

Développement d'outils de modélisation basés sur les données météo et pédologiques pour un OAD de praticabilité des sols forestiers

Nicolas Beudez, Nicolas Moitrier, Samuel Buis, André Chanzy, Manon Martin, Nathalie Moitrier, Mostafa Moradzadeh, Cédric Nouguier, Guillaume Pouget, Noémie Pousse, Stéphane Ruy, Emma Schmitt

-

3ème workshop IMAE, Montpellier, 29 septembre 2026

1) Contexte : limiter la surface forestière impactée par la compaction et l'orniérage du sol



Problématique : circulation des engins forestiers

➡ risque de dégradation physique des sols forestiers



Test de débusqueur en forêt de Fénétrange (Moselle) – octobre 2022



Ornières en forêt domaniale de Grand-Pays (Meuse) - mars 2021



Test de circulation d'engins forestiers – 2018

1) Contexte : limiter la surface forestière impactée par la compaction et l'orniérage du sol



contrôle

Circulation intense sur les sols forestiers

→ impacts **importants** et **durables** sur les sols et les arbres :

- augmentation de la densité du sol et de sa résistance à la pénétration, de l'intensité de l'engorgement, de l'érosion, ...
- diminution de la conductivité hydraulique et de la diffusivité des gaz du sol, de l'activité biologique, du développement racinaire (en moyenne -30% de la profondeur des racines, Mariotti et al. 2020), de la croissance des arbres (en moyenne -20% de la biomasse, Mariotti et al. 2020)



avec
circulation



avec circulation

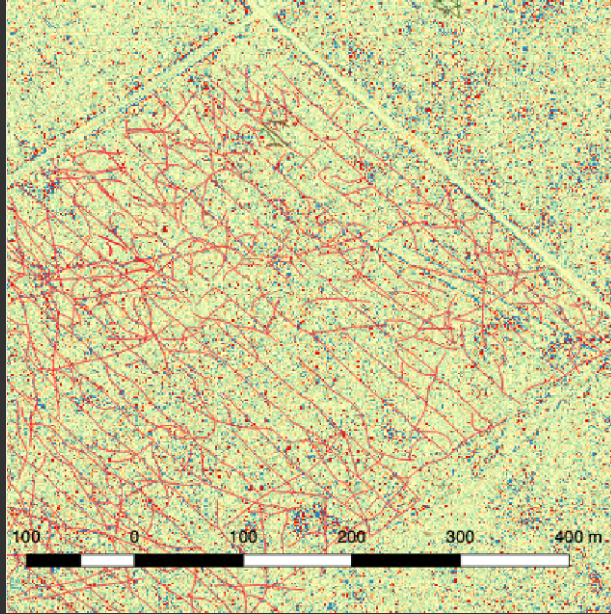
contrôle

Solutions :

- systèmes de débardage par câble, à cheval, ... ;
- concentration de la circulation sur des pistes de débardage permanentes (= **cloisonnements**).

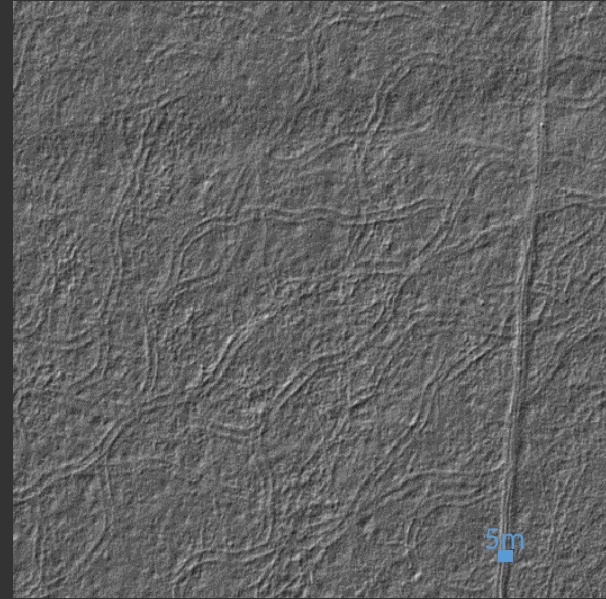
1) Contexte : limiter la surface forestière impactée par la compaction et l'orniérage du sol

Pourcentage circulé avec cloisonnements :
en théorie 20 % (4 m tous les 20 m)



Forêt domaniale de Compiègne,
traitement images LIDAR : Mohieddine, 2019

Pourcentage circulé sans cloisonnements :
34 %, jusqu'à 60 % pour certains chantiers



Forêt domaniale de Chantilly,
traitement images LIDAR : Bock, 2022

➡ maintenir la **praticabilité** à long terme des **voies de circulation** (cloisonnements) en forêt

2) Le projet VSoilForOAD



2.1) Présentation

- Financement : Ademe, pilotage : ONF (Noémie Pousse), partenaires : CNPF-IDF, FCBA et INRAE

- But : tester la faisabilité et la pertinence d'un service climatique de prédiction en temps réel et pour les 14 jours suivants, de l'état hydrique des cloisonnements

➡ améliorer l'organisation des chantiers

➡ prévenir les effets négatifs de la circulation des engins forestiers sur la praticabilité des cloisonnements

- Service climatique envisagé :

données météo observées et prévisionnelles	+	modèle simulant en temps réel le degré de saturation en eau des cloisonnements	+	minimum d'informations à fournir de la part des opérateurs forestiers	=	prévision du risque d'orniérage
--	---	---	---	---	---	---------------------------------------

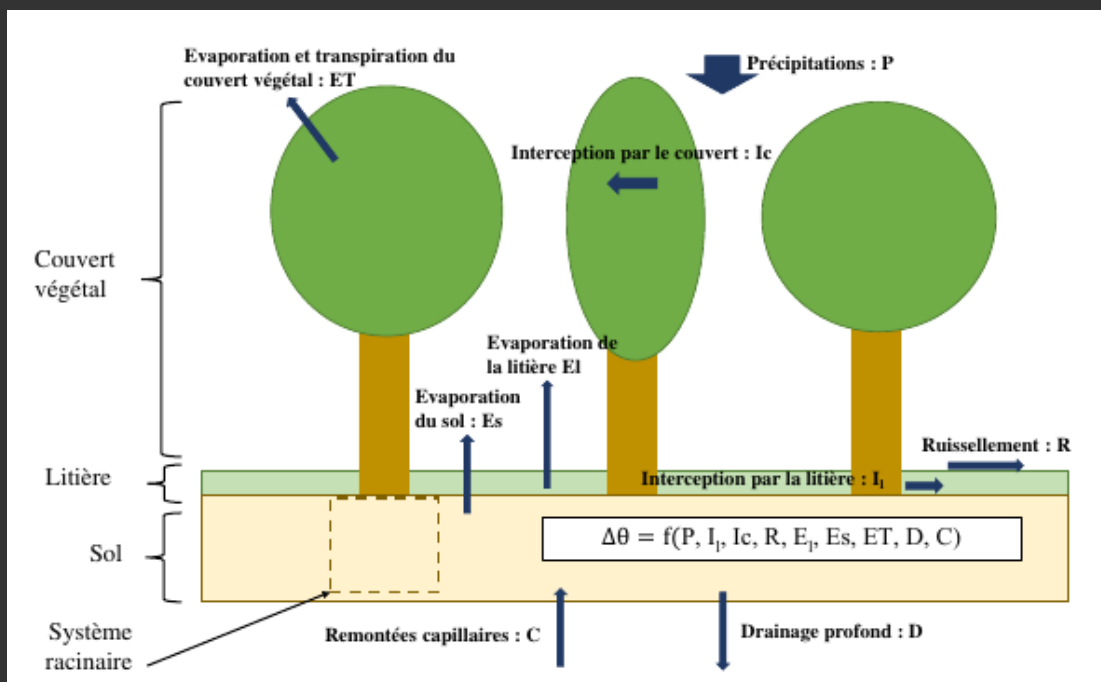
2) Le projet VSoilForOAD



2.2) Développement du modèle

- [Manon Martin](#) (thèse CIFRE, financement FCBA, 10/2016 – 10/2019) :

« Développement d'un modèle de transfert hydrique des sols forestiers partiellement tassés dans un contexte de données parcimonieuses »



Développement dans **VSoil** de **ForestOAD** : modèle **mécaniste** simulant les **transferts d'eau** dans un profil vertical de **sol forestier** non perturbé et tassé :

- répartition des **précipitations** et de l'**évaporation** entre la canopée, la litière et le sol ;
- **transfert d'eau** dans le sol ;
- **prélèvement** d'eau par les **racines** ;
- **ruissellement** et **drainage** à la base du profil de sol.

2) Le projet VSoilForOAD



2.2) Développement du modèle

- [Manon Martin](#) (post-doc EMMAH, Avignon, financement ONF, 01/2020 - 05/2022)

➡ modèle [Rich_Clim_Forest](#) = ForestOAD + nouveaux « modules » :

- propriétés hydriques du sol en fonction de sa classe de texture + fonction de pédotransfert ;
- sources météo (ECMWF, SAFRAN, stations locales) ;
- évapotranspiration de référence ;
- profils de canopée et d'enracinement des arbres ;
- indices de praticabilité du sol.

2) Le projet VSoilForOAD

2.2) Simplification du paramétrage du modèle

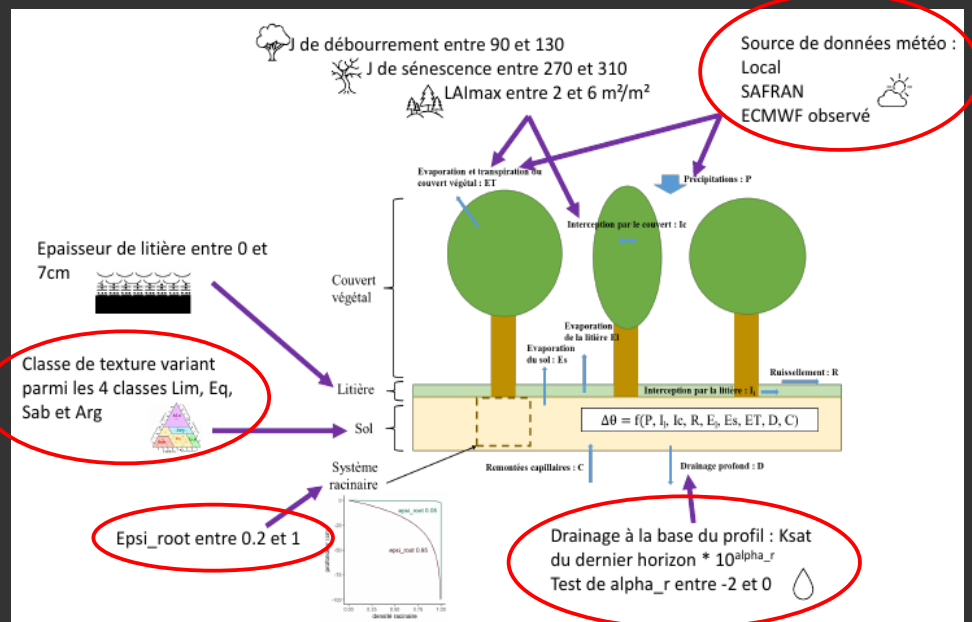
- [Mostafa Moradzadeh](#) (post-doc, EMMAH, Avignon, 04/2022 - 04/2023)

- ➔ modèle [Rich_Clim_Forest](#) : nombreux processus et paramètres
- ➔ identifier les **paramètres les plus importants** à déterminer de manière fiable
- ➔ **analyse de sensibilité** :

- site expérimental de Hesse (Moselle) ;
- variables cibles :
 - indice de saturation moyen par jour
 - nombre de jours praticables
 - pente moyenne de dessèchement

○ = paramètres les plus influents

Outils : IHM de VSoil + interfaçage VSoil / R
+ serveur vsoil-calcul



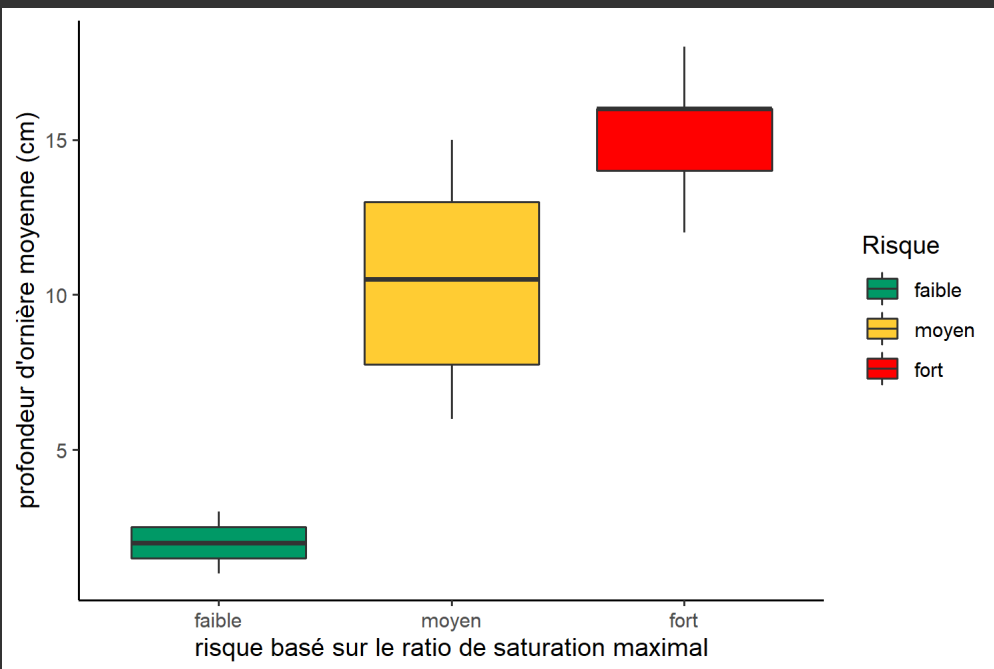
2) Le projet VSoilForOAD



2.2) Test du prototype en conditions opérationnelles

- [Emma Schmitt](#) (M2 ONF, Chambéry, 03/2023 - 09/2023)

➡ test du prototype sur 22 chantiers passés (forêts publiques et privées, 2022 – 2023)



Niveau du **risque d'orniérage** basé sur :

ratio de saturation maximal = humidité maximale de la couche 0-25 cm prédite au cours du chantier / seuil de praticabilité

ratio de saturation maximal :

< 60 % : risque d'orniérage **faible**

entre 60 % et 120 % : risque **moyen**

> 120 % : risque **élevé**

➡ orniérage observé post-chantier est d'autant plus grand que le risque d'orniérage calculé est élevé

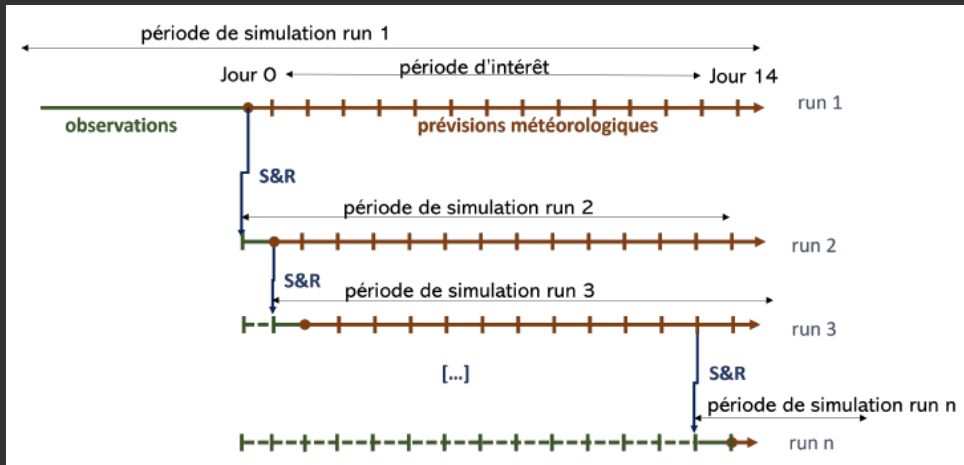
2) Le projet VSoilForOAD

2.2) Test du prototype en conditions opérationnelles

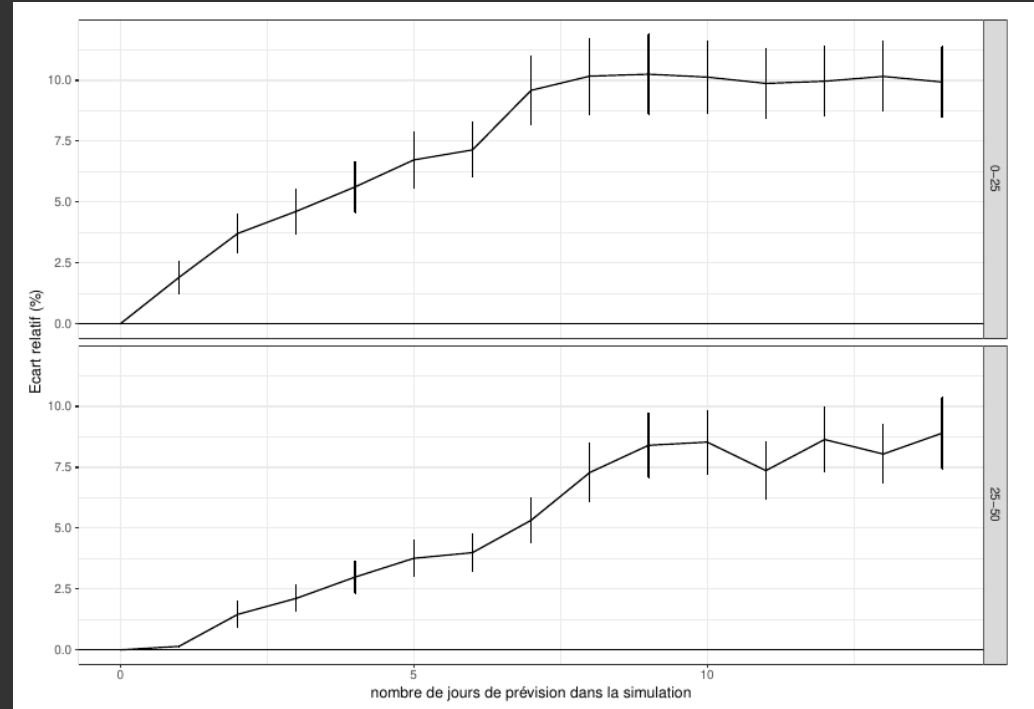
- [Emma Schmitt](#) (M2 ONF, Chambéry, 03/2023 - 09/2023)

➡ influence des **données météo prévisionnelles** sur la **fiabilité** des résultats du prototype

Outil : « stop and resume »



➡ simulation de l'**indice de saturation moyen** de chaque jour de chantier plusieurs fois avec une **fiabilité croissante**



➡ écart relatif moyen augmente jusqu'à 7 jours de données météo prévisionnelles utilisés et se stabilise (10%) entre 8 et 14 jours

3) La suite : le projet VSoilForOAD2 (INRAE - ONF)



- Consolider le modèle **Rich_Clim_Forest** :
 - **valider** le modèle dans d'**autres contextes** : types de sols forestiers, $\pm$ humides, $\pm$ pentus, engins
 - montrer l'**intérêt** du modèle
 - **base** pour le service climatique final
- Mais... modèle **Rich_Clim_Forest** peu facile d'accès :
 - ➡ développement d'une **application simple** :
 - **accessible** à des **opérateurs forestiers** (pas experts en sciences du sol / informatique)
 - permettant de **saisir** des informations de **terrain** (type de sol, pente, date de chantier...)
 - permettant d'**exécuter** le modèle (inclut la récupération des données météo)
 - mettant à disposition des utilisateurs des **indicateurs de praticabilité** actualisés
 - ➡ **prototype** réalisé par l'équipe logicielle VSoil



Serveur Web

- Basé sur Django (Python)
- Site web « chantiers »
 - Caractériser des chantiers (= sites forestiers)
 - Situations initiales du modèle
 - Récupérer et afficher les sorties journalières (prévisions à 7 j.)
- Site web « météo »
 - Afficher/télécharger la météo (prévisions + historique)
 - Accès via un web service ouvert



Serveur Jenkins

- Lanceur de jobs + monitoring/alertes par méls
- Lancer le modèle pour mettre à jour les sorties des chantiers « en cours » sur le serveur web
- Récupérer+vérifier la météo de l'ECMWF (4/j)
- Transferts des données météo
 - du serveur météo → serveur web



Serveur de calcul

- Exécute le modèle, pour tous les chantiers
 - Récupère les données météo du serveur météo
 - Met à jour ses sorties avec les prévisions à 7 jours
 - Envoie les résultats au serveur web



Serveur de données météo

- Télécharge les données prévisionnelles à 7 jours
 - différents modèles de l'ECMWF (IFS/AIFS + oper/enfo)
- Garde l'historique → reconstitue les données passées
- Données libres de droit = hum., temp., pluie, vent, rad. sol., etc
- Formats d'exports « standardisés » CSV ou JSON
- Utilisable par des scripts « batch »
- Librement utilisable et ouvert (en 2027/2028)

3) La suite : le projet VSoilForOAD2 (INRAE - ONF)



Scénario : suivre les prévisions de praticabilité du sol d'un chantier

3) La suite : le projet VSoilForOAD2 (INRAE - ONF)



Détail du chantier test_sab_nancy

Nom du site

test_sab_nancy

50 caractères maximum

Créateur du chantier

npousse

saisie automatique

Date de création

18/05/2026 11:23:09

saisie automatique

Statut du chantier

clôture

saisie automatique

Coordonnée X

6,1819

format WGS 84

Coordonnée Y

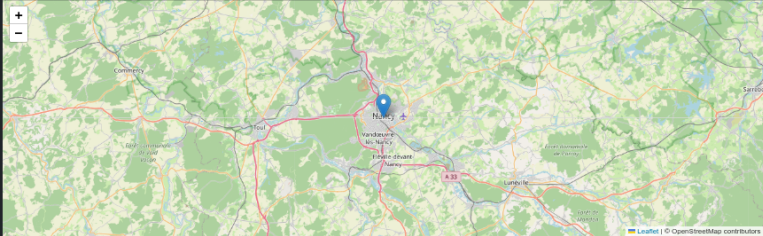
48,6905

format WGS 84

Pourcentage de pente

0

entier compris entre 0 et 1000



☐ Profondeur d'ornières avant chantier supérieure à 10 cm
non coché par défaut.

☒ Essence principale à feuillage caduc
coché par défaut.

Type de machine

aucune

choix, aucune par défaut.

Modèle de machine

50 caractères maximum

Équipements spéciaux et protections des cloisonnements

aucun

choix, aucun par défaut.

Produits débardés

aucun

choix, aucun par défaut.

Observations

100 caractères maximum.

Horizon 1

Classe de texture*

sable

choix, argile par défaut.

Épaisseur*

100

entier en cm

Pourcentage d'éléments grossiers

0

entier compris entre 0 et 100

Pourcentage d'hydromorphie

0

entier compris entre 0 et 100

Date de début du chantier

date réelle, postérieure à la date de création

Date de fin du chantier

date réelle antérieure à la date de clôture

Profondeur d'ornière moyenne en fin de chantier

champ décimal en cm, 1 chiffre après la virgule

Profondeur d'ornière minimale en fin de chantier

champ décimal en cm, 1 chiffre après la virgule

Profondeur d'ornière maximale en fin de chantier

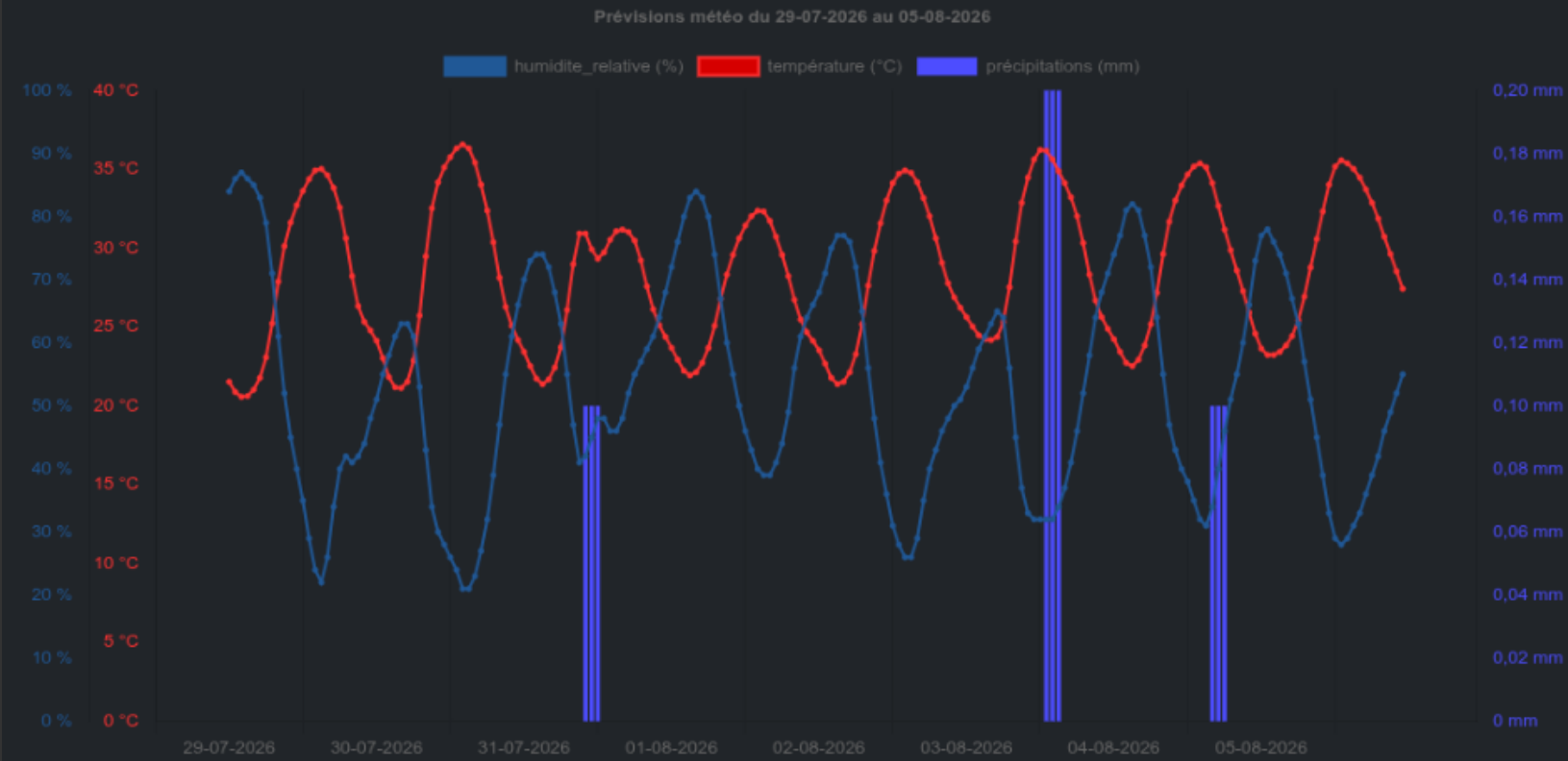
champ décimal en cm, 1 chiffre après la virgule

Précédent

3) La suite : le projet VSoilForOAD2 (INRAE - ONF)



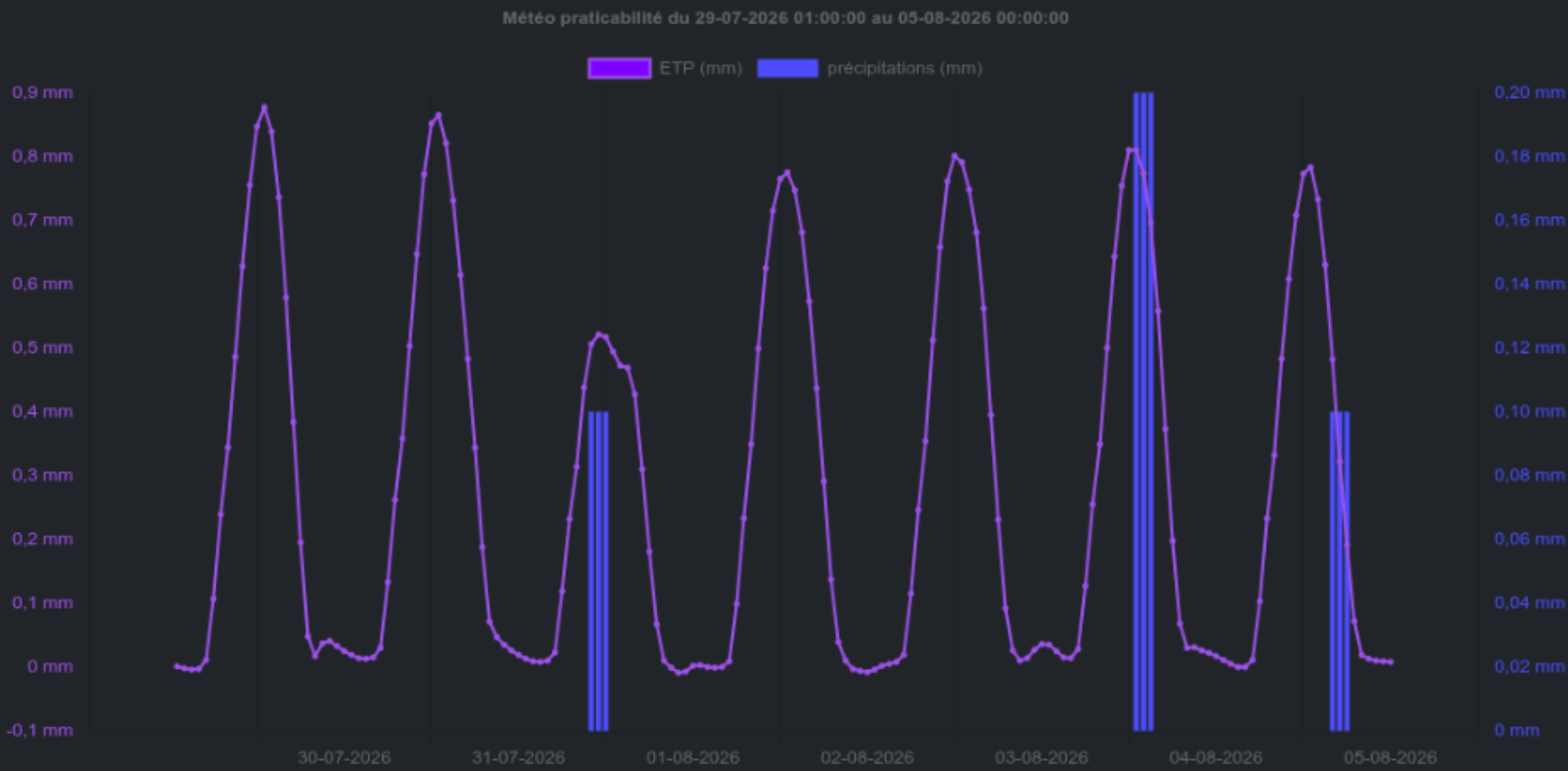
Prévisions météo d'entrée de la simulation

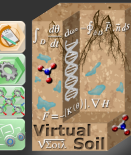


3) La suite : le projet VSoilForOAD2 (INRAE - ONF)



L'ETP est l'évapotranspiration, elle participe à l'assèchement du sol, les précipitations participent à son humectation.





Merci pour votre attention