURE
AUDIGANE	Pascal	BRGM	
BANZA	Mwanabute	Amani group	
BAULT	Violaine	BRGM	
BEDIJIL	Houa	Université de Poitiers	
BERANGER	Sandra	BRGM	
BERTIN	Clotilde	BRGM	







BUN

Beranger

DEJAIL

NOM	Prénom	STRUCTURE	SIGNATURE
DAVID	Boris	Veolia	
DELICHERE	Stéphane	BRLI	
GARCIA AROSTEGUI	Jose-Luis	IGME	
GUITTARD	Jérôme	DREAL Occitanie/Délégation de Bassin Adour-Garonne	
HACHE	Mylène	AQUA-VALLEY	
HAU-BARRAS	Anne-Valérie	BRGM	
HLAIMI	Aïssa	MC-SASS (OSS)	
HUAU	Marie Christine	Veolia	
LAYMAJOUX	Christine	Conseil départemental 82	

NOM		Prénoms		STRUCTURE	SIGNATURE
LE COINTE		Pierre		BRGM	
MARQUES DOS SANTOS		Claudia		SA	
MONTEY		Sylvain		Snow Away Production	
MOUNILI		Nojora		Conseil départemental de la Haute Garonne	
NICOLAS		Jérôme		BRGM	
PAILLET		Agnès		Région Occitanie	
PARTAUD		Jessica		AFAG	
PICARD		Sondran		Région Occitanie	
PICHON		Fabien		Préfecture de région Occitanie - SCAR - Autorité nationale SUDOT	

NOM	Prénom	STRUCTURE	SIGNATURE
QUERALT	Enric	Cuadri	
SCHEYER	Laurent	DREAL Occitanie/Délégation de Bassin Adour-Garonne	Excuse
VALLADEAU	Guillaume	vortex.io	
VERDIER	Karine	Conseil Départemental Tarn-et-Garonne	
VILLIERS	Romain	Nommo	
WIBAUX	Benoît	Plateforme des bonnes pratiques pour l'eau du grand Sud-Ouest	
ZOIA	Christophe	La France agricole	
ROBES	VIRGINIA	IGME	
BARST	Frédéric	DIE Médiation	

ANNEXE 3.

DIAPORAMAS DES ATELIERS DE FORMATION AU PORTUGAL

Technical workshop
March 14th, 2023
Lisbon, Portugal

AQUIFER Project

Technical workshop :
Training to lump hydrological modeling
GARDENIA Software

Sandra BERANGER, BRGM

AQUIFER project is funded by the Interreg Sudoe program and the European Regional Development Fund (ERDF)

Hydro(geo)logical modeling


Complexity

Global models / lumped hydrological model
(rain-river flow or rain-GW level models)

Black box
An output of the system is connected to one or more inputs by transfer functions (or impulse responses)

No "physical" laws

Input (Rain, PET)




Output (GW level, river flow at the basin outlet)

Physically based models
(mechanistic or deterministic)


Solving the general groundwater flow equation. They attempt to represent the actual physical system.

Spatialized models or gridded models accounting for groundwater/river exchanges



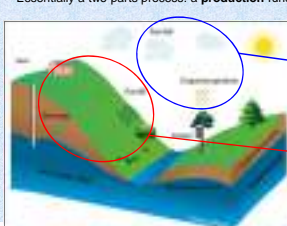
Poitou Charentes model (BRGM)

The water cycle

Lumped-parameters models

- Simplified approach of the water cycle in a small watershed, considering a lumped input (rainfall and Potential EvapoTranspiration = PET) and a single output (river flow and groundwater level)
- Essentially a two parts process: a **production** function and a **transfer** function



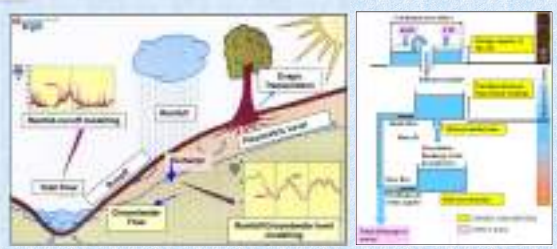
Production function: calculates the amount of water reaching the system, i.e. the **effective rainfall**

Transfer function: calculates when the water reaches the system's outlet (river flow) or the underlying aquifer

The water cycle
A brief outlook



Lumped-parameters models
GARDENIA



Gardenia with one groundwater reservoir

General outline of the GARDENIA code

Rain / Groundwater level

Rain / river flow

River flow = runoff + base flow

- Reservoir-to-tank transfers governed by **exponential discharge laws** (specific to each reservoir)
- Laws defined by **dimensional parameters** of the model (soil retention capacity, transfer time, overflow thresholds, etc.)

Because of the global character of this schematization and the complexity of the real hydrological system, these parameters, although having a physical meaning, are **difficult to deduce a priori from the physiographic characteristics** of the watershed (geology, vegetation cover, etc)

The parameters must therefore be **determined by calibration**

Download links

- GARDÉNIA** (acronym in French for « modèle **G**lobal **A** Réservoirs pour la simulation des **D**ébits et des **N**iveaux **A**quifères » [Global model with reservoirs for simulating aquifer flows and levels])
- Free access (Version 8.8. May 2021): <https://www.brgm.fr/en/software/gardenia-lumped-hydrological-modelling-catchment-basin>
- Documentation :**
 - RP-62797-FR:** Instruction manual, user guide
 - RP-61720-FR:** Tutorials with GARDENIA "your first models"
 - RP-64500-FR:** Comparison between GARDENIA and physical modeling

Lumped-parameters models

- Progressive storage capacity (mm)** calculation of the actual evapotranspiration (ETA) and the effective rainfall.
- Runoff/percolation repartition level (mm)** calculation of the runoff/recharge quantitative distribution
- Half-percolation time (month)** calculation of the recharge to the underlying aquifer
- Half-recession time (month)** calculation of the aquifer emptying to the outlet (baseflow)
- Base groundwater level (m)
- Specific yield (-)

Application

- Extension or reconstitution of hydrometric and piezometric series** over a period during which we only know the input data (rainfall, PET)
- Predictive simulations/forecasts** of river flows and/or piezometric levels (probabilistic assessment in the case of GARDENIA)
- Evaluation of the parameters to be used for a **non-gauged basin** by applying regional **transposition** formulas (use with caution as it is necessary to have a large sample of calibrations on basins in the same region and minimal spot gauging)
- Estimation of the different **water balance** terms (with care)
- Preparation of a hydrodynamic model/gridded model** (hydro-climatic parameters, determination of homogeneous recharge zones...)

General outline of the GARDENIA code

River flow = runoff + base flow

Discharge

RUMAX

RUIPER

THG

NP-G/S+NB

TG

Groundwater level

Data required

- Gap free time series** of model "inputs": rainfall and evapotranspiration (possibly air temperature, if snowmelt is taken into account)
- Option: withdrawals time series (pumping /injection rates) in the basin
- Time series of observations (watershed's discharge rate and/or groundwater levels). They **may contain gaps** but need to cover the input time period. These observations shall be compared with model outputs
 - River flow gaps: code "-2"
 - GW level gaps: code "9999"
- Beware of the French date format - "dd/mm/yyyy"
- Date and value may be separated by tabs or spaces or semicolon
- All the files must be put in the same folder
- Computer's configuration: decimal separator must be a "decimal point", never a comma
- Data files formatting, time steps transforming, etc => "Shalimar" or R tools

Preliminary analyses of data

- Hydrogeological functioning**
 - Heterogeneities vs. global approach
 - Area of the hydrological watershed (is it different from the topographical watershed?)
 - Human effects: water channels, water diversions, withdrawals and discharges
 - ...
- Rainfall and PET**
 - Reconstitution of missing data
 - Homogeneity control
 - ...
- GW levels and river flows**
 - Accuracy of measured data (measurement marks, flow uncertainties...)
 - => to identify what can be reasonably expected from the simulation
 - Descriptive, statistical analyses of all variables (discharge rates, groundwater levels, rainfall) – time series analyses
 - => to identify specific processes to be reproduced by the model (Time series analyses with R: ESTHER package).

Thornwaite

Soil_capaci = 100 mm

Conceptual models with GARDENIA

1 single underground tank

2 underground tanks

1 underground tank with 2 drain holes

+ **new option**: overflow threshold in intermediate tank H (can be added to the underground flow, can leave the system or can be directed to the underground tank)

Balance in the soil tank / surface reservoir – “Production” function

- Progressive soil tank (- Edijatno)**

The capacity of the tank is called S(t). The maximum capacity of the tank is called Sx. The effective precipitation P_e is estimated using quadratic laws:

```

if P <= PET:
    P_e = P - PET
else:
    P_e = Sx * sqrt((P - PET) / (Sx - PET))
    
```

« Sx » / « R_{usup_prog} » in French, = ProgSoil_Cap
Capacity of progressive soil tank (mm)

The combination of tanks in series is feasible :
 - a “useful reserve” type soil tank and
 - a “progressive” soil tank.

But the experience shows that in practice it usually does not result in better simulations

Balance in the soil tank / surface reservoir – “Production” function

- The capacity of the soil tank is in fact the “available reserve for evapotranspiration”, or the “retention capacity” excluding bound water. It also integrates the interception capacity of the aerial parts of the vegetation, as well as possible depressions in the soil surface (puddles, furrows, etc.).
- Two schemes are possible:
 - A “useful reserve” type tank in “all or nothing” mode
 - A progressive ground tank with a filling status function (recommended).
- Soil tank of the “useful reserve” type (Thornwaite)
 - « RUMAX » in French is the soil capacity. The capacity of the tank is called S(t). The effective rainfall P_e is calculated as follow:

Soil capacity : Capacity of upper tank (mm) or the storage available for evapotranspiration

Transfer in the intermediate tank – “Transfer” function

Reservoir H represents the unsaturated zone. It is supplied by the effective precipitation “ALIMH” that is coming from the soil tank. The water height at all times in the reservoir H is called H, the reservoir is drained by two outlets, QH (runoff) and Percolation (recharge).

- Percolation (recharge) “ALIMG” in the underground reservoir G1 according to a linear law (exponential draining) of time constant “THG”:

$$ALIMG = H \cdot dt / THG \quad (dt = \text{duration of the time step})$$

- Flow outside the basin, as a fast component “QH” of the flow, according to a non-linear law controlled by the “RUIPER” parameter. This parameter “RUIPER” is the water level in the tank H for which both the percolation “ALIMG” and the flow “QH” are equal:

$$QH = H \cdot dt / (THG \cdot RUIPER / H)$$

« RUIPER » (mm) = Runof_Perco
Distribution runoff/seepage level, level in reservoir H for which there is an equal distribution between runoff and percolation

« THG » = T1/2_Perco
Time of 1/2 percolation (month), half-seepage time to the aquifer, time of half-filling of reservoir H

Transfer to the underground reservoir G1

- The G1 underground reservoir produces a **slow flow** component. It may represent the aquifer dynamics. The water height in the reservoir at all time is called G1

- G1 is filled by water that seeps from the intermediate tank H.
- G1 is drained by two outlets:
 - Basin outlet – tank H contributes a slow flow QG1, emptying of G1 follows an exponential law with time constant **TG1**: $QG1 = G1 \cdot dt / TG1$
 - Lower outlet – to a very slow flow reservoir G2, G2 follows an exponential law with time constant **TG12**: $ALIMG2 = G1 \cdot dt / TG12$

« TG1 » = $T1/2_Reces1$
Time of 1/2 dry up from G1 reservoir to the outlet
Half-recession time G1

« TG12 » = $T1/2_Perco2$
Time of 1/2 drawdown from tank G1 to G2
Half-transfer time G1 -> G2

External underground exchanges

- In watersheds with a significant underground component, it is common for underground flow to be left outside the watershed:
 - It is possible that a groundwater component part may not appear in the flow measured at the outlet (lateral propagation or "under" the gauging section => loss of flow (negative groundwater exchange).
 - On the other hand, it can happen that an additional groundwater flow comes from a neighboring watershed => increase flow (positive groundwater exchange).
- This underground exchange is modeled by an **external underground exchange coefficient**:

Simple outlet case with G1:
 $Q_Echang_Souterr = Fact_Echang \cdot QG1_Avant_Echang$
 $Q_Echang_Souterr = QG1 \cdot Fact_Echang / (1 + Fact_Echang)$

Simple outlet case with G2:
 the perennial groundwater component is the QG2 flow:
 $Q_Echang_Souterr = QG2 \cdot Fact_Echang / (1 + Fact_Echang)$

« Fact_Echang » = Exchan_Fact
External groundwater exchange factor (%)

Transfer to a very slow reservoir G2

- This is an optional flow component which may be linked to a **deep aquifer or a lower part of the aquifer**. The water height in G2 at all time is called G2
- It is supplied with water by the underground reservoir G1; it is drained by a very low flow (or "slow groundwater flow") QG2

« TG2 » = $T1/2_Reces2$
Time of 1/2 reservoir dryout G2
Half-recession time G2

- It is possible, if desired, to determine that this very low flow QG2 infiltrates deeper horizons which are not controlled by the flow measurements at the outlet. In other words : QG2 may be routed off the watershed

Groundwater level calculation (1/2)

« SG » Storage_Coef =
Aquifer Storage Coefficient (%)

« NB » Base_Level =
Local aquifer Base Level (m)

Groundwater level = tank GW level / storage coefficient + base GW level

Transfer to an underground reservoir with 2 outlets

- This kind of reservoir simulates, for example, the **activation of a second outlet when the water level exceeds a threshold**.
- It can also simulate an **overflow level** or represent an **overflow curve descending more rapidly at the beginning** when both outlets are flowing simultaneously, than at the end when only the deepest outlet is active. The water height in the reservoir at all time is called G.

« SEUIL » = $G1_Thresh$
Threshold recession
GW1 (mm)

- It produces one or two flow components through which it drains:
 - $QG2 = G \cdot dt / TG2$
 - and $QG1 = (G - SEUIL) \cdot dt / TG1$ if G is above **SEUIL (mm)**
 - $QG1 = 0$ if G is less than or equal to **SEUIL (mm)**
- As for reservoir G2, it is possible to specify (if desired) that the QG2 flow corresponds to a deep flow that is not controlled by the flow measurements at the outlet.

Groundwater level calculation (2/2)

- SG = calibration parameter => value not necessarily representative
- Unconfined aquifer: more reliable if the piezometer is far from the outlet (where amplitudes of groundwater levels are the greatest)
- Confined aquifer: if close to the unconfined aquifer

Summary of the calibration parameters

Parameter	Unit	Definition	Reservoir Tank	Conditions of use	Model structure (X = yes, O = no)
1 tank / 2 tanks / 3					
Soil_capaci		Capacity of upper tank or the storage available for evapotranspiration		If the "useful reservoir" option is selected	Not used
ProgSoil_Cap	mm	Maximum capacity of the progressive soil tank	Superficial O	If "progressive floor tank" option selected	
Runof_Perco		Level in reservoir H1 at which there is an equal distribution between runoff and percolation	Intermediate H		
T1/2_Perco	month	Time of half filling of reservoir H1 (H1 percolation time)			
T1/2_Reces1	month	Half recession time G1	Underground G1 or G2 with 2 options		
T1/2_Reces2	month	Time of 5/8 drawdown from tank G1 to G2 (half recession time G1 + G2)	Underground G1	If G2 is selected	
G1_Thresh		Separation threshold between the two outlets	Underground G1 with 2 options		
T1/2_Reces2	month	Half recession time G2	Underground G2 or G with 2 options		
Exchan_Fact		External groundwater exchange factor	Underground G1 or G2 with 2 options	Optional	Exchange option
Storag_Coef		Applier storage coefficient	Underground G1 or G2 or G with 2 options	If calibration on GW level	Rain-Phase-River flow mode
Base_Level	m	Local aquifer base level	Underground G1 or G2 or G with 2 options	If calibration on GW level	Rain-Phase-River flow mode

Charlier, 2017

Parameters calibration principle

- The model is calibrated using a **semi-automatic method** => the user provides a set of initial values, indicates the parameters which will be optimized and the upper and lower bounds of the parameter's value.
- A **non-linear optimization algorithm** adapted from **Rosenbrock's method** (1960) is used to provide a set of parameters allowing computations as close as possible to the set of observations
- The user judges the need to try a new optimization from a set of parameters that he is free to modify as he wishes:
 - Quality of the simulation (visual appreciation + numerical adjustment criteria)
 - Examination of the optimized parameters
 - Control of the given hydrological balance
- Sensitivity analysis:** allow exploring different parameters values in a given range around the optimized value. This allow to determine the range of parameters representing the water cycle

Other possible calibration parameters

- Correction factor of the catchment area** (without unit) **Corr_Area**
- Rainfall correction coefficient (%)** **Rain_Corr**
- PET correction coefficient (%)** **PET_Corr**
- River flow reaction time (delay)** = catchment concentration time (time for QH and QG to reach the outlet) **React_Time**
- Optional overflow threshold in the intermediate tank H
 - Threshold for runoff by overflow : in mm,
 - Duration of Half runoff by overflow : in number of **time steps**,
 - Maximal value of the runoff half duration : in months**Overfl_Thresh**
T1/2_Overfl
Mx_T1/2_Roff
- Qext**
 - Inputs (Exter_Flow > 0: gain), exports (Exter_Flow < 0: loss) **Exter_Flow**
 - Qcalc = QH + QG1 + QG2 + constant (Qext)
 - Q calculated in mm per time step is transformed into flow in m3/s (multiply by the watershed area and divide by the time step duration)

Model calibration principle

- Pay attention to the available **length of the time series** (and contrasting hydrological situations) and to the **model initialization** (start-up years)
- Parcimony** : calibration should be based on the **lowest number of parameters**
 - "It may happen that several sets of parameters produce quasi-equivalent simulations (non-uniqueness of the calibration). This risk of parameter compensation is reduced when only a small number of parameters are optimized"

Examples in the tutorial

The screenshot shows the GARDENIA software interface. On the left, there is a map of the Tâmega basin in northern Portugal. On the right, there is a list of parameters for calibration, including:

- Interflow
- gardenia
- gardenia-est
- gardenia-gw
- gardenia-river
- gardenia-soil
- gardenia-tank
- gardenia-urban
- gardenia-veg
- gardenia-veg-est
- gardenia-veg-gw
- gardenia-veg-river
- gardenia-veg-soil
- gardenia-veg-tank
- gardenia-veg-urban
- gardenia-veg-veg
- gardenia-veg-veg-est
- gardenia-veg-veg-gw
- gardenia-veg-veg-river
- gardenia-veg-veg-soil
- gardenia-veg-veg-tank
- gardenia-veg-veg-urban
- gardenia-veg-veg-veg
- gardenia-veg-veg-veg-est
- gardenia-veg-veg-veg-gw
- gardenia-veg-veg-veg-river
- gardenia-veg-veg-veg-soil
- gardenia-veg-veg-veg-tank
- gardenia-veg-veg-veg-urban
- gardenia-veg-veg-veg-veg

Numerical adjustment criteria

- GARDENIA calibrates the model to maximize the **Nash criteria** (Nash and Sutcliffe, 1970) for river flows and GW levels
- Ability to minimize **bias on river flows** (not on GW levels: annual baseline adjustment for bias)

$$NASH = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (X_m(t) - X_o(t))^2}{\sum_{t=1}^n (X_m(t) - \bar{X}_m)^2}$$

Ratio between the mean square deviation between observation and simulation and the variance of observations

$$BIAS = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (X_m(t) - \bar{X}_m(t))$$

Difference between mean river flow simulation and mean river flow observations

- The user can **choose to give more weight to low or high discharge values**

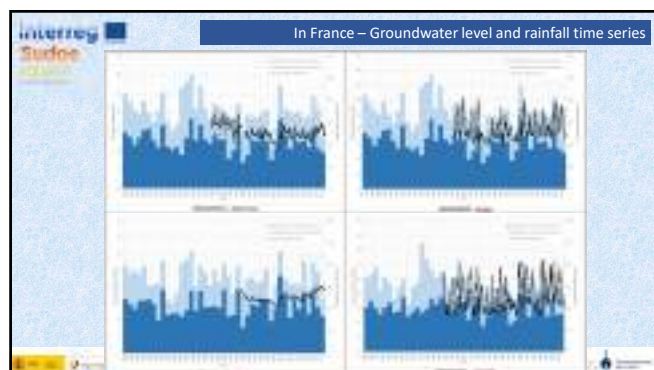
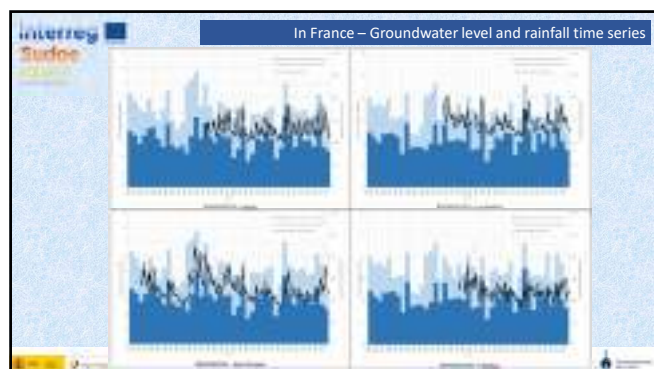
Interpretations and over-interpretation

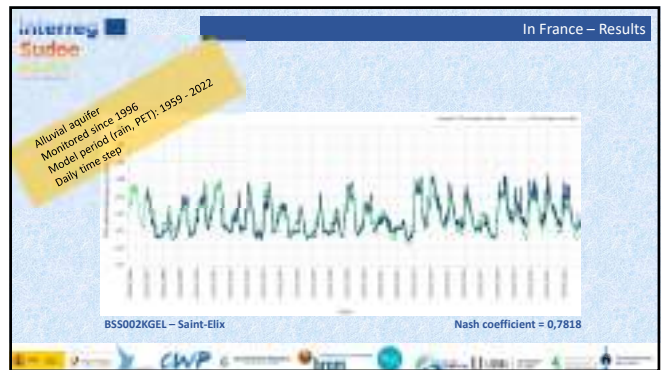
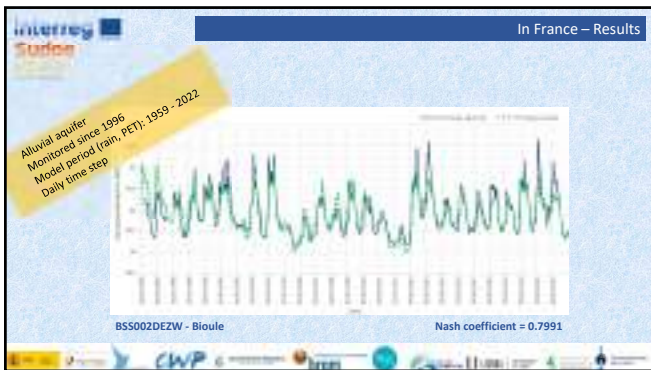
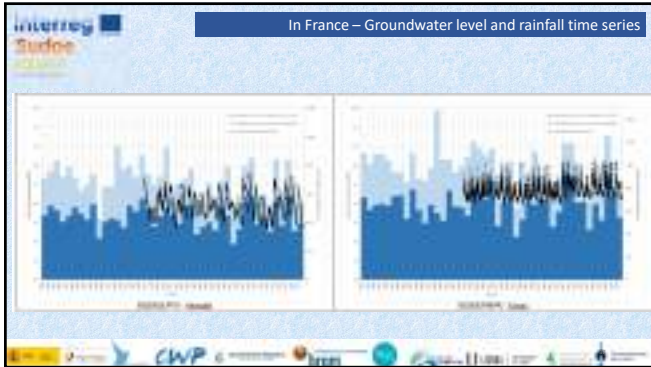
- **BUDGET :**
 - **Partition between slow and fast flow** should be considered with care (not necessarily a unique decomposition: for the same quality of flow reproduction, very different decomposition)
The risk is lower if rainfall-river flow-GW level calibration is used
- "We can say that slow flow is... slower than fast flow, but it is not obvious that it is really groundwater flow"
- "In the case of calibration only based upon a series of groundwater level observations, the balance should be interpreted as a flow analysis with extreme caution. Although this is a somewhat dangerous method of recharge analysis, it is often the only one available and should not be rejected."



Application

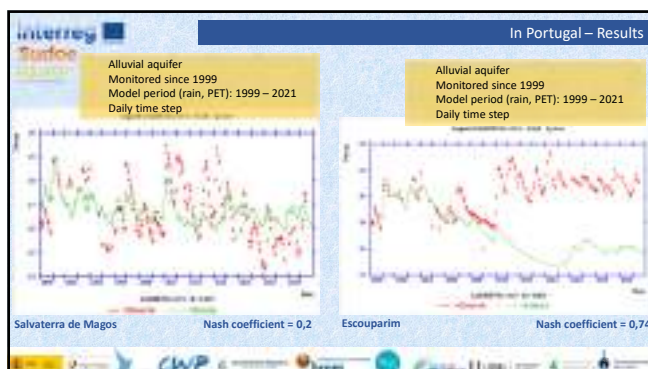
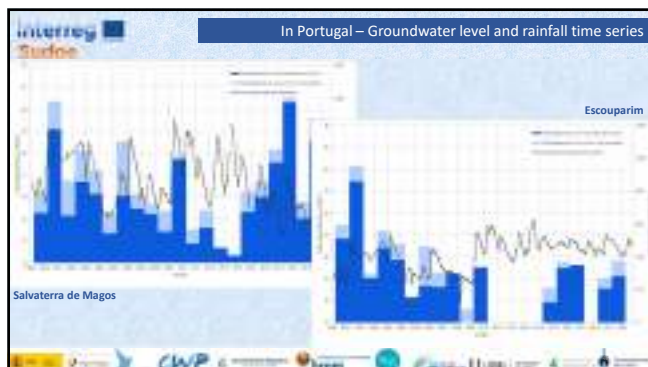
- 6 wells located in the Adour-Garonne basin (France),
- 2 wells located in the Llobregat (Spain),
- 1 well located in Campo de Cartagena (Spain),
- 2 wells located in Ribatejo (Portugal)

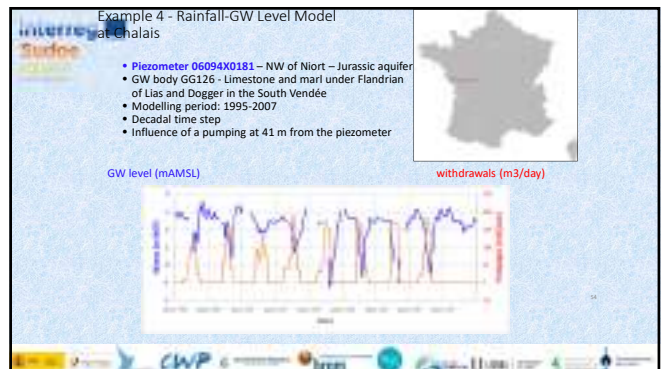
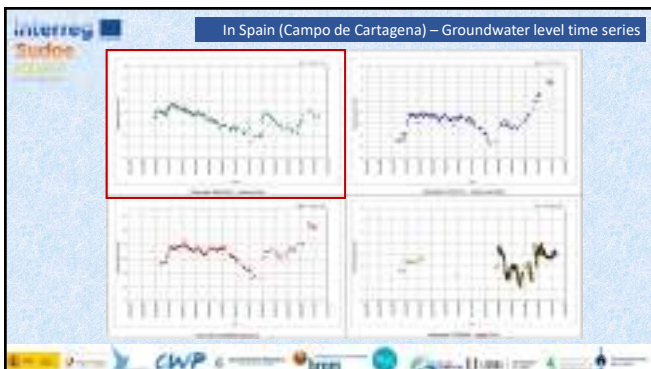
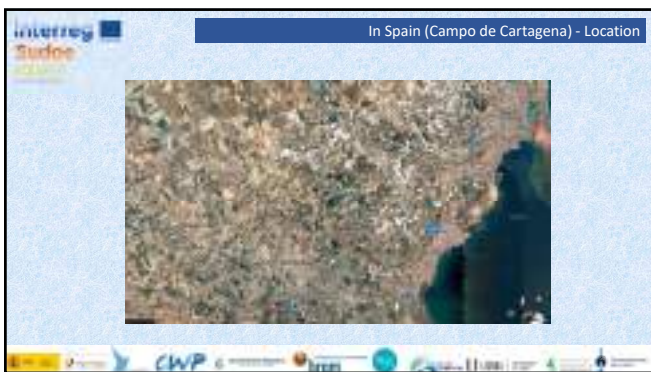
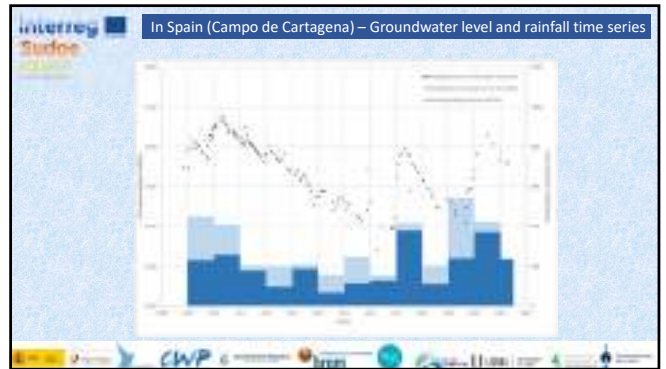
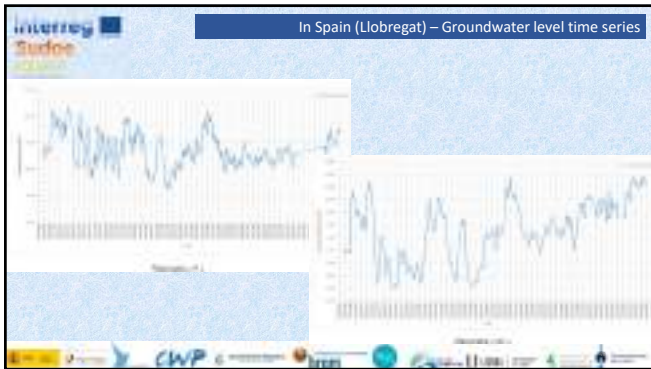




Groundwater withdrawals - Pumping

- 1 time series of pumping rate with the same time step as the rainfall time series
- 3 options: influence of pumping on river flows and/or on groundwater levels
=> add 3 parameters to be optimized.
 - The **pumping coefficient of influence** on aquifer level (river flow), which characterizes the amplitude of the influence of the pumping (depending on the measurement unit and the sign of the pumping series: +/-)
=>ex: m/(m³/day) ou (m³/sec)/(m³/day)
=>ex: coefficient = 0.001, then if pumping rate increases by 1000 m³/day, the GW level once stabilized will be 1 meter lower.
 - The **half response time** of the GW level (flow) to pumping (in month), according to an exponential law
 - The **half stabilization time of the pumping influence** on the GW level (in month), according to an exponential law
- Direct river pumping: the injection/pumping values multiplied by the influence coefficient (set by the user). Pay attention to the measurement units.





Forecast modeling (1/3)

- Probabilistic evaluation of the river flows/GW levels that we can expect:**
 - Length of the forecast (ex: 3 months): 01/04/2020 to 30/06/2020
 - If 50 years of rainfall are available => 50 simulations from 01/04 to 30/06/2020
 - At each time step => 50 values of river flows/GW levels
 - GARDENIA calculates at each time step (separately) the non-exceedance probabilities = ranking of values + calculation of quantiles (return period)
 - GARDENIA outputs and plots the following non-exceedance probabilities: 10% dry, 20% dry, 50%, 20% wet, 10% wet (10-year dry, 5-year dry, median, 5-year wet, 10-year wet)
 - + forecast without any precipitation (no rainfall)
- Required data:**
 - Forecast rainfall
 - Optional PET (+ average PETd)

Forecast modeling (2/3)

An example of GW level forecast

Observations: GW levels recorded (because it is old data...)

Forecast modeling (2/3)

- Two methods for correcting deviations at the date of issue** (first day at the beginning of the forecast)
 - By optimal adjustment of the model's tank levels (robustest method)
 - => simulation deviations reduced by an adaptive procedure which allows the correction of tank levels
 - => correction of levels proportional to the standard deviation of the supplies to each reservoir
 - => a preparation phase where the model calculates the standard deviations of the supplies and the optimal correction rate (precision thus depends on the length of the forecast)
 - By offsetting the initial deviation at the beginning of the forecast, then exponentially decreasing this deviation according to a "half-life time of the initial simulation deviation" (method implemented in EROS)


Forecast method:
(Tank levels adjustment / Offset with half-life)

Forecast modeling - Examples

Forecast period: 01/01/2023 - 30/06/2023
Daily time step


Time steps

- Time series data should be sampled at a uniform time step, known as "standard" in the following cases:
 - The day
 - 5-day time step (73 time steps per year)
 - 7-day time step (52 time steps per year)
 - The decade: 365 days / 36 (i.e. about 10 days)
 - The month: 365 days / 12 = 3 decades
- It is also possible to use a "non-standard" time step of the user's choice: for example 5 minutes, ½ hour or 2 days...
- Each variable can have a different time step, but rainfall must be selected at the finest time step (e.g. daily rainfall, monthly PET and decadal river flow)
- The calculation time step will be the finest time step, i.e. the rainfall time step
- To facilitate the initialization of the model: we need to have meteorological data available before the beginning of the observations (river flows and/or GW levels)



To find out more...

- Possibility of processing several independent watersheds successively in the same project (can also be done via EROS)
- GARDENIA: for lumped hydrological modelling of a catchment basin
 - <https://www.brgm.fr/en/software/gardenia-lumped-hydrological-modelling-catchment-basin>
- EROS: a semi-global hydrological modelling application for a catchment area divided into sub-basins
 - <https://www.brgm.fr/en/software/eros-semi-global-hydrological-modelling-application-catchment-area-divided-sub-basins>
 - Example : 9 sub-basins with 5 rivers whose flow is measured



Measurements units

- Rainfall, PET, snow: in mm/step
- Air temperature: °C
- Flows: m3/s
- GW levels: m (in "mNGF" in France or mAMSL in general, usually mAMSL but any other acceptable benchmark)

Thank you for your attention

Further information:
 Sandra BERANGER
 Hydrogeologist, Project manager
s.beranger@brgm.fr
 +33-5-62-24-14-53
www.brgm.fr


Data series

- No reading of dates => data must be continuous
- First and last data do not have to be complete
 - River flow gaps: code "-2"
 - GW level gaps: code "9999"
- No gaps possible for: Rain, PET, Temperature
- All series over the same period

Interreg Sudoe 2014-2020


Technical workshop
March 14th, 2023
Lisbon, Portugal

AQUIFER Project

Technical workshop :
The  website : groundwater levels forecasts

Sandra BERANGER, BRGM

AQUIFER project is funded by the Interreg Sudoe program and the European Regional Development Fund (ERDF)



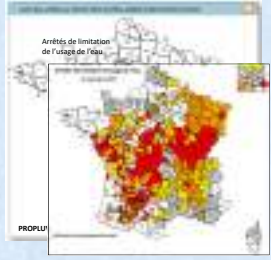
Interreg Sudoe 2014-2020

Sectors of interest : drought, floods, irrigation management

What will the water table situation look tomorrow?


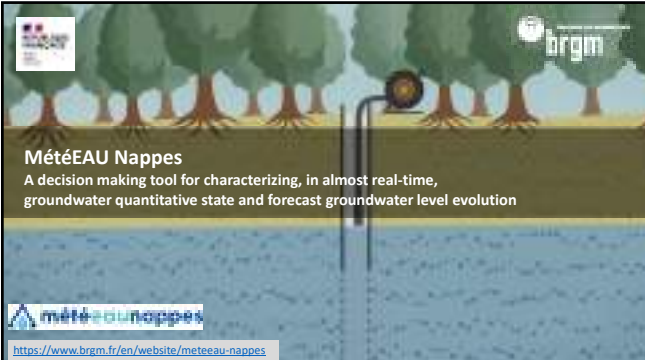
Should we take water restriction measures?

Did the recent heavy rainfall events have an impact on the water table?



Arrêtés de limitation de l'usage de l'eau


PROPLU

MétéEAU Nappes

A decision making tool for characterizing, in almost real-time, groundwater quantitative state and forecast groundwater level evolution

<https://www.brgm.fr/en/website/meteeau-nappes>





Interreg Sudoe 2014-2020

A collaborative work


- BRGM internal research and development project from 2015 to 2018 (maturation project since 2019)

Nicolas et al., 2020





1700 stations including
-1600 managed by BRGM
-1500 GPRS stations
(*) General Packet Radio Service, data received daily



Interreg Sudoe 2014-2020

Objectives

Well monitoring

Groundwater level recon.

Groundwater time serie

Hydrogeological status report

Groundwater level forecast


Groundwater state

- Very high level
- High level
- Moderately high level
- Around medium level
- Moderately low level
- Low level
- Very low level

Groundwater trends

- Rising
- Stable
- Decreasing


- Deployment of a communication tool able to cross data from different networks (meteorology, river flow, piezometric) in order to characterize in almost real-time groundwater quantitative state
- Forecast the evolution of groundwater levels by improving the data of the piezometric network, and provide public access to almost real-time data (maps and graphs)
- Value technical and scientific know-how and expertise, from data access to information creation
- Offer services with high added value, resulting from modelling work
- Contribute, participate, support to better water resource management in the territories




Interreg Sudoe 2014-2020

The tool is based on teletransmitted water level data

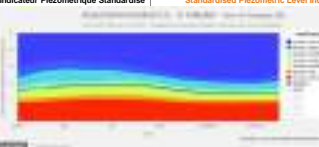
Saint-Porquier (09306X0091F) | Piezometer in the alluvial aquifer



Water level online database




Indicateur Piézométrique Standardisé

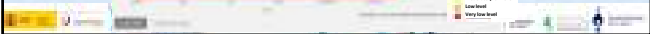


Standardised Piezometric Level Index (SPLI)

- Very high level
- High level
- Moderately high level
- Around medium level
- Moderately low level
- Low level
- Very low level

A symbol describes the groundwater situation compared to statistical data





A regional involvement

- ~50 lumped hydrological models identified (rain-piezometry-river flow) Gardenia and Tempo © BRGM
- 10 case studies (watersheds) selected from 7 French regions

- drought
- climate change
- flood

10 case studies - Modeling results

watersheds (area) / models / withdrawals / correlation coefficient :

Région	Bassin versant	Station hydrologique	Piezomètre	Type modèle	Périodes données	Période validation	Coeff. corrélation pluie	Coeff. corrélation débit	Coeff. corrélation débit
CHA	Sevère	Pouébois-Trois 143 km²	Valley	P-NP-Q	1972-2018	1994-2017	0.94	0.94	0.94
HNO	Arne	Moy 402 km²	Mouville	P-NP-Q	1990-2018	1995-2017	0.88	0.82	0.83
BRE	Isère	Yaretz (Mansard 25.6 km²)	Rochemont	P-NP-Q	1980-2018	2001-2017	0.83	0.88	0.82
PC	Sevère	Sevère-Orléans 425 km²	Castillon-Flamarchon	P-NP-Q	1970-2018	1976-2017	0.81	0.86	-
PC	Somme	Abbeville 504 km²	Saillaie-Sac	P-NP-Q	1988-2018	1992-2017	0.83	0.88	0.88
BOU	Yonne	Changéville 120 km²	Sourbarnon	P-NP-Q	1980-2018	1995-2017	0.89	0.82	0.89
DF	-	-	Perdrevalle	P-NP	NON	1961-2018	-	0.97	-
DF	-	-	Thiébaucourt	P-NP	NON	1961-2018	-	0.96	-
DF	-	-	Mareil-Le-Guyon	P-NP	NON	1961-2018	-	0.96	-
DF	-	-	-	P-NP	NON	1961-2018	-	0.96	-

About the 10 case studies

- 10 piezometers from 7 French regions
- 9 French groundwater bodies
- 4 types of rock: chalk, limestone, granite, gneiss

Région	Dept	N° des piezomètres	Commune piezomètre	P. des nappes	Int. du piez. (m)	MESO associée	Objectifs de l'étude
CHA	16	023420028/F	Valley	sol	sol	Craine de Champagne sud et centre	volumes prélevables
HNO	27	01805X0036	Mouville	sol	sol	Craine alluviale du Neubourg / Ron / Plaine de Seine anisée	modélisation craine du BV de Ron
BOU	21	04388X0002/SONDAG	Sourbarnon	sol	sol	BY Seine (sable glauconneux)	hydrologie/BV
PC	16	040732010/S1	Castillon-Flamarchon	sol	sol	Craine pluviale	hydrologie (prévisions étages)
PC	16	044730005/P22012	Saillaie-Sac	sol	sol	Craine de la vallée de la Somme	com
BOU	21	04388X0002/SONDAG	Sourbarnon	sol	sol	Calcaires jurassiques du sud et des Côtes et argilo-sableuses de Bourgogne	hydrologie (prévisions étages)
DF	18	01825X0091/P1	Perdrevalle	sol	sol	Craine et Tertiaire de Marais à Champagne	hydrologie (prévisions étages)
DF	18	012200000/P22018	Thiébaucourt	sol	sol	Sables et Craie du Yvelin Française	hydrologie (prévisions étages)
DF	18	01825X0091/P1	Mareil-Le-Guyon	sol	sol	Craine et Tertiaire de Marais à Champagne	hydrologie (prévisions étages)
DF	18	012200000/P22018	-	sol	sol	Sables et Craie du Yvelin Française	hydrologie (prévisions étages)

- abstracted volumes
- grid model
- drought and drinking water
- drought (dry forecast)
- flood
- climate change
- drought (dry forecast)
- drought (dry forecast)
- groundwater/river relationship

Need to recovery and update a lumped hydrological model

Expected graphs

Different hydrogeological contexts

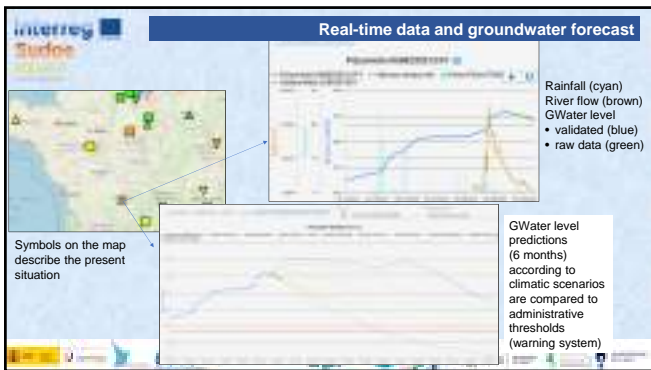
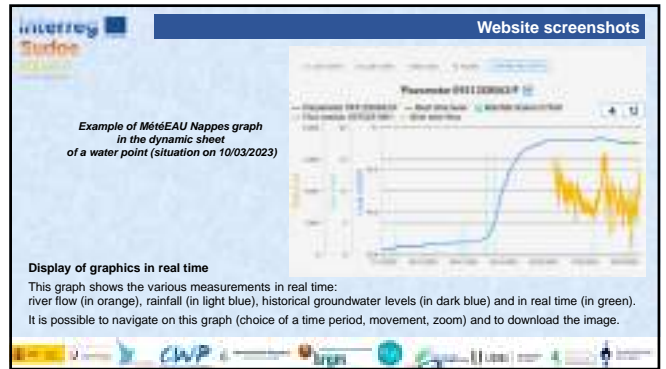
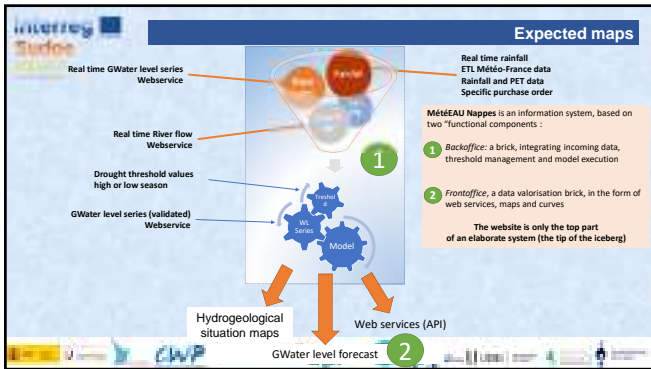
CHA 02382X0028/F Craine Marneuse Et Marnes Du Turonien Inférieur	BOU 04398X0002/SONDAG Calcaires Jurassiques
HNO 01805X0036 Craine Du Séno-Turonien Du Bassin Parisien	IDF 01825X0091/P1 Calcaires Et Sables Du Lutétien
01516X0004/S1 Craine Du Séno-Turonien Du Bassin Parisien	LIM 06882X00213/F1 Socle Métamorphique


Expected maps

The national hydrological situation report

=> monthly evolution of groundwater resources made by BRGM for the French Ministry of Environment and Ecology

Forecast in 3 months ?

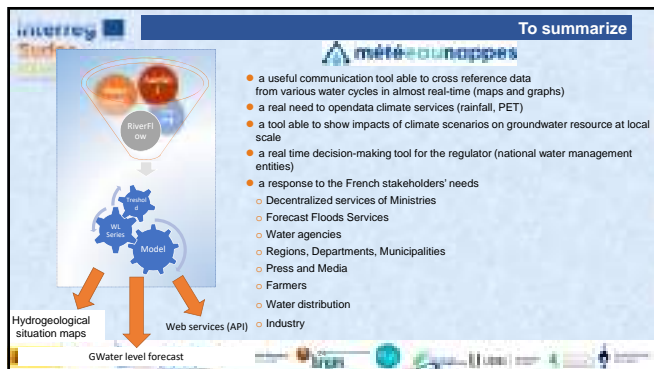
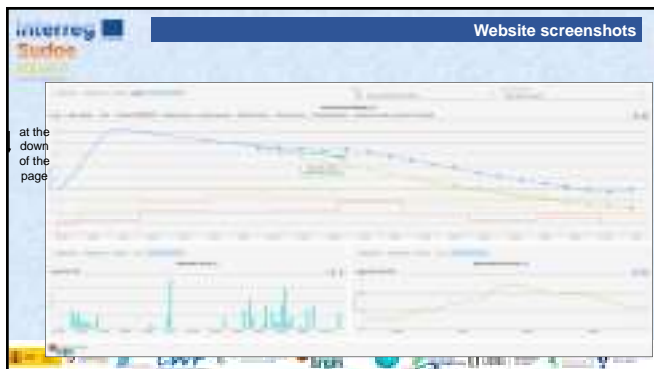


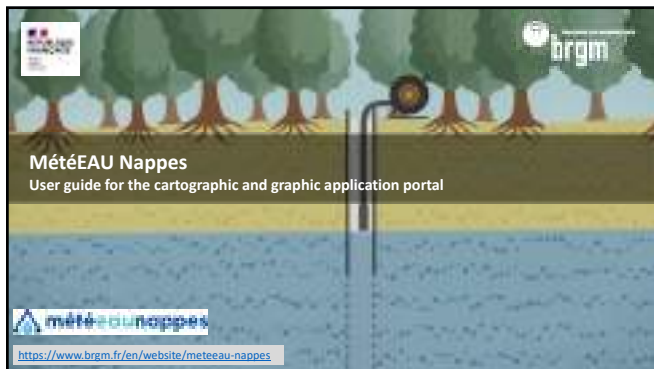



- a tool with a lot of functionalities and services to have the groundwater situation at the current date and in the future (for public - industry)
- availability of the latest rainfall/groundwater/surface water data
- decision support tool for water management on territories (integration of restriction thresholds, assistance in managing water use conflicts)
- easy to use and understandable web interface (maps and real-time graphs, dynamic sheets)
- an online executable BRGM software with possible monthly updates of forecasts

➔ **an open website**
a public/private Application Programming Interface (API)

<https://meteeunappes.brgm.fr/>





Website access rights

	general public	expert	contributor	administrator
forecast standardized piezometric indicator	✓	✓	✓	✓
forecasting 15 days	✓ ¹	✓ ¹	✓ ¹	✓
complete forecasts	X	✓ ²	✓ ²	✓
sensor management	X	X	✓ ³	✓
thresholds management	X	X	✓ ³	✓
performing a new forecast with a model	X	X	✓ ²	✓
model creation	X	X	X	✓

1 - Limited to public models
2 - Limited to a model selection associated with the user group
3 - Limited to a sensor selection associated with the user group

Access to the website

The Uniform Resource Locator (URL) is:
<https://meteeauappes.brgm.fr>

This home site allows to:

- introduce the tool
- consult the bibliographic references
- application access:
<https://app.meteeauappes.brgm.fr/>
- discover the news
- send an email with the contact form

Website cartographic part

Annotations for the cartographic part:

- search for a piezometer by its BSS code* or a locality
- bilingual version (French-English)
- clickable points with models
- display or not the real-time stations
- situation refreshed every day
- to save map zoom
- piezometers symbology and color according to the standardised piezometric level index of the day
- scale bar

Access to the website (users)

To access the application, each user must create an account with email and password.

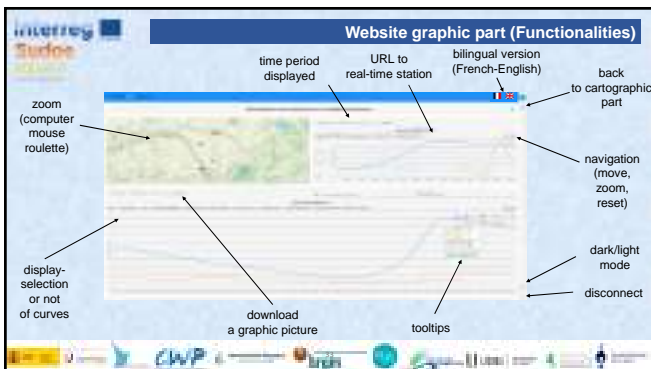
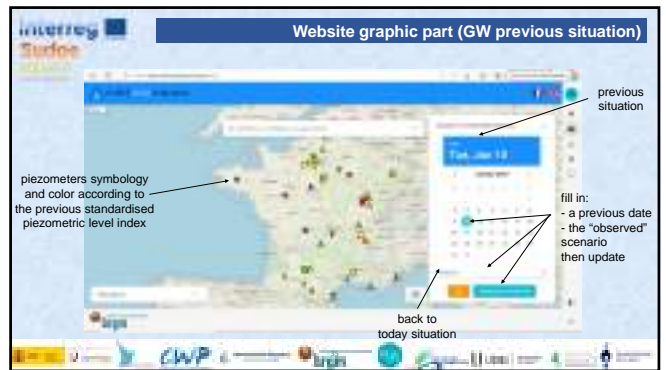
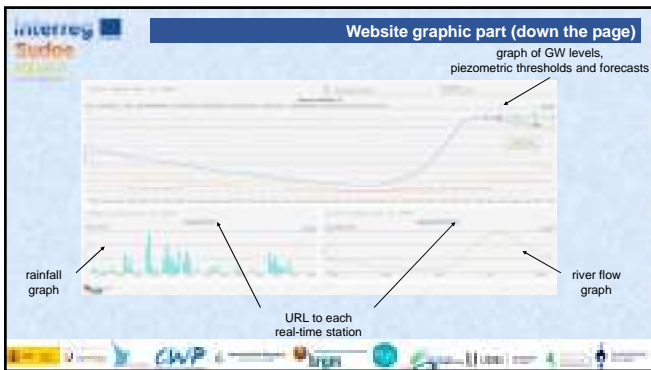
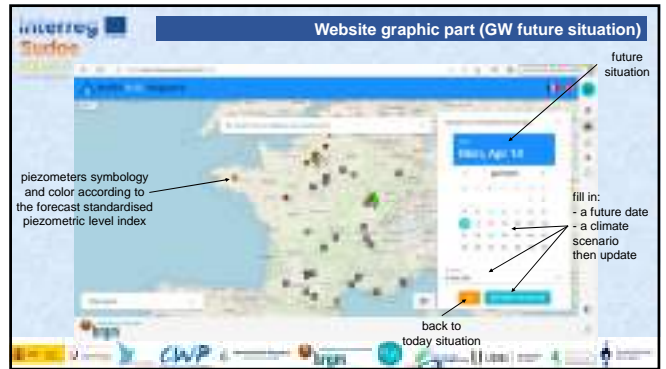
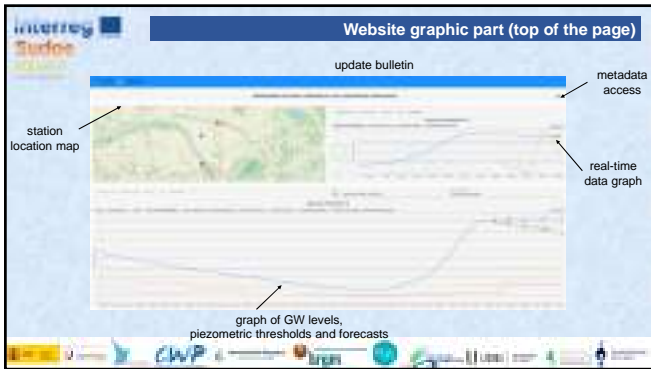
Depending on the user, different rights will be assigned:

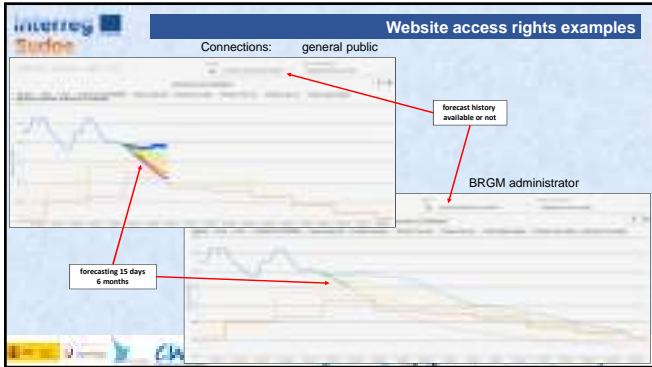
- general public
- expert
- contributor

Website cartographic part (GW current situation)

Annotations for the GW current situation:

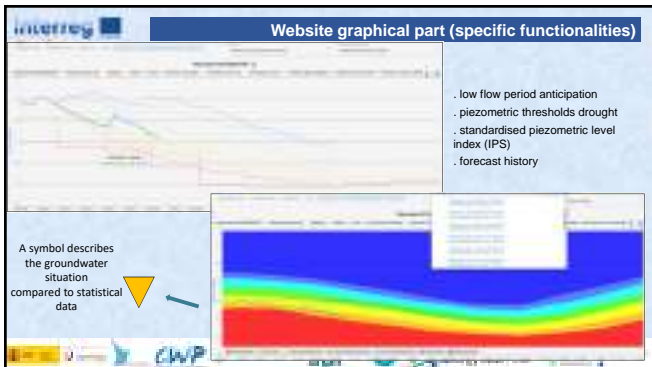
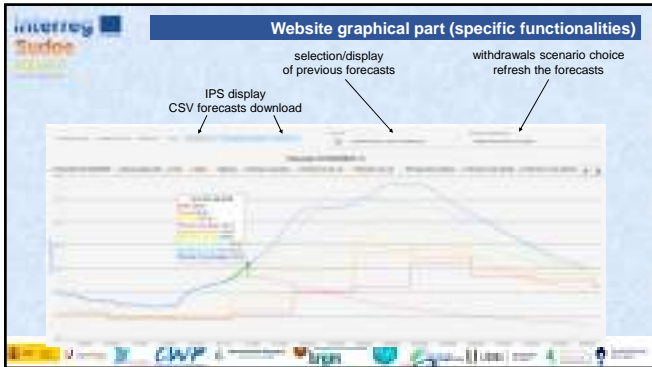
- after clicking on a piezometer, display of an information window and access to its sheet
- graphic part access





Thank you for your attention

Further information:
 BERANGER Sandra
 Hydrogeologist, Project Manager
s.beranger@brgm.fr
 +33-5-62-24-14-53
 www.brgm.fr



interreg Sudoe 2014-2020

Technical workshop
March 14th, 2023
Lisbon, Portugal

AQUIFER Project

Technical workshop :
The  website : groundwater withdrawal forecasts

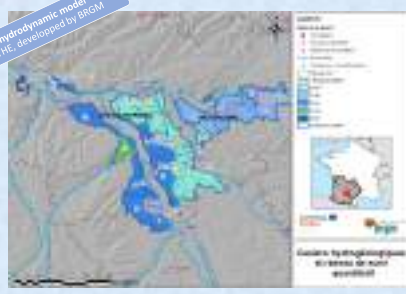
Sandra BERANGER, BRGM

AQUIFER project is funded by the Interreg Sudoe program and the European Regional Development Fund (ERDF)




interreg Sudoe 2014-2020

3D hydrodynamic model
MARTHE, developed by BRGM



Carte de l'hydrodynamisme des nappes de l'axe Garonne



interreg Sudoe 2014-2020

Objectives

Well monitoring


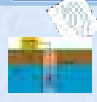




Groundwater level record

Groundwater time serie

Hydrogeological status report

Groundwater level forecast

GW withdrawable volume forecast


Groundwater state

- Very high level
- High level
- Moderately high level
- Around medium level
- Moderately low level
- Low level
- Very low level

Groundwater trends

- ▲ Rising
- Stable
- ▼ Decreasing

- Forecast groundwater withdrawable volumes based on groundwater level forecasts
- Value technical and scientific know-how and expertise, from data access to information creation
- Offer services with high added value, resulting from modelling work
- Contribute, participate, support better water resource management in the territories

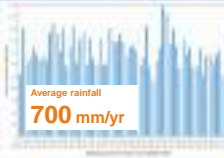


interreg Sudoe 2014-2020

Geo-climatic context

Geography:

- East of the Aquitaine basin.
- At the confluence of 3 major rivers: Garonne, Tarn and Aveyron.
- Great alluvial plain surrounded by hills composed of the Lomagne and White Quercy Tertiary molasses and, on its eastern border, by the karstic plateaux of Caylus Causse, which is a part of Quercy Causse.



Average rainfall
700 mm/yr



Source : Météo France

Climate:

- Mild wet winters and hot, generally dry summers.
- Homogenous rainfall across the region.
- High inter-annual variation : from 420 to 1000 mm/yr.

Source : IGN

Area of alluvial plains
1000 km² - 30%
Of the Tarn-et-Garonne department surface

interreg Sudoe 2014-2020

Decision support tool for groundwater management of the alluvial aquifer in the Tarn-et-Garonne department (82)

Objective : Forecasting groundwater withdrawable volumes based on groundwater levels and current recharge

Groundwater levels forecast

3D hydrodynamic model
MARTHE, developed by BRGM







interreg Sudoe 2014-2020

Geologic context

Terrace system:


- An alluvial area with positive hydrogeologic properties...
- ...But a shallow depth (average thickness 5 to 8 m).
- Tiered terraces** system, with, moving away from the watercourse:
 - ↗ Age of deposit and alteration of sediment.
 - ↗ Fine fraction : + clay, - sand / gravel.
 - ↘ Hydrodynamic properties (permeability...).
 - ↘ Borehole operating flow rate.


DIAGRAMMATIC CROSS-SECTION OF THE TIERED TERRACE SYSTEM

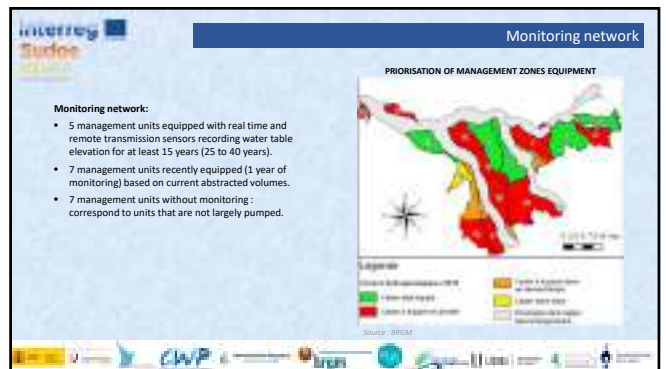
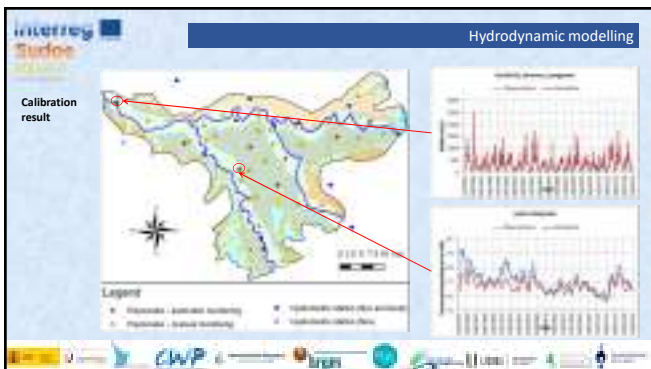
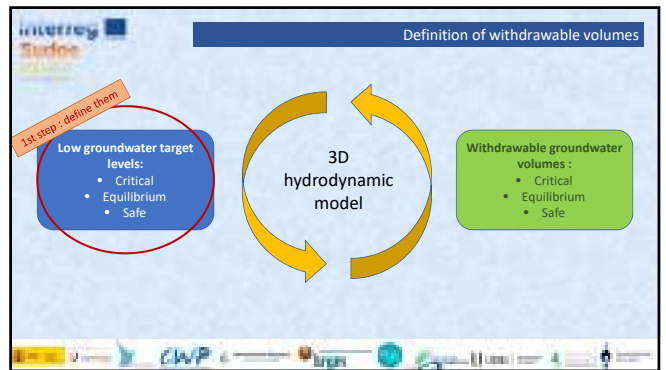
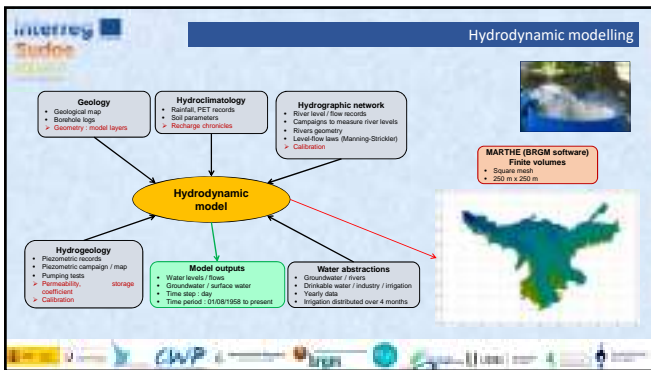
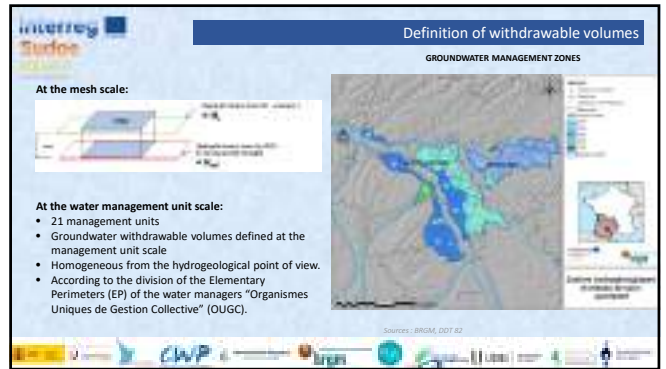
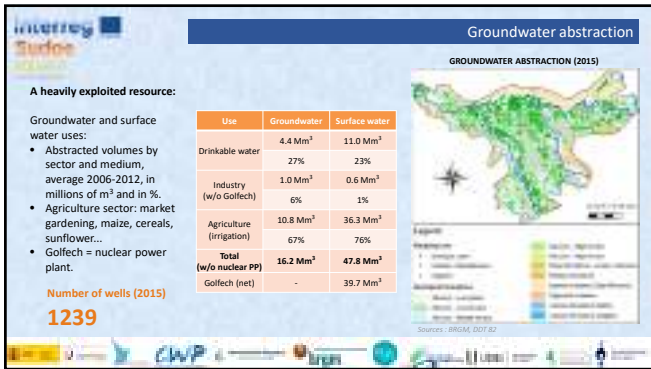


Source : BRGM

SIMPLIFIED GEOLOGICAL MAP

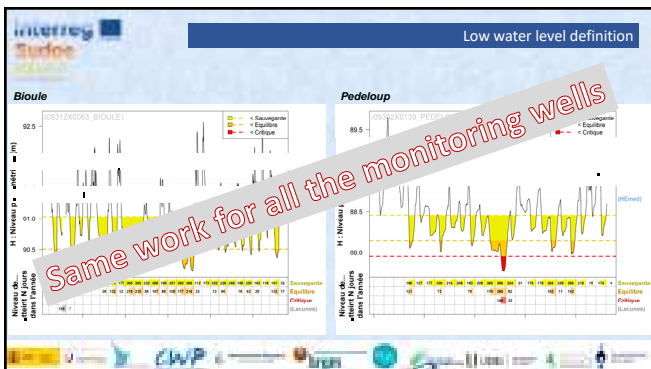
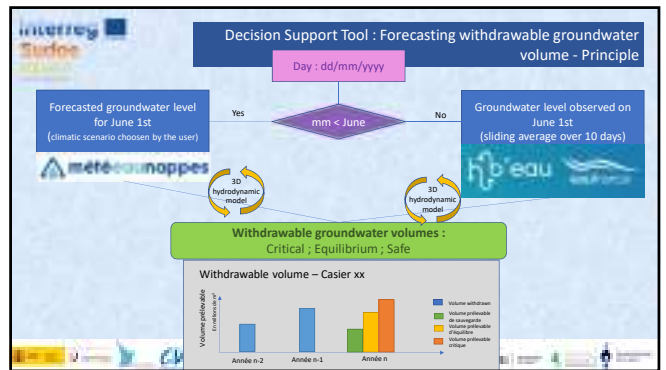
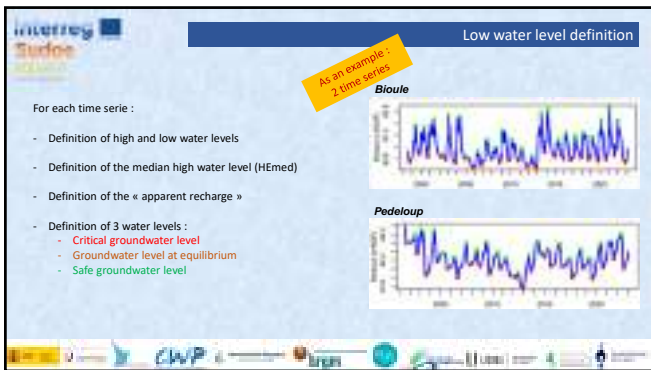
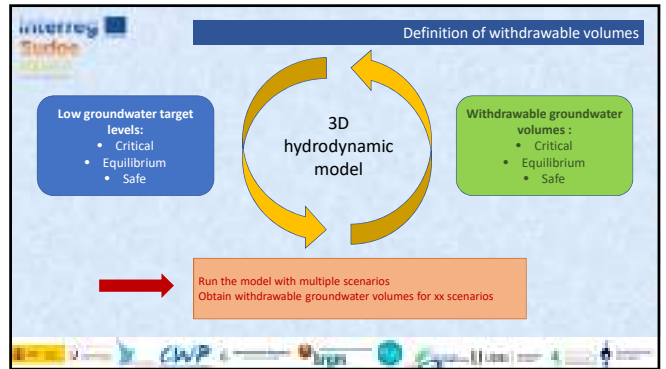






Monitoring network

Management Unit	Well number	Well Name	Well reference name	Management Unit	Well number	Well Name	Well reference name
1	BSS002DAWG	Pédeloup	Pédeloup	12			
2	BSS004DFVD	Négrepelisse		13	BSS002CZMA	Pomiès	Pomiès
3	BSS002EGZN	Bezette		14			
4	BSS002DDZV	St-Pierre	St-Pierre	15	BSS004DFVQ	Finhan	
5	BSS002DEZW	Bioule	Bioule	16	BSS002DDXS	Callony	
6	BSS002DETB	Pradas	Pradas	17	BSS004DFVR	Valence_Quercy	
7				18	BSS004DFVP	Savenès	
8				19			
9				20	BSS004DFVG	Donzac	
10	BSS002DCXR	Escatalens	St-Porquier	21			
11	BSS002DACM	Garnouillac					




Decision Support Tool : Forecasting withdrawable groundwater volume

Available soon on www.viginappe2.brgm.fr

VIGNappe82, le service en ligne de gestion des volumes prélevables par le BRGM et le projet SUDOE AQUIFER

Accéder aux volumes prélevables

Front page



Fenêtre Pop-up

2 onglets :

- Niveau piézométrique :
- Chronique piézométrique
- Chronique prévisionnelle
- Du point sélectionné sur la carte

Infos :

- Nom du piézomètre
- Entité BD-LISA
- Gestionnaire du point
- Valeurs seuils

Situation au mois de xx année xx
Déroulé permettant de passer au mois précédent + suivant

A adapter en fonction de ce qui est dispo dans MétéEAU Nappe

VIGNappe82, le service en ligne de gestion des volumes prélevables par le BRGM et le projet SUDOE AQUIFER


Fenêtre pop-up

VOLUME PRELEVABLE – Casier xx

Graphique

Zoom 2 ans 5 ans 7 ans 10 ans HISTO

Volume prélevable – Prévission xxx (sélection automatique, à choisir parmi : prévision sans pluie, prévisions 10 ans sec, 5 ans sec, prévision médiane, prévisions 5 ans humide ou 10 ans humide)



Année n-2 Année n-1 Année n

- Volume prélevé
- Volume prélevable de sauvegarde
- Volume prélevable d'équilibre
- Volume prélevable critique

VOLUME PRELEVABLE – Casier xx

Tableau

Année	Volume prélevable de sauvegarde	Volume prélevable d'équilibre	Volume prélevable critique	Volume prélevé
n	xx	xx	xx	
N-1				xx
N-3				xx
...				
N-10				xx

Avec possibilité de télécharger les informations

Si mois > octobre : message spécifiant que la période d'irrigation est en cours d'achèvement. Renouveler la consultation en début d'année pour connaître les volumes prélevables n+1


VIGNappe82, le service en ligne de gestion des volumes prélevables par le BRGM et le projet SUDOE AQUIFER

Fenêtre pop-up

NIVEAU PIEZOMETRIQUE

Zoom 7j 30j 90j 365j HISTO

Niveaux d'eau



Avec : seuils de vigilance, d'alerte, d'alerte renforcée et de crise, si définis sur le piézomètre.

Chronique prévisionnelle si disponible dans MétéEAU nappes.

INFORMATIONS

Code du piézomètre : code BSS

Nom du piézomètre :

Commune :

Entité BD-LISA suivie :

Gestionnaire du point :

Valeurs seuils :

Thank you for your attention

Further information:

BERANGER Sandra
Hydrogeologist, Project Manager

s.beranger@brgm.fr
+33-5-62-24-14-53
www.brgm.fr

VIGNappe82, le service en ligne de gestion des volumes prélevables par le BRGM et le projet SUDOE AQUIFER

Carte zoom / dézoom sur fond de carte

Points indiquant les points de suivi des nappes du BRGM, avec indication colorée rendant compte de l'IPS pour le mois sélectionné – à définir en interne les possibles

Quand on passe sur un casier : en fonction du scénario MétéEAU/Nappe duquel la chronique du point de suivi est le plus proche (6 scénarios possibles : prévision sans pluie, prévisions 10 ans sec, 5 ans sec, prévision pluie médiane, prévisions 5 ans humide, 10 ans humide), affichage d'une fenêtre pop-up avec histogrammes montrant les 3 volumes prélevables et rappel des années passées : volume prélevable de sauvegarde, volume prélevable d'équilibre et volume prélevable critique.

Rendre les rivières visibles + entités BD-Lisa (niveau apparaissant fonction du niveau de zoom actif

Quand on clique sur « Accéder aux volumes prélevables » Ou qu'on se connecte directement depuis le site vitrine Renseignement adresse mail + mot de passe obligatoire

Menu affichant un message si date de consultation = fin d'année : avertissement que la période d'irrigation est en cours d'achèvement. Renouveler la consultation en début d'année pour connaître les estimations de volumes prélevables n+1

Légende présentant les couleurs choisies pour les points de suivi piézomètres

ANNEXE 4.

LISTE DES PARTICIPANTS AU PORTUGAL

AQUIFER - Technical workshop
March 14th, 2023
Lisboa (Portugal)
List of participants

	NAMES	ORGANISM	e-mail	Signature
1	RITA ISIDRO	BARRIO DO MUNICIPIALITY	rita.isidro@cm-barrario.pt	
2	NUNO VITORINO	AIA (Setúbal)	nvitorino@aia-estremadura.pt	
3	NICOLAS GARCIA SALAZAR	IST LISBOA	nicolas.garcia.salazar@outlook.com	
4	JONATHAN OPOKU OTI	IST LISBOA	joepoke81@gmail.com	
5	FRANCOIS NICHEMUNDE KEBINSE	IST LISBOA	francois.kebinse@gmail.com	
6	ANA CARLOS	LIS-WATER	ANA-CARLOS@LIS-WATER-ORG	
7	VITO N. SANTINHO	SAMS ALGARVE	vnsantin@SAMSALGARVE.PT	
8	António Dias de Silva	APA, I.P.	dias.silva@apam-biente.pt	
9	MANUEL ANTONES DAS SILVA	VIA CONSULORES	hidrogeotec@gmail.com	
10	Judite Fernandes	LNEG	Judite.fernandes@lneg.pt	
11				
12				
13				
14				
15				

ANNEXE 5.

PROGRAMME DES ATELIERS DE FORMATION EN ESPAGNE

AQUIFER PROJECT. Innovative instruments for the integrated management of groundwater in a context of increasing scarcity of water resources



TRAINING MEETING

29 de març de 2023

DAMM

Carrer del Pi, 5, 08820 El Prat de Llobregat

INTRODUCTION:

GARDENIA (acronym for Modèle Global À Réservoirs pour la simulation de Débits et de Niveaux Aquifères) uses meteorological data series related to catchment area (precipitation, potential evapotranspiration, air-temperature) to calculate:

- the flow rate at the outlet of a river (or spring);
- and / or the groundwater level at a given location in the underlying unconfined aquifer.

GARDENIA is an application for lumped hydrologic modelling. It simulates the main water cycle mechanisms in a catchment basin (rainfall, evapotranspiration, infiltration, runoff) by applying simplified physical laws for flow through successive reservoirs.

PROGRAM:

10h00 – 10h10	Welcome and Introduction
10h10 – 12h00	The GARDENIA Software: groundwater level modelling, presentend by BRGM
12h00 – 14h00	Lunch break
14h00 – 15h00	The météEAU'Nappes website : groundwater level forecasts
15h00 – 16h00	The VIGINappe website : groundwater withdrawal forecasts
16h00 – 16h20	Example Llobregat Site application
16h20 – 16h40	Closing remarks and closure

Organizers:



Project cofinanced by the Interreg SUDOE program through the European Regional Development Fund (FEDER).

Project participated by:



ANNEXE 6.

DIAPORAMAS DES ATELIERS DE FORMATION EN ESPAGNE

Technical Workshop
March 29th, 2023
Barcelona, Spain

AQUIFER Project

Technical workshop :
Training to lump hydrological modeling
GARDENIA Software

Vivien Hakoun, BRGM

AQUIFER project is funded by the Interreg Sudoe program and the European Regional Development Fund (ERDF)

Hydro(geo)logical modeling


Complexity

Global models / lumped hydrological model (rain-river flow or rain-GW level models)

Black box
An output of the system is connected to one or more inputs by transfer functions (or impulse responses)

No "physical" laws

Input (Rain, PET)




Output (GW level, river flow at the basin outlet)

Physically based models (mechanistic or deterministic)



Solving the general groundwater flow equation. They attempt to represent the actual physical system.

Spatialized models or gridded models accounting for groundwater/river exchanges



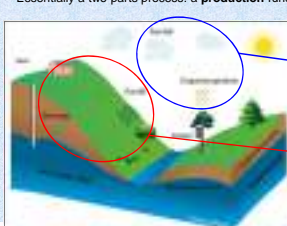
Poitou Charentes model (BRGM)

The water cycle

Lumped-parameters models

- Simplified approach of the water cycle in a small watershed, considering a lumped input (rainfall and Potential EvapoTranspiration = PET) and a single output (river flow and groundwater level)
- Essentially a two parts process: a **production** function and a **transfer** function



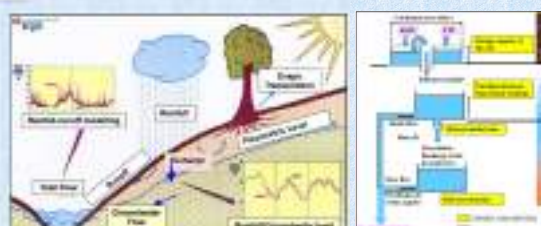
Production function: calculates the amount of water reaching the system, i.e. the **effective rainfall**

Transfer function: calculates when the water reaches the system's outlet (river flow) or the underlying aquifer

The water cycle
A brief outlook

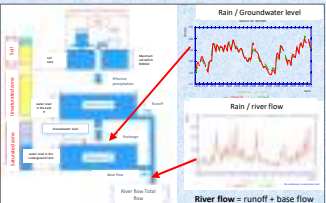


Lumped-parameters models
GARDENIA



Gardenia with one groundwater reservoir

General outline of the GARDENIA code



- Reservoir-to-tank transfers governed by **exponential discharge laws** (specific to each reservoir)
- Laws defined by **dimensional parameters** of the model (soil retention capacity, transfer time, overflow thresholds, etc.)

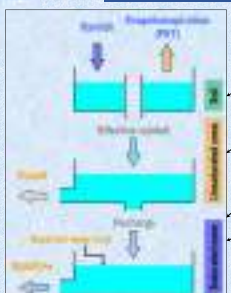
River flow = runoff + base flow

- Because of the global character of this schematization and the complexity of the real hydrological system, these parameters, although having a physical meaning, are **difficult to deduce a priori from the physiographic characteristics** of the watershed (geology, vegetation cover, etc)
- The parameters must therefore be **determined by calibration**

Download links

- GARDÉNIA** (acronym in French for « modèle **G**lobal **A** Réservoirs pour la simulation des **D**ébits et des **N**iveaux **A**quifères » [Global model with reservoirs for simulating aquifer flows and levels])
- Free access (Version 8.8, May 2021): <https://www.brgm.fr/en/software/gardenia-lumped-hydrological-modelling-catchment-basin>
- Documentation :**
 - RP-62797-FR:** Instruction manual, user guide
 - RP-61720-FR:** Tutorials with GARDENIA "your first models"
 - RP-64500-FR:** Comparison between GARDENIA and physical modeling

Lumped-parameters models

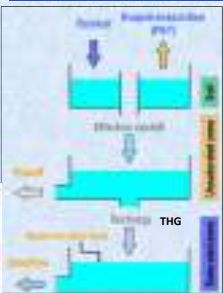


- Progressive storage capacity (mm)** calculation of the actual evapotranspiration (ETA) and the effective rainfall.
- Runoff/percolation repartition level (mm)** calculation of the runoff/recharge quantitative distribution
- Half-percolation time (month)** calculation of the recharge to the underlying aquifer
- Half-recession time (month)** calculation of the aquifer emptying to the outlet (baseflow)
- Base groundwater level (m)
- Specific yield (-)

Application

- Extension or reconstitution of hydrometric and piezometric series** over a period during which we only know the input data (rainfall, PET)
- Predictive simulations/forecasts** of river flows and/or piezometric levels (probabilistic assessment in the case of GARDENIA)
- Evaluation of the parameters to be used for a **non-gauged basin** by applying regional **transposition** formulas (use with caution as it is necessary to have a large sample of calibrations on basins in the same region and minimal spot gauging)
- Estimation of the different **water balance** terms (with care)
- Preparation of a hydrodynamic model/gridded model** (hydro-climatic parameters, determination of homogeneous recharge zones...)

General outline of the GARDENIA code



River flow = runoff + base flow

Discharge

Groundwater level

Labels: RUMAX, RUIPER, THG, NP-G/S+NB, TG

Data required

- Gap free time series** of model "inputs": rainfall and evapotranspiration (possibly air temperature, if snowmelt is taken into account)
- Option: withdrawals time series (pumping /injection rates) in the basin
- Time series of observations (watershed's discharge rate and/or groundwater levels). They **may contain gaps** but need to cover the input time period. These observations shall be compared with model outputs
 - River flow gaps: code "-2"
 - GW level gaps: code "9999"
- Beware of the French date format - "dd/mm/yyyy"
- Date and value may be separated by tabs or spaces or semicolon
- All the files must be put in the same folder
- Computer's configuration: decimal separator must be a "decimal point", never a comma
- Data files formatting, time steps transforming, etc => "Shalimar" or R tools

Preliminary analyses of data

- Hydrogeological functioning**
 - Heterogeneities vs. global approach
 - Area of the hydrological watershed (is it different from the topographical watershed?)
 - Human effects: water channels, water diversions, withdrawals and discharges
 - ...
- Rainfall and PET**
 - Reconstitution of missing data
 - Homogeneity control
 - ...
- GW levels and river flows**
 - Accuracy of measured data (measurement marks, flow uncertainties...)
 - => to identify what can be reasonably expected from the simulation
 - Descriptive, statistical analyses of all variables (discharge rates, groundwater levels, rainfall) – time series analyses
 - => to identify specific processes to be reproduced by the model (Time series analyses with R: ESTHER package).

Thornwaite

Soil_capaci = 100 mm

Conceptual models with GARDENIA

1 single underground tank

2 underground tanks

1 underground tank with 2 drain holes

+ **new option:** overflow threshold in intermediate tank H (can be added to the underground flow, can leave the system or can be directed to the underground tank)

Balance in the soil tank / surface reservoir – “Production” function

- Progressive soil tank (- Edijatno)**

The capacity of the tank is called S(t). The maximum capacity of the tank is called Sx. The effective precipitation P_e is estimated using quadratic laws:

$$P_e = \begin{cases} P - PET & \text{if } P > PET \\ P - PET + \frac{(P - PET)^2}{S_x} & \text{if } P < PET \end{cases}$$

« Sx » / « Rusup_prog » in French, = ProgSoil_Cap
Capacity of progressive soil tank (mm)

The combination of tanks in series is feasible :

- a “useful reserve” type soil tank and
- a “progressive” soil tank.

But the experience shows that in practice it usually does not result in better simulations

Balance in the soil tank / surface reservoir – “Production” function

- The capacity of the soil tank is in fact the “available reserve for evapotranspiration”, or the “retention capacity” excluding bound water. It also integrates the interception capacity of the aerial parts of the vegetation, as well as possible depressions in the soil surface (puddles, furrows, etc.).
- Two schemes are possible:
 - A “useful reserve” type tank in “all or nothing” mode
 - A progressive ground tank with a filling status function (recommended).
- Soil tank of the “useful reserve” t_{voe} (Thornwaite)
 - « RUMAX » in French is the soil capacity. The capacity of the tank is called S(t). The effective rainfall P_e is calculated as follow:

Soil capacity : Capacity of upper tank (mm) or the storage available for evapotranspiration

$$P_e = \begin{cases} P - PET & \text{if } P > PET \\ P - PET & \text{if } P < PET \end{cases}$$

Transfer in the intermediate tank – “Transfer” function

Reservoir H represents the unsaturated zone. It is supplied by the effective precipitation “ALIMH” that is coming from the soil tank. The water height at all times in the reservoir H is called H, the reservoirs is drained by two outlets, QH (runoff) and Percolation (recharge).

- Percolation (recharge) “ALIMG” in the underground reservoir G1 according to a linear law (exponential draining) of time constant “THG”:

$$ALIMG = H \cdot dt / THG \quad (dt = \text{duration of the time step})$$

- Flow outside the basin, as a fast component “QH” of the flow, according to a non-linear law controlled by the “RUIPER” parameter. This parameter “RUIPER” is the water level in the tank H for which both the percolation “ALIMG” and the flow “QH” are equal:

$$QH = H \cdot dt / (THG \cdot RUIPER / H)$$

« RUIPER » (mm) = Runof_Perco
Distribution runoff/seepage level, level in reservoir H for which there is an equal distribution between runoff and percolation

« THG » = T1/2_Perco
Time of 1/2 percolation (month), half-seepage time to the aquifer, time of half-filling of reservoir H

Transfer to the underground reservoir G1

- The G1 underground reservoir produces a **slow flow** component. It may represent the aquifer dynamics. The water height in the reservoir at all time is called G1

- G1 is filled by water that seeps from the intermediate tank H.
- G1 is drained by two outlets:
 - Basin outlet – tank H contributes a slow flow QG1, emptying of G1 follows an exponential law with time constant **TG1**: $QG1 = G1 \cdot dt / TG1$
 - Lower outlet – to a very slow flow reservoir G2, G2 follows an exponential law with time constant **TG12**: $ALIMG2 = G1 \cdot dt / TG12$

« TG1 » = $T1/2_Reces1$
Time of 1/2 dry up from G1 reservoir to the outlet
Half-recession time G1

« TG12 » = $T1/2_Perco2$
Time of 1/2 drawdown from tank G1 to G2
Half-transfer time G1 -> G2

External underground exchanges

- In watersheds with a significant underground component, it is common for underground flow to be left outside the watershed:
 - It is possible that a groundwater component part may not appear in the flow measured at the outlet (lateral propagation or "under" the gauging section => loss of flow (negative groundwater exchange).
 - On the other hand, it can happen that an additional groundwater flow comes from a neighboring watershed => increase flow (positive groundwater exchange).
- This underground exchange is modeled by an **external underground exchange coefficient**:

Simple outlet case with G1:
 $Q_Echang_Souterr = Fact_Echang \cdot QG1_Avant_Echang$
 $Q_Echang_Souterr = QG1 \cdot Fact_Echang / (1 + Fact_Echang)$

Simple outlet case with G2:
 the perennial groundwater component is the QG2 flow:
 $Q_Echang_Souterr = QG2 \cdot Fact_Echang / (1 + Fact_Echang)$

« Fact_Echang » = Exchan_Fact
External groundwater exchange factor (%)

Transfer to a very slow reservoir G2

- This is an optional flow component which may be linked to a **deep aquifer or a lower part of the aquifer**. The water height in G2 at all time is called G2
- It is supplied with water by the underground reservoir G1; it is drained by a very low flow (or "slow groundwater flow") QG2

$QG2 = G2 \cdot dt / TG2$

« TG2 » = $T1/2_Reces2$
Time of 1/2 reservoir dryout G2
Half-recession time G2

- It is possible, if desired, to determine that this very low flow QG2 infiltrates deeper horizons which are not controlled by the flow measurements at the outlet. In other words : QG2 may be routed off the watershed

Groundwater level calculation (1/2)

« SG » Storage_Coef = Aquifer Storage Coefficient (%)

« NB » Base_Level = Local aquifer Base Level (m)

SG – Piezometric level (GW level)
 G – Water level in the underground reservoir
 SG – Global aquifer storage coefficient
 NB – Local aquifer Base Level

Groundwater level = tank GW level / storage coefficient + base GW level

Transfer to an underground reservoir with 2 outlets

- This kind of reservoir simulates, for example, the **activation of a second outlet when the water level exceeds a threshold**.
- It can also simulate an **overflow level** or represent an **overflow curve descending more rapidly at the beginning** when both outlets are flowing simultaneously, than at the end when only the deepest outlet is active. The water height in the reservoir at all time is called G.

« SEUIL » = $G1_Thresh$
Threshold recession GW1 (mm)

- It produces one or two flow components through which it drains:
 - $QG2 = G \cdot dt / TG2$
 - and $QG1 = (G - SEUIL) \cdot dt / TG1$ if G is above **SEUIL (mm)**
 - $QG1 = 0$ if G is less than or equal to **SEUIL (mm)**
- As for reservoir G2, it is possible to specify (if desired) that the QG2 flow corresponds to a deep flow that is not controlled by the flow measurements at the outlet.

Groundwater level calculation (2/2)

- SG = calibration parameter => value not necessarily representative
- Unconfined aquifer: more reliable if the piezometer is far from the outlet (where amplitudes of groundwater levels are the greatest)
- Confined aquifer: if close to the unconfined aquifer

Location of the piezometer in a unconfined aquifer **FREE** water table

Location of the piezometer in a confined aquifer **CAPTIVE** water table

Summary of the calibration parameters

Parameter	Unit	Definition	Reservoir Tank	Conditions of use	Model structure (X = yes, O = no)
Soil_capaci		Capacity of upper tank or the storage available for evapotranspiration		If the "useful reservoir" option is selected	1 tank / 2 tanks / 3
ProgSoil_Cap	mm	Maximum capacity of the progressive soil tank	Superficial O	If "progressive floor tank" option selected	Not used
Runof_Perco		Level in reservoir H1 at which there is an equal distribution between runoff and percolation	Intermediate H		
T1/2_Perco	month	Time of half filling of reservoir H1 (H1 percolation time)			
T1/2_Reces1	month	Half recession time G1	Underground G1 or G2 with 2 outlets		
T1/2_Reces2	month	Time of 5/8 drawdown from tank G1 to G2 (half-recession time G1 + G2)	Underground G1	If G2 is selected	
G1_Thresh		Separation threshold between the two outlets	Underground G1 with 2 outlets		
T1/2_Reces2	month	Half-recession time G2	Underground G2 or G with 2 outlets		
Exchan_Fact		External groundwater exchange factor	Underground G1 or G2 with 2 outlets	Optional	Exchange option
Storag_Coef		Applier storage coefficient	Underground G1 or G2 or G with 2 outlets	If calibration on GW level	Rain-Phase-River flow mode
Base_Level	m	Local aquifer base level	Underground G1 or G2 or G with 2 outlets	If calibration on GW level	Rain-Phase-River flow mode

Charlier, 2017

Parameters calibration principle

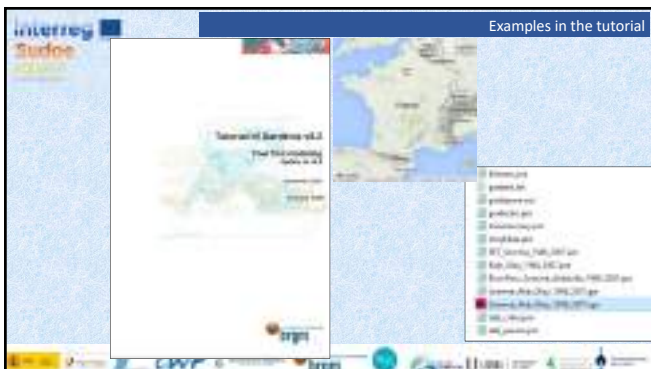
- The model is calibrated using a **semi-automatic method** => the user provides a set of initial values, indicates the parameters which will be optimized and the upper and lower bounds of the parameter's value.
- A **non-linear optimization algorithm** adapted from **Rosenbrock's method** (1960) is used to provide a set of parameters allowing computations as close as possible to the set of observations
- The user judges the need to try a new optimization from a set of parameters that he is free to modify as he wishes:
 - Quality of the simulation (visual appreciation + numerical adjustment criteria)
 - Examination of the optimized parameters
 - Control of the given hydrological balance
- Sensitivity analysis**: allow exploring different parameters values in a given range around the optimized value. This allow to determine the range of parameters representing the water cycle

Other possible calibration parameters

- Correction factor of the catchment area** (without unit) Corr_Area
- Rainfall correction coefficient (%)** Rain_Corr
- PET correction coefficient (%)** PET_Corr
- River flow reaction time (delay)** = catchment concentration time (time for QH and QG to reach the outlet) React_Time
- Optional overflow threshold in the intermediate tank H
 - Threshold for runoff by overflow : in mm,
 - Duration of Half runoff by overflow : in number of **time steps**,
 - Maximal value of the runoff half duration : in monthsOverfl_Thresh
T1/2_Overfl
Mx_T1/2_Roff
- Qext**
 - Inputs (Exter_Flow > 0: gain), exports (Exter_Flow < 0: loss) Exter_Flow
 - Qcalc = QH + QG1 + QG2 + constant (Qext)
 - Q calculated in mm per time step is transformed into flow in m3/s (multiply by the watershed area and divide by the time step duration)

Model calibration principle

- Pay attention to the available **length of the time series** (and contrasting hydrological situations) and to the **model initialization** (start-up years)
- Parcimony** : calibration should be based on the lowest number of parameters
 - "It may happen that several sets of parameters produce quasi-equivalent simulations (non-uniqueness of the calibration). This risk of parameter compensation is reduced when only a small number of parameters are optimized"



Numerical adjustment criteria

- GARDENIA calibrates the model to maximize the **Nash criteria** (Nash and Sutcliffe, 1970) for river flows and GW levels
- Ability to minimize **bias on river flows** (not on GW levels: annual baseline adjustment for bias)

$$NASH = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (X_{sim}(t) - X_{obs}(t))^2}{\sum_{t=1}^n (X_{sim}(t) - \bar{X}_{obs})^2}$$

Ratio between the mean square deviation between observation and simulation and the variance of observations

$$BIAS = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (X_{sim}(t) - \bar{X}_{obs}(t))$$

Difference between mean river flow simulation and mean river flow observations

- The user can **choose to give more weight to low or high discharge values**

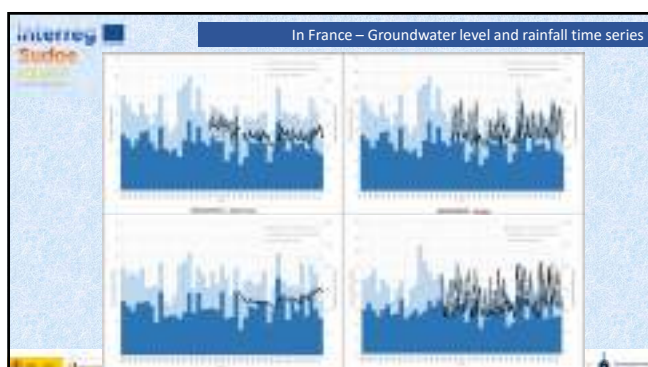
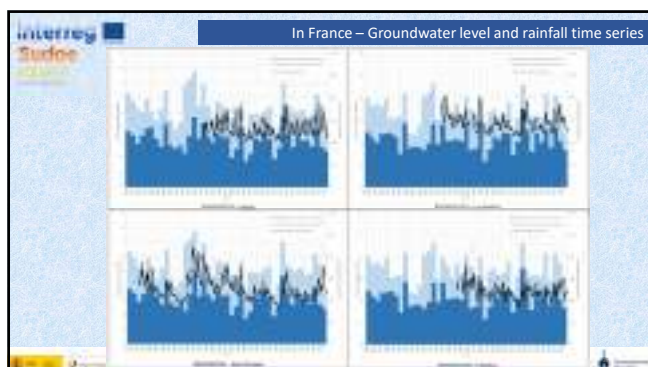
Interpretations and over-interpretation

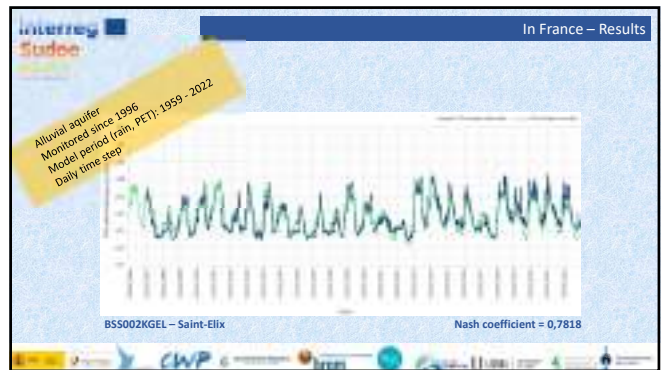
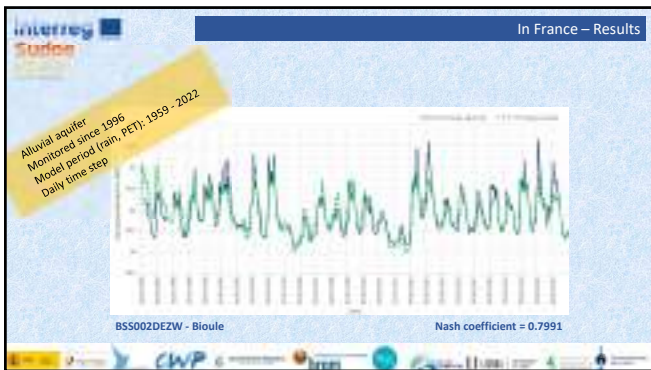
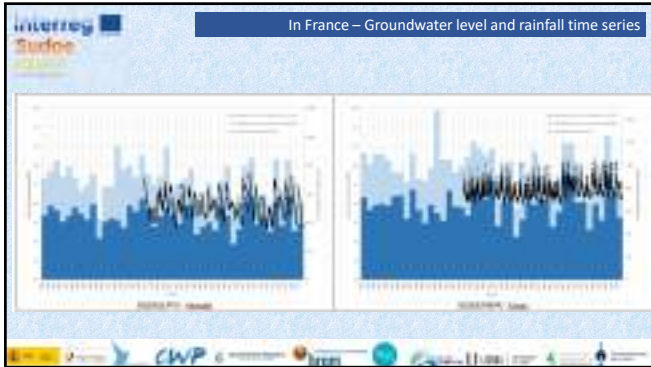
- **BUDGET :**
 - **Partition between slow and fast flow** should be considered with care (not necessarily a unique decomposition: for the same quality of flow reproduction, very different decomposition)
The risk is lower if rainfall-river flow-GW level calibration is used
- "We can say that slow flow is... slower than fast flow, but it is not obvious that it is really groundwater flow"
- "In the case of calibration only based upon a series of groundwater level observations, the balance should be interpreted as a flow analysis with extreme caution. Although this is a somewhat dangerous method of recharge analysis, it is often the only one available and should not be rejected."

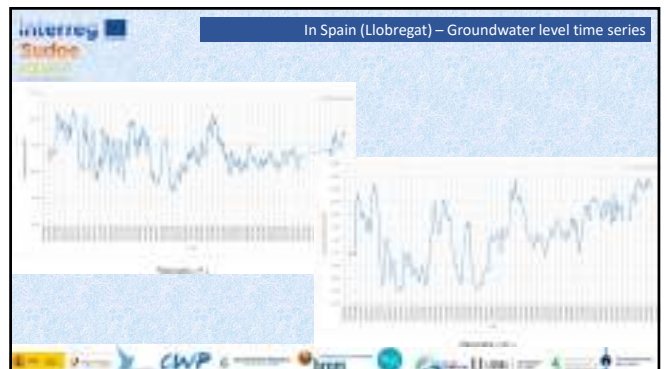
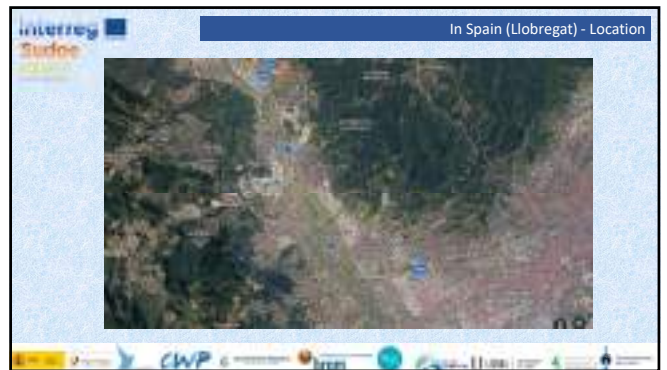
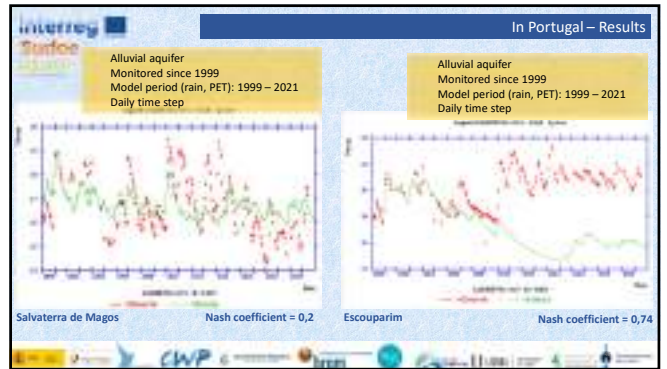


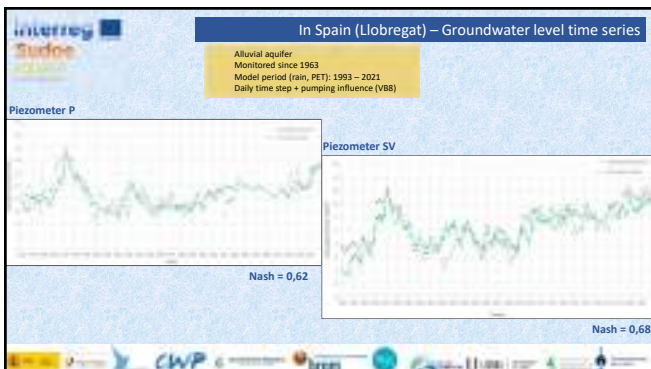
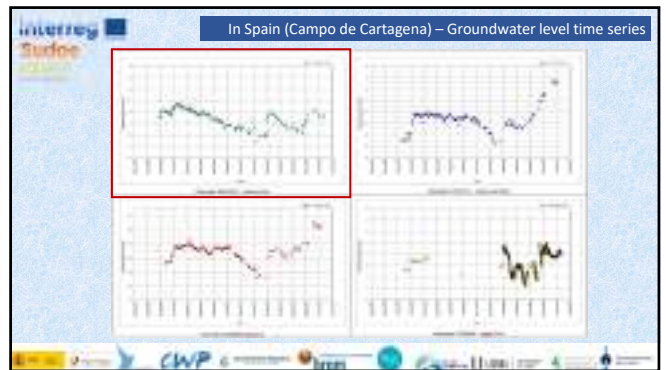
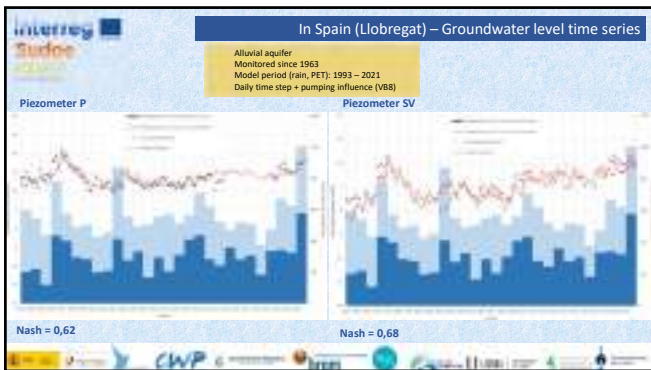
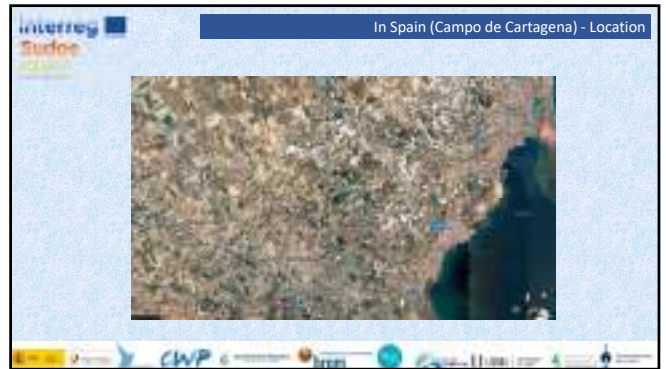
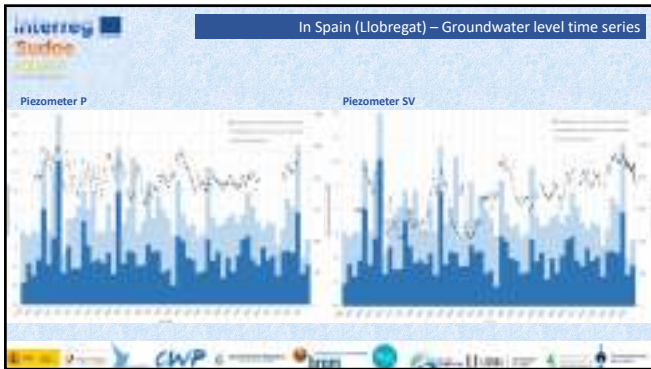
Application

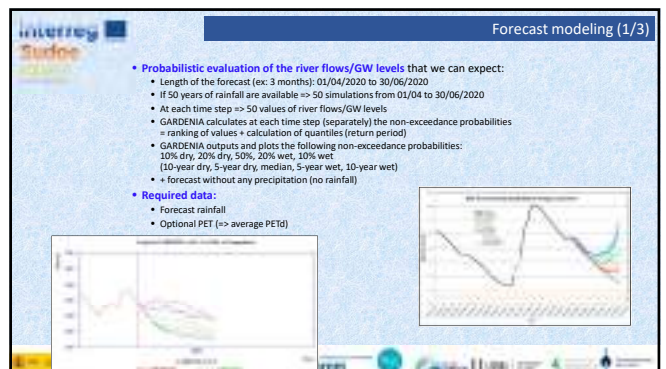
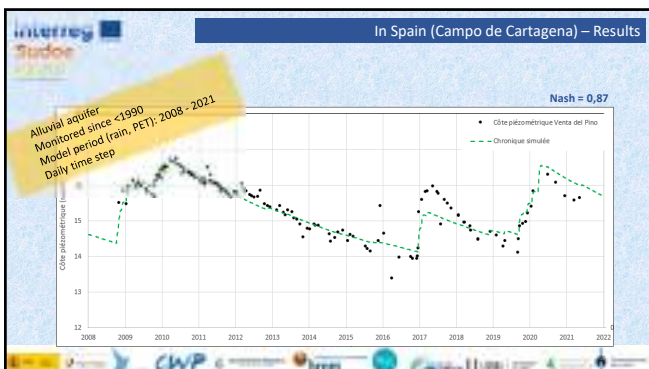
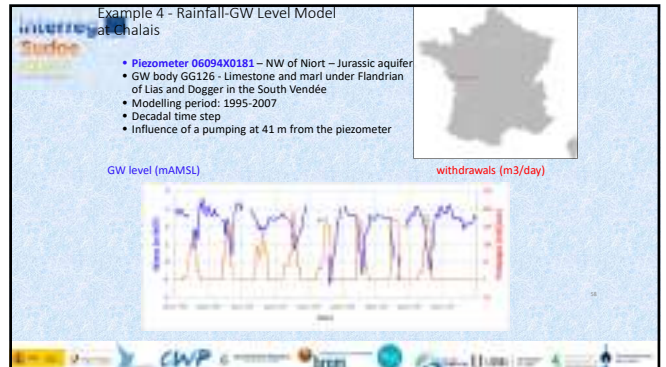
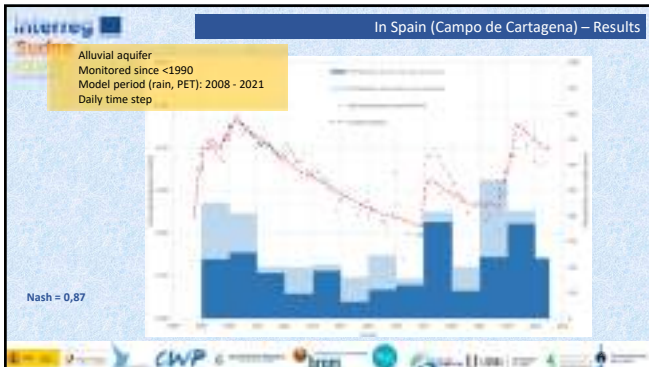
- 6 wells located in the Adour-Garonne basin (France),
- 2 wells located in the Llobregat (Spain),
- 1 well located in Campo de Cartagena (Spain),
- 2 wells located in Ribatejo (Portugal)





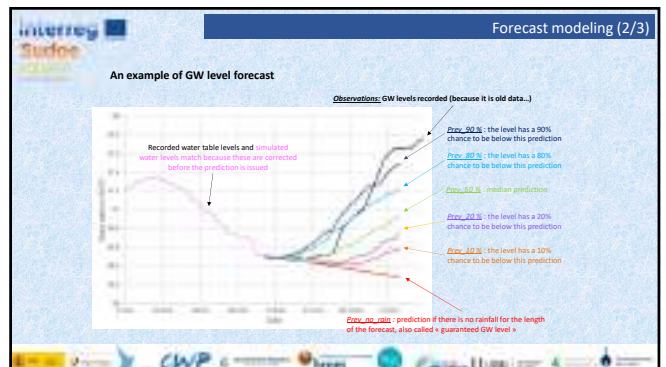






Groundwater withdrawals - Pumping

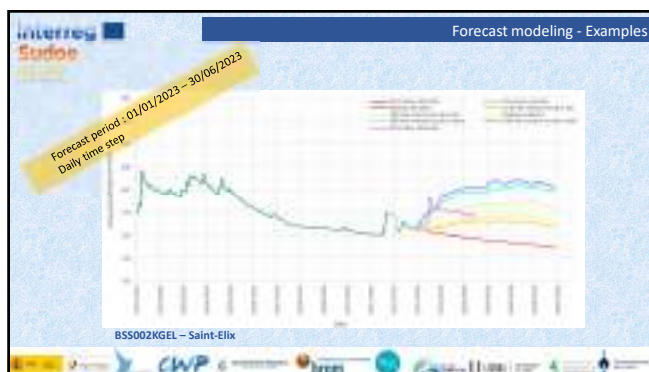
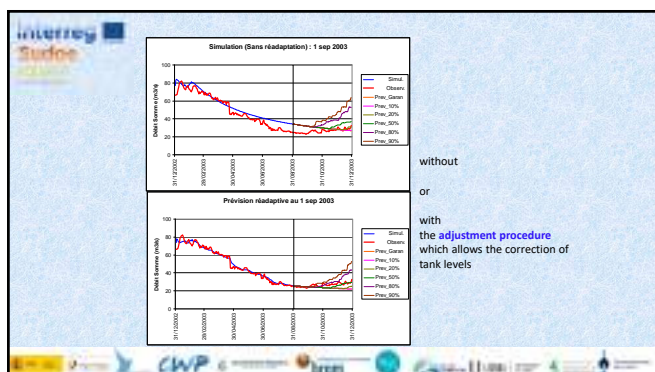
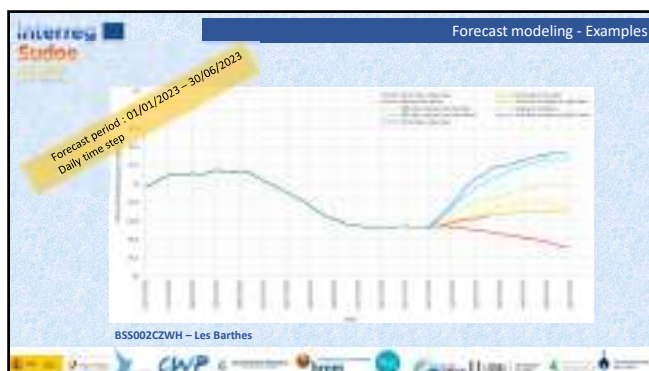
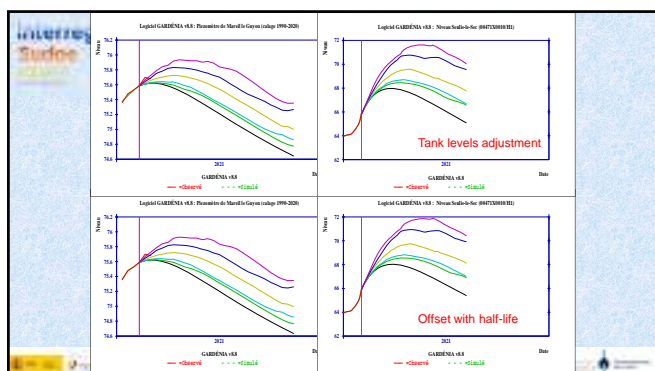
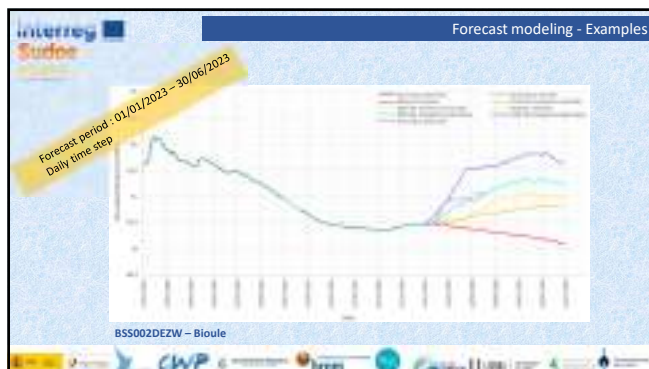
- 1 time series of pumping rate with the same time step as the rainfall time series
- 3 options: influence of pumping on river flows and/or on groundwater levels => add 3 parameters to be optimized.
 - The **pumping coefficient of influence** on aquifer level (river flow), which characterizes the amplitude of the influence of the pumping (depending on the measurement unit and the sign of the pumping series: +/-)
 - ⇒ ex: $m/(m^3/day)$ ou $(m^3/sec)/(m^3/day)$
 - ⇒ ex: coefficient = 0.001, then if pumping rate increases by 1000 m3/day, the GW level once stabilized will be 1 meter lower.
 - The **half response time** of the GW level (flow) to pumping (in month), according to an exponential law
 - The **half stabilization time of the pumping influence** on the GW level (in month), according to an exponential law
- Direct river pumping: the injection/pumping values multiplied by the influence coefficient (set by the user). Pay attention to the measurement units.

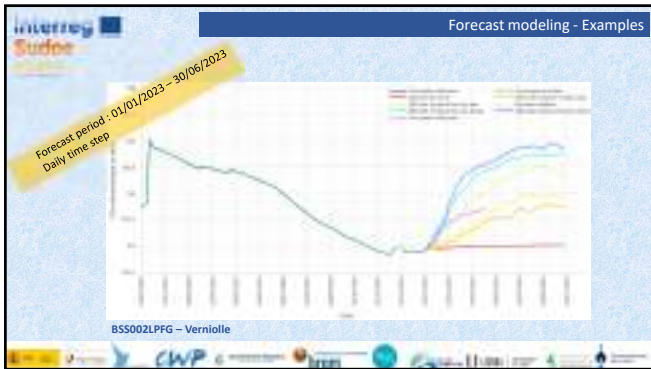


Forecast modeling (3/3)


- Two methods for correcting deviations at the date of issue (first day at the beginning of the forecast)
 - By optimal adjustment of the model's tank levels (robustest method)
 - Simulation deviations reduced by an adaptive procedure which allows the correction of tank levels
 - correction of levels proportional to the standard deviation of the supplies to each reservoir
 - a preparation phase where the model calculates the standard deviations of the supplies and the optimal correction rate (precision thus depends on the length of the forecast)
 - By offsetting the initial deviation at the beginning of the forecast, then exponentially decreasing this deviation according to a "half-life time of the initial simulation deviation" (method implemented in EROS)


Forecast method:
(Tank levels adjustment / Offset with half-life)





- ### Data series
- No reading of dates => data must be continuous
 - First and last data do not have to be complete
 - River flow gaps: code "-2"
 - GW level gaps: code "9999"
 - No gaps possible for: Rain, PET, Temperature
 - All series over the same period

- ### Time steps
- Time series data should be sampled at a uniform time step, known as "standard" in the following cases:
 - The day
 - 5-day time step (73 time steps per year)
 - 7-day time step (52 time steps per year)
 - The decade: 365 days / 36 (i.e. about 10 days)
 - The month: 365 days / 12 = 3 decades
 - It is also possible to use a "non-standard" time step of the user's choice: for example 5 minutes, ½ hour or 2 days...
 - Each variable can have a different time step, but rainfall must be selected at the finest time step (e.g. daily rainfall, monthly PET and decadal river flow)
 - The calculation time step will be the finest time step, i.e. the rainfall time step
 - To facilitate the initialization of the model: we need to have meteorological data available before the beginning of the observations (river flows and/or GW levels)
- 

- ### To find out more...
- Possibility of processing several independent watersheds successively in the same project (can also be done via EROS)
 - GARDENIA: for lumped hydrological modelling of a catchment basin
 - <https://www.brgm.fr/en/software/gardenia-lumped-hydrological-modelling-catchment-basin>
 - EROS: a semi-global hydrological modelling application for a catchment area divided into sub-basins
 - <https://www.brgm.fr/en/software/eros-semi-global-hydrological-modelling-application-catchment-area-divided-sub-basins>
 - Example : 9 sub-basins with 5 rivers whose flow is measured
- 

- ### Measurements units
- Rainfall, PET, snow: in mm/step
 - Air temperature: °C
 - Flows: m3/s
 - GW levels: m (in "mNGF" in France or mAMSL in general, usually mAMSL but any other acceptable benchmark)

Thank you for your attention

Further information:
 Sandra BERANGER
 Hydrogeologist, Project manager
s.beranger@brgm.fr
 +33-5-62-24-14-53
www.brgm.fr

Technical workshop
March 29th, 2023
Barcelona, Spain

AQUIFER Project

Technical workshop :
The website : groundwater levels forecasts

Sandra BERANGER, BRGM

AQUIFER project is funded by the Interreg Sudoe program and the European Regional Development Fund (ERDF)

Sectors of interest : drought, floods, irrigation management

Arrestés de limitation de l'usage de l'eau

PROPLU

- What will the water table situation look like next year?
- Should we take water restriction measures?
- Did the recent heavy rainfall events have an impact on the water table?

MétéEAU Nappes

A decision making tool for characterizing, in almost real-time, groundwater quantitative state and forecast groundwater level evolution

<https://www.brgm.fr/en/website/meteeau-nappes>

A collaborative work

- BRGM internal research and development project from 2015 to 2018 (maturation project since 2019)

Nicolas et al., 2020

1700 stations including
-1600 managed by BRGM
-1500 GPRS stations
(*) General Packet Radio Service, data received daily

Objectives

- Well monitoring
- Groundwater level recon.
- Groundwater time serie
- Hydrogeological status report
- Groundwater level forecast

Groundwater state

- Very high level
- High level
- Moderately high level
- Around medium level
- Moderately low level
- Low level
- Very low level

Groundwater trends

- Rising
- Stable
- Decreasing

- Deployment of a communication tool able to cross data from different networks (meteorology, river flow, piezometric) in order to characterize in almost real-time groundwater quantitative state
- Forecast the evolution of groundwater levels by improving the data of the piezometric network, and provide public access to almost real-time data (maps and graphs)
- Value technical and scientific know-how and expertise, from data access to information creation
- Offer services with high added value, resulting from modelling work
- Contribute, participate, support to better water resource management in the territories

The tool is based on teletransmitted water level data

Saint-Porquier (09306X0091F) | Piezometer in the alluvial aquifer

Water level online database

Indicateur Piézométrique Standardisé | Standardised Piezometric Level Index (SPL)

A symbol describes the groundwater situation compared to statistical data

A regional involvement

- ~50 lumped hydrological models identified (rain-piezometry-river flow) Gardenia and Tempo © BRGM
- 10 case studies (watersheds) selected from 7 French regions

- drought
- climate change
- flood

10 case studies - Modeling results

watersheds (area) / models / withdrawals / correlation coefficient :

Région	Bassin versant	Station hydrologique	Piezomètre	Type modèle	Périodes	Période d'étalonnage	Période de validation	Coeff. corrélation étal.	Coeff. corrélation valid.	Coeff. corrélation global
CHA	Sevère	Pouébois-Trois 143 km²	Vally	P-NP-Q	OU (dés)	1972-2018	1994-2017	0.94	0.94	0.94
HNO	Arne	Meud 402 km²	Mouville	P-NP-Q	OU (dés)	1990-2018	1995-2017	0.88	0.82	0.83
BRE	Loire	Yverdon 26.5 km²	Neuvenon	P-NP-Q	NON	1980-2018	2001-2017	0.83	0.88	0.82
PC	Seine	Neuport-Orléans 425 km²	Castillon-Flemecroix	P-NP	OU (niveau)	1970-2018	1978-2017	0.81	0.86	-
PC	Seine	Allevard 504 km²	Saïte-la-Sac	P-NP-Q	NON	1980-2018	1992-2017	0.83	0.88	0.88
BOU	Isère	Champsaur 120 km²	Sourbaram	P-NP-Q	NON	1980-2018	1995-2017	0.89	0.82	0.89
DF	-	-	Perdrevalle	P-NP	NON	1961-2018	1980-2017	-	0.97	-
DF	-	-	Thiébaudourt	P-NP	NON	1961-2018	1999-2017	-	0.96	-
DF	-	-	Mareil-Le-Guyon	P-NP	NON	1961-2018	1987-2017	-	0.96	-
DF	-	-	Combray	P-NP	NON	1961-2018	1980-2017	-	0.98	-

About the 10 case studies

- 10 piezometers from 7 French regions
- 9 French groundwater bodies
- 4 types of rock: chalk, limestone, granite, gneiss

Région	Dép.	N° des piezomètres	Commune piezomètre	P. des nappes	Int. des nappes	MESO associée	Objectifs de l'étude
CHA	18	02925028P	Vally	oui	oui	Craine de Champagne sud et centre	volumes prélevables
HNO	27	018050036	Mouville	oui	oui	Craine alluviale du Neubourg / Ron / Plaine de Seine anisée	modélisation craine du BV de Seine
BRE	22	021240058P	Neuvenon	non	non	BV Seine (socio-pédologique)	hydrologie/STEP
PC	45	09807201043	Castillon-Flemecroix	oui	oui	Craine pluviale	sécheresses (prévisions étalés)
PC	45	064710005P/22012	Saïte-la-Sac	oui	oui	Craine de la vallée de la Somme	com
BOU	21	043880002/3090	Sourbaram	non	non	Calcaires jurassiques du sud et des Côtes et arénosédiments du Haut-pygné	changements climatiques
DF	18	03144004043	Perdrevalle	oui	oui	Craine et forêts de Marais à l'Empress	sécheresses (prévisions étalés)
DF	18	012200000/27008	Thiébaudourt	oui	oui	Sables et Craie du Val de France	sécheresses (prévisions étalés)
DF	18	018250091P1	Mareil-Le-Guyon	oui	oui	Craine et Tertiaire du Marais à l'Empress	sécheresses (prévisions étalés)
DF	18	015160004/S1	Combray	oui	oui	Sables crainés de la région	changements climatiques

- abstracted volumes
- grid model
- drought and drinking water
- drought (dry forecast)
- flood
- climate change
- drought (dry forecast)
- drought (dry forecast)
- groundwater/river relationship

Need to recovery and update a lumped hydrological model

Expected graphs

Different hydrogeological contexts

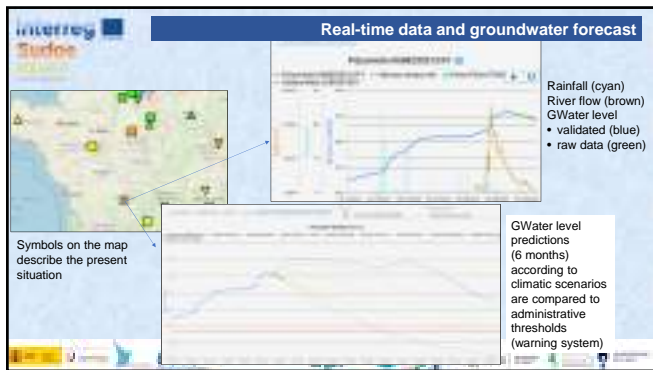
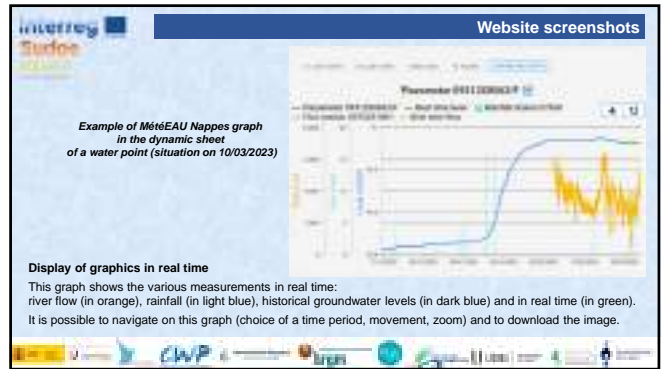
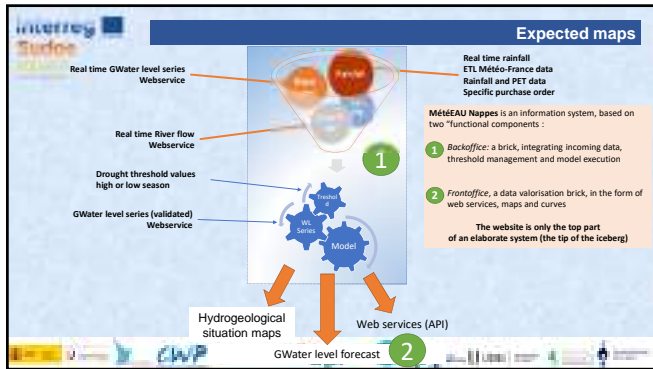
CHA 02982X0028/F Craine Marneuse Et Marnes Du Turonien Inférieur	BOU 04398X0002/SONDAG Calcaires Jurassiques
HNO 01805X0036 Craine Du Séno-Turonien Du Bassin Parisien	IDF 01825X0091/P1 Calcaires Et Sables Du Lutétien
01516X0004/S1 Craine Du Séno-Turonien Du Bassin Parisien	LIM 06882X00213/F1 Socle Métamorphique


Expected maps

The national hydrological situation report

=> monthly evolution of groundwater resources made by BRGM for the French Ministry of Environment and Ecology

Forecast in 3 months ?

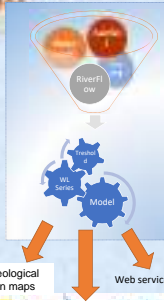


- a tool with a lot of functionalities and services to have the groundwater situation at the current date and in the future (for public - industry)
- availability of the latest rainfall/groundwater/surface water data
- decision support tool for water management on territories (integration of restriction thresholds, assistance in managing water use conflicts)
- easy to use and understandable web interface (maps and real-time graphs, dynamic sheets)
- an online executable BRGM software with possible monthly updates of forecasts

➔ **an open website**
a public/private Application Programming Interface (API)

<https://meteeunappes.brgm.fr/>

To summarize

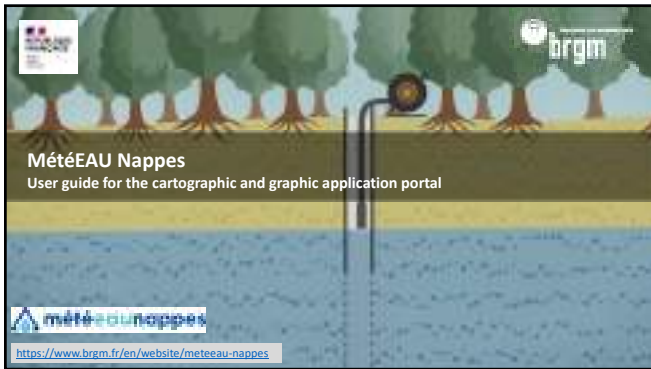
meteeunappes

- a useful communication tool able to cross reference data from various water cycles in almost real-time (maps and graphs)
- a real need to open data climate services (rainfall, PET)
- a tool able to show impacts of climate scenarios on groundwater resource at local scale
- a real time decision-making tool for the regulator (national water management entities)
- a response to the French stakeholders' needs
 - Decentralized services of Ministries
 - Forecast Floods Services
 - Water agencies
 - Regions, Departments, Municipalities
 - Press and Media
 - Farmers
 - Water distribution
 - Industry

Hydrogeological situation maps

Web services (API)

GWater level forecast



Website access rights

	general public	expert	contributor	administrator
forecast standardized piezometric indicator	✓	✓	✓	✓
forecasting 15 days	✓ ¹	✓ ¹	✓ ¹	✓
complete forecasts	X	✓ ²	✓ ²	✓
sensor management	X	X	✓ ³	✓
thresholds management	X	X	✓ ³	✓
performing a new forecast with a model	X	X	✓ ²	✓
model creation	X	X	X	✓

1 - Limited to public models
2 - Limited to a model selection associated with the user group
3 - Limited to a sensor selection associated with the user group

Access to the website

The Uniform Resource Locator (URL) is:
<https://meteeunappes.brgm.fr>

This home site allows to:

- introduce the tool
- consult the bibliographic references
- application access:
<https://app.meteeunappes.brgm.fr/>
- discover the news
- send an email with the contact form

Website cartographic part

Annotations include:

- search for a piezometer by its BSS code* or a locality
- bilingual version (French-English)
- clickable points with models
- display or not the real-time stations
- situation refreshed every day
- to save map zoom
- piezometers symbology and color according to the standardised piezometric level index of the day
- scale bar

Access to the website (users)

To access the application, each user must create an account with email and password.

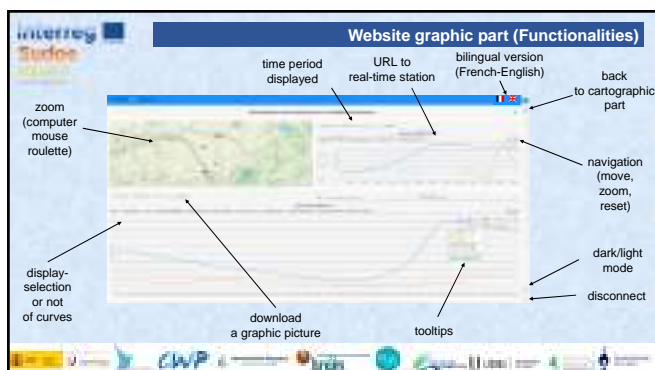
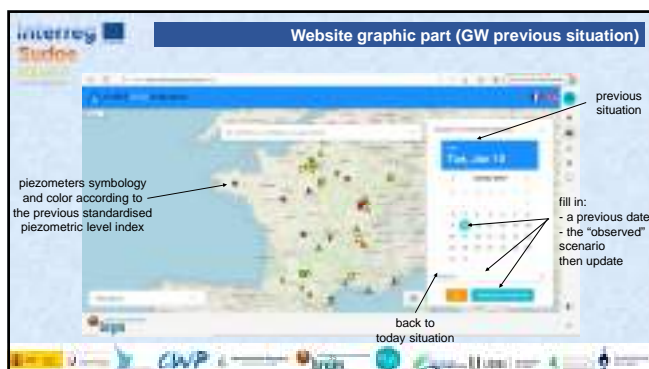
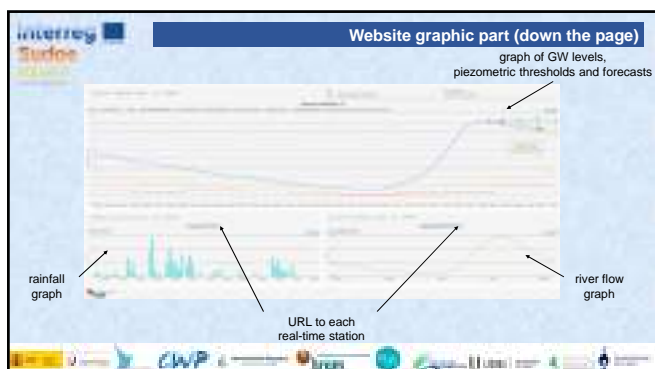
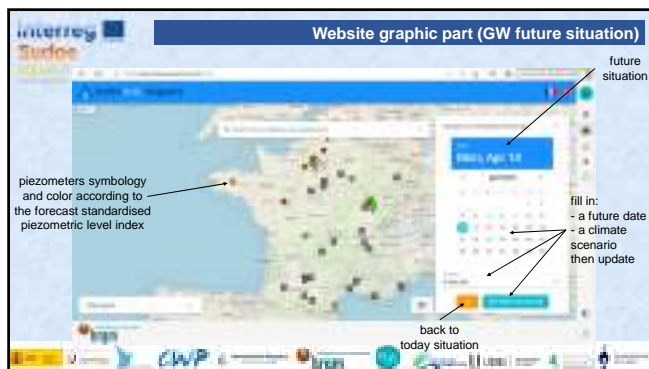
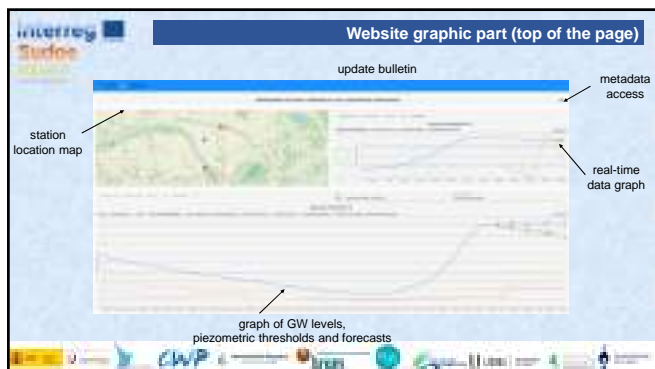
Depending on the user, different rights will be assigned:

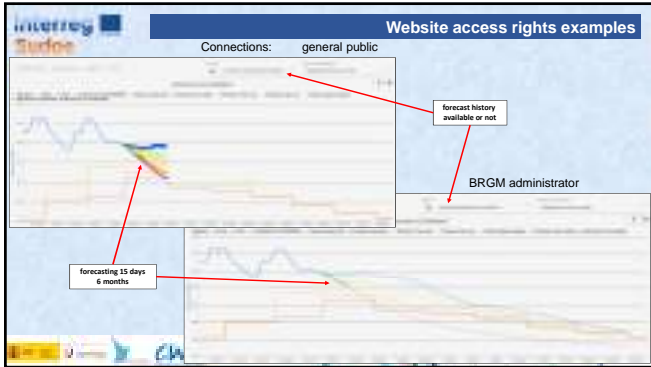
- general public
- expert
- contributor

Website cartographic part (GW current situation)

Annotations include:

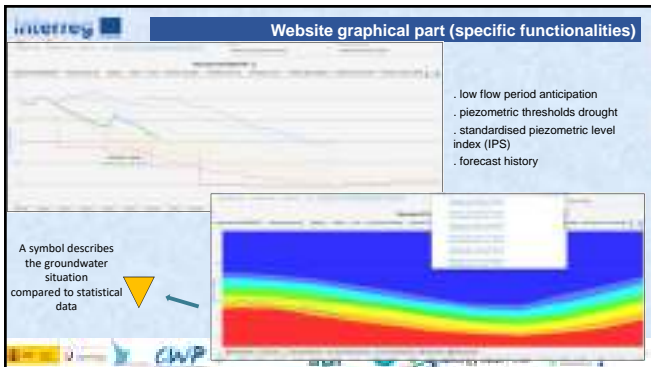
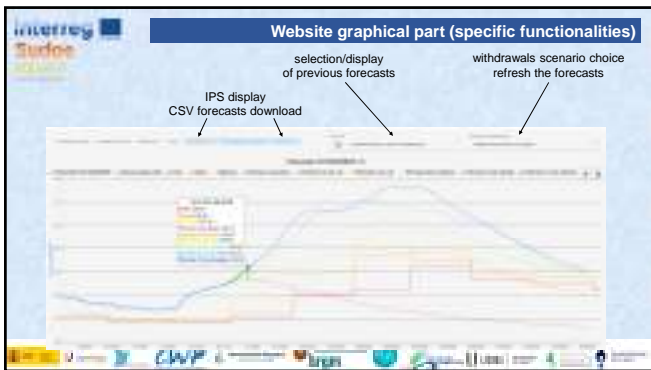
- after clicking on a piezometer, display of an information window and access to its sheet
- graphic part access





Thank you for your attention

Further information:
 BERANGER Sandra
 Hydrogeologist, Project Manager
s.beranger@brgm.fr
 +33-5-62-24-14-53
www.brgm.fr



interreg Sudoe

Technical workshop
March 29th, 2023
Barcelona, Spain

AQUIFER Project

Technical workshop :
The  website : groundwater withdrawal forecasts

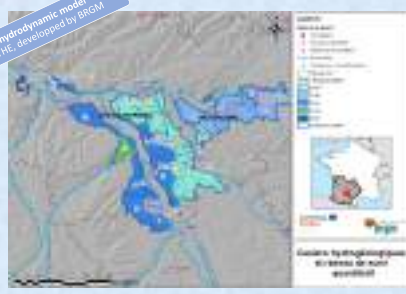

Sandra BERANGER, BRGM

AQUIFER project is funded by the Interreg Sudoe program and the European Regional Development Fund (ERDF)




interreg Sudoe

3D hydrodynamic model
MARTHE, developed by BRGM

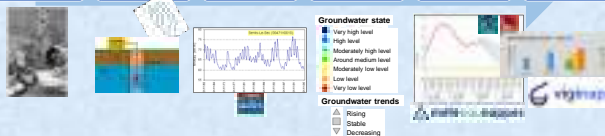
Source : BRGM



interreg Sudoe

Objectives

Well monitoring | Groundwater level record | Groundwater time serie | Hydrogeological status report | Groundwater level forecast | GW withdrawable volume forecast




Groundwater state

- Very high level
- High level
- Moderately high level
- Around medium level
- Moderately low level
- Low level
- Very low level

Groundwater trends

- Rising
- Stable
- Decreasing

- Forecast groundwater withdrawable volumes based on groundwater level forecasts
- Value technical and scientific know-how and expertise, from data access to information creation
- Offer services with high added value, resulting from modelling work
- Contribute, participate, support better water resource management in the territories



interreg Sudoe

Geo-climatic context

Geography:


- East of the Aquitaine basin.
- At the confluence of 3 major rivers: Garonne, Tarn and Aveyron.
- Great alluvial plain surrounded by hills composed of the Lomagne and White Quercy Tertiary molasses and, on its eastern border, by the karstic plateaux of Caylus Causse, which is a part of Quercy Causse.

Climate:


- Mild wet winters and hot, generally dry summers.
- Homogenous rainfall across the region.
- High inter-annual variation : from 420 to 1000 mm/yr.

Average rainfall
700 mm/yr

Area of alluvial plains
1000 km² - 30%
Of the Tarn-et-Garonne department surface



Source : IGN



interreg Sudoe

Decision support tool for groundwater management of the alluvial aquifer in the Tarn-et-Garonne department (82)

Objective : Forecasting groundwater withdrawable volumes based on groundwater levels and current recharge

Groundwater levels forecast

3D hydrodynamic model
MARTHE, developed by BRGM



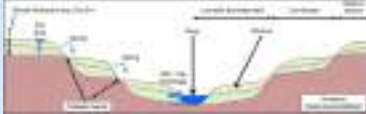

interreg Sudoe

Geologic context


Terrace system:

- An alluvial area with positive hydrogeologic properties...
- ...But a shallow depth (average thickness 5 to 8 m).
- Tiered terraces** system, with, moving away from the watercourse:
 - Age of deposit and alteration of sediment.
 - Fine fraction : + clay, - sand / gravel.
 - Hydrodynamic properties (permeability...).
 - Borehole operating flow rate.


DIAGRAMMATIC CROSS-SECTION OF THE TIERED TERRACE SYSTEM

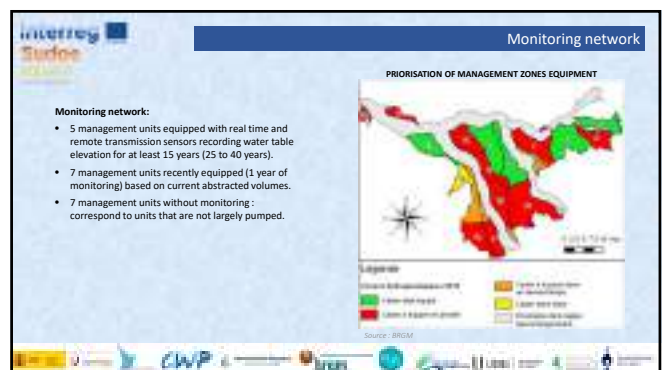
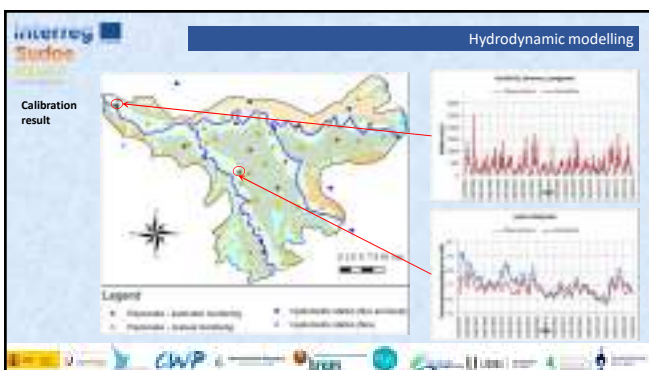
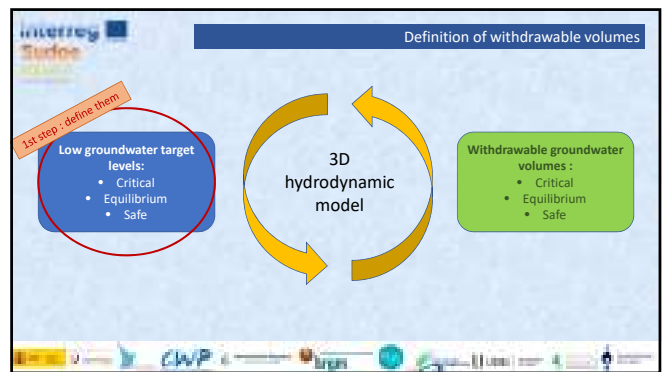
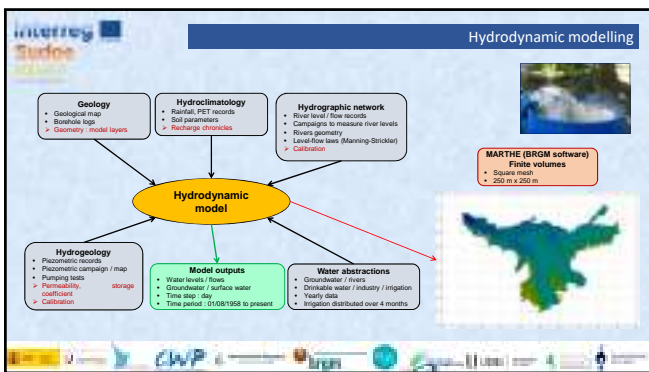
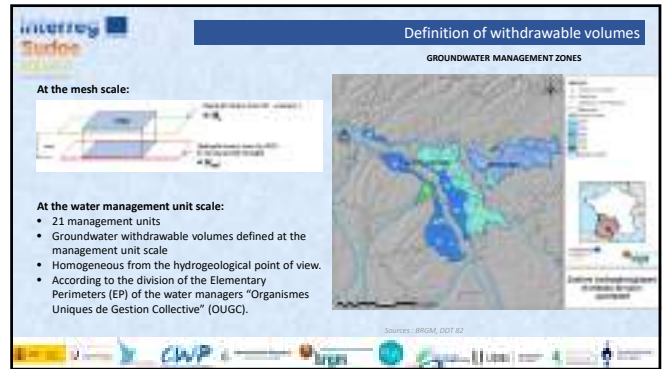
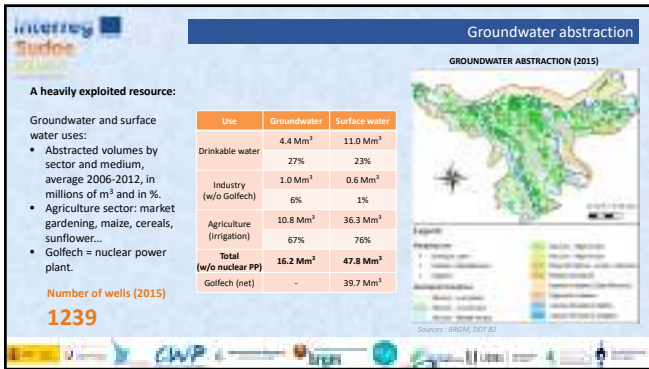


SIMPLIFIED GEOLOGICAL MAP



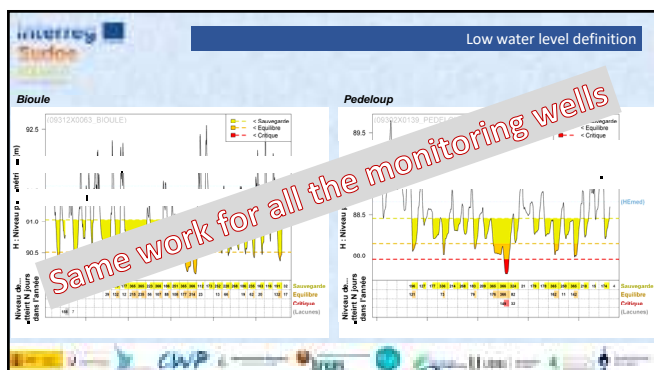
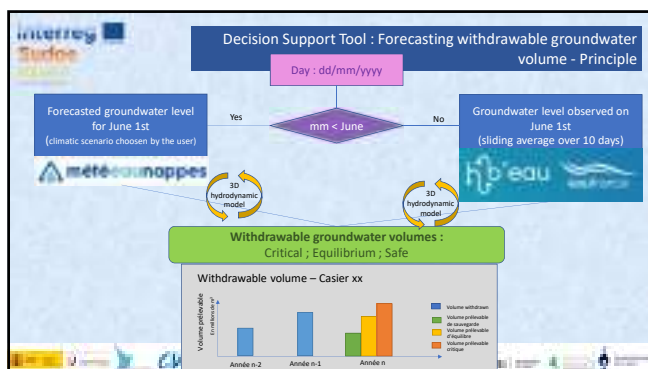
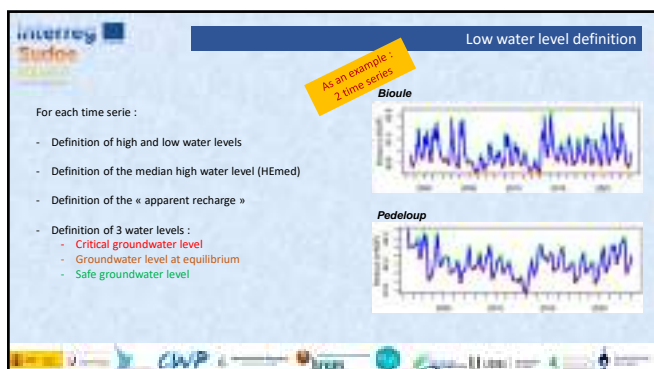
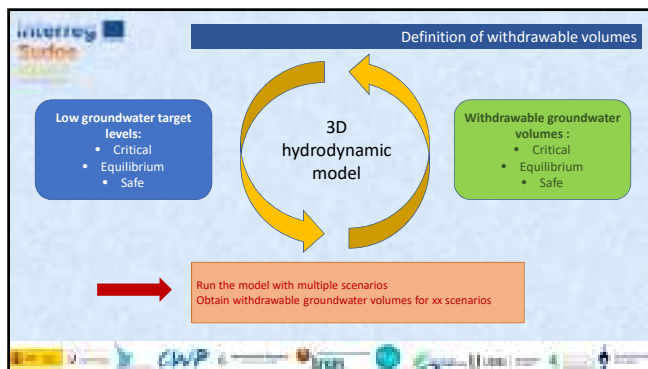
Source : BRGM





Monitoring network

Management Unit	Well number	Well Name	Well reference name	Management Unit	Well number	Well Name	Well reference name
1	BSS002DAWG	Pédeloup	Pédeloup	12			
2	BSS004DFVD	Négrepelisse		13	BSS002CZMA	Pomiès	Pomiès
3	BSS002EGZN	Bezette		14			
4	BSS002DDZV	St-Pierre	St-Pierre	15	BSS004DFVQ	Finhan	
5	BSS002DEZW	Bioule	Bioule	16	BSS002DDXS	Callony	
6	BSS002DETB	Pradas	Pradas	17	BSS004DFVR	Valence_Quercy	
7				18	BSS004DFVP	Savenès	
8				19			
9				20	BSS004DFVG	Donzac	
10	BSS002DCXR	Escatalens	St-Porquier	21			
11	BSS002DACM	Garnouillac					



Decision Support Tool : Forecasting withdrawable groundwater volume

Available soon

www.viginappe2-brgm.fr

Decision Support Tool : Forecasting withdrawable groundwater volume

Standard Piezometric Index (IPS) on the monitoring wells of the Adour-Garonne basin

VIGNappe82, le service en ligne de gestion des volumes prélevables par le BRGM et le projet SUDOE AQUIFER

Fenêtre pop-up

NIVEAU PIEZOMETRIQUE

Zoom 7) 30) 90) 360) HISTO

Niveau d'eau

INFORMATIONS

Code du piézomètre : code BSS
 Nom du piézomètre :
 Entité BD-LISA suivie :
 Gestionnaire du point :
 Valeurs seuils :

Avec : seuils de vigilance, d'alerte, d'alerte renforcée et de crise, à définir sur le piézomètre piézométrique chronologique et disponible dans MétéEAU Nappes

Decision Support Tool : Forecasting withdrawable groundwater volume

Groundwater withdrawable volumes forecast on the Garonne, Tarn and Aveyron alluvial aquifer

VIGNappe82, le service en ligne de gestion des volumes prélevables par le BRGM et le projet SUDOE AQUIFER

Carte zoom / dézoom sur fond de carte

Points indiquant les points de suivi des nappes du BRGM, avec indication colorée rendant compte de l'IPS pour le mois sélectionné – à définir en interne les possibles

Quand on passe sur un casier : en fonction du scénario MétéEAU/ Nappe duquel la chronique du point de suivi est le plus proche (6 scénarios possibles : prévision sans pluie, prévisions 10 ans sec, 5 ans sec, prévision pluie médiane, prévisions 5 ans humide, 10 ans humide), affichage d'une fenêtre pop-up avec histogrammes montrant les 3 volumes prélevables et rappel des années passées : volume prélevable de sauvegarde, volume prélevable d'équilibre et volume prélevable critique.

Rendre les rivières visibles + entités BD-Lisa (niveau apparaissant fonction du niveau de zoom actif

Quand on clique sur « Accéder aux volumes prélevables » Du qu'on se connecte directement depuis le site vigne Renseignement adresse mail + mot de passe obligatoire

Situation au mois de xx année xx

Menu affichant un message si date de consultation = fin d'année : avertissement que la période d'irrigation est en cours d'achèvement. Renouveler la consultation en début d'année pour connaître les estimations de volumes prélevables n+1

Légende présentant les couleurs choisies pour les points de suivi piézométriques

VIGNappe82, le service en ligne de gestion des volumes prélevables par le BRGM et le projet SUDOE AQUIFER

Accéder aux volumes prélevables

Front page

Fenêtre Pop-up

2 onglets :

Niveau piézométrique :
 Chronique piézométrique
 Chronique prévisionnelle
 Chronique du point de la carte

Infos :
 Nom du piézomètre
 Entité BD-LISA
 Gestionnaire du point
 Valeurs seuils

Situation au mois de xx année xx
 Déroulé permettant de passer au mois précédent + suivant

A adapter en fonction de ce qui est dispo dans MétéEAU Nappe

VIGNappe82, le service en ligne de gestion des volumes prélevables par le BRGM et le projet SUDOE AQUIFER

Fenêtre pop-up

VOLUME PRELEVABLE – Casier xx

Graphique

Zoom 2 ans 5 ans 7 ans 10 ans HISTO

Volume prélevable – Prévision xxx (sélection automatique, à choisir parmi : prévision sans pluie, prévisions 10 ans sec, 5 ans sec, prévision médiane, prévisions 5 ans humide ou 10 ans humide)

VOLUME PRELEVABLE – Casier xx

Tableau

Année	Volume prélevable de sauvegarde	Volume prélevable d'équilibre	Volume prélevable critique	Volume prélevé
N	xx	xx	xx	
N-1				xx
N-3				xx
N-10				xx

Si mois > octobre : message spécifiant que la période d'irrigation est en cours d'achèvement. Renouveler la consultation en début d'année pour connaître les volumes prélevables n+1

Avec possibilité de télécharger les informations



BRGM
Bureau de Recherches Géologiques et Minières

Thank you for your attention





















Further information:
BERANGER Sandra
Hydrogeologist, Project Manager
s.beranger@brgm.fr
+33-5-62-24-14-53
www.brgm.fr

Logos at the bottom: BRGM, CWP, and other organizational icons.

ANNEXE 7.

LISTE DES PARTICIPANTS EN ESPAGNE

DAMM TRAINING 29/03/23

NÚM.	ASISTENTES	EMPRESA	FIRMA
1	JOSEP MAS PLA	INSTITUT CATALÀ DE RECERCA DE L'AIGUA (ICRA-CERCA)	
2	JORDI PUJADAS FERRER	HIDROGEOLÒG	
3	ENRIC QUERALT I CREUS	CUADLL	
4	VINYET SOLÀ DE ROA	CUADLL	
5	JORDI MASSANA MOLERA	CUADLL	
6	ALBERT CASAS PONSATÍ	UB	
7	XAVIER CARRERAS IBÁÑEZ	ACA	
8	RUBÉN GARCÍA ARTIGAS	ACA	
9	JOSE LUÍS GARCÍA AROSTEGUI	IGME	
10	VIRGINIA ROBLES	IGME	
11	ALEX TIEWIN ABU	UB	
12	ALBERT FERNÁNDEZ LAGUNAS	UB	
13	ROGER MAS	AMPHOS 21	
14	SERGIO GIL VILLALBA	MAIMA UB	
15	SANDRA BERANGER	BRGM	
16	VIVIAN HAKOUN	BRGM	
17	BELLA ALLMILLATEGUI	UPC	
18	JOAN BOTEY I BASSOLS	IDAEA-CSIC-ULB	
19	ASHKAN HASSANZADEH	IDAEA-CSIC-ULB	
20	FRANCO COSCIA	IDAEA-CSIC-ULB	
21	ENRIC VAZQUEZ	IDAEA-CSIC-ULB	
22	SONIA VALDIVIELSO MIJANGOS	IDAEA-CSIC-ULB	
23	DIEGO SCHMIDLIN	IDAEA-CSIC-ULB	
24	SERGI COMPTE	CWP	
25	Gabriela Córdoba	ICRA	