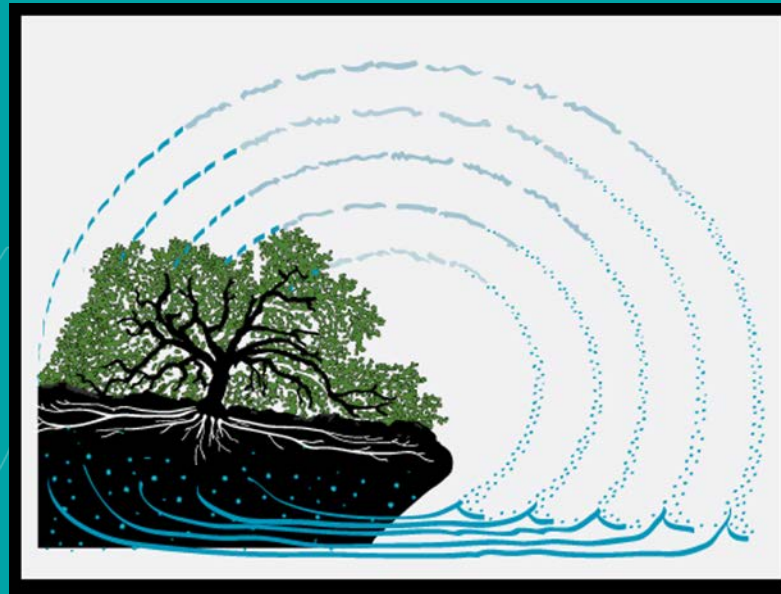


Équilibre éco-hydrologique des forêts :

Apport des modèles et de la télédétection pour quantifier l'utilisation de l'eau par les forêts



Druel Arsène et Nicolas Martin

arsene.druel@inrae.fr

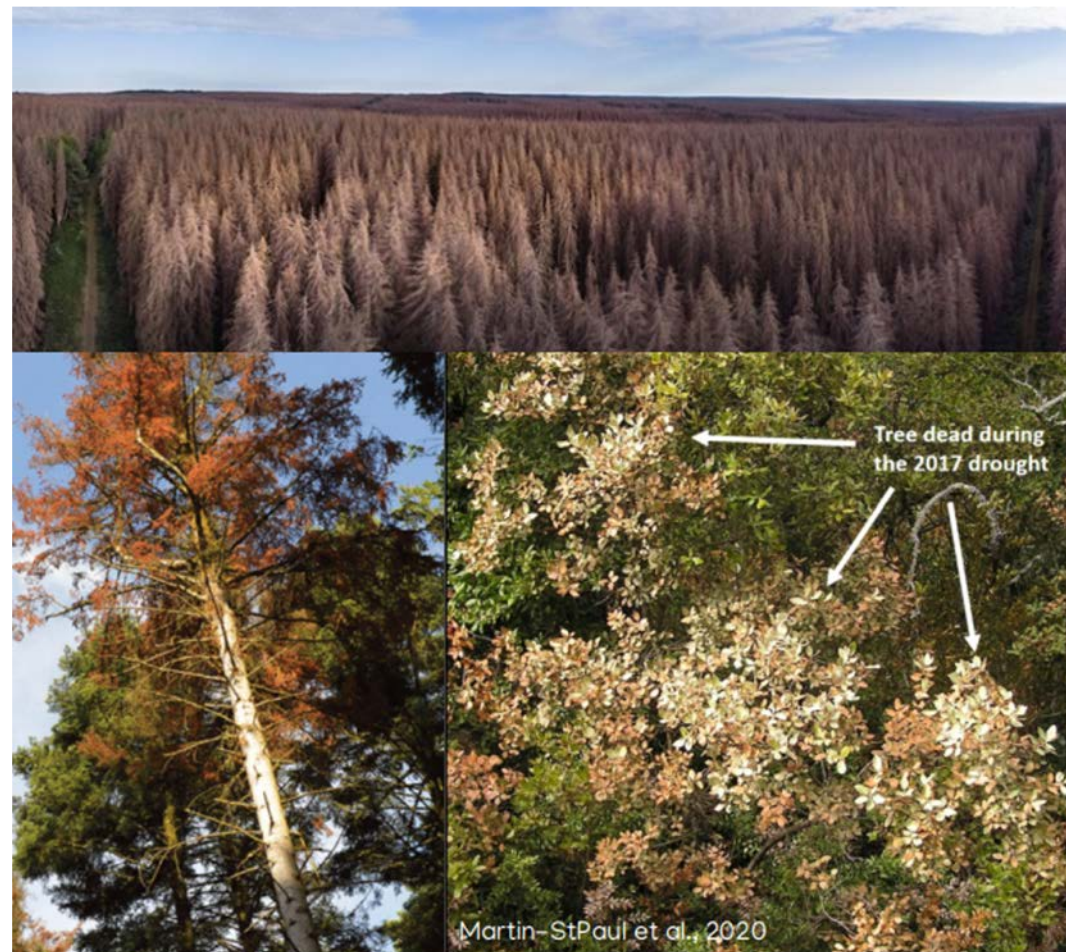
> La forêt menacée par la sécheresse

→ Des sécheresses de plus en plus intenses menacent la survie des forêts

→ Les effets des sécheresses sévères sont souvent observés après coup

→ Importance d'anticiper le risque hydraulique

⇒ Besoin de modèles mécanistiques et de la réserve utile



INRAE

URFM - Druel Arsène

25/04/2023 – Séminaire Forêt, sol et eau, des alliés naturels - Marseille

> Lexique

Réserve Utile

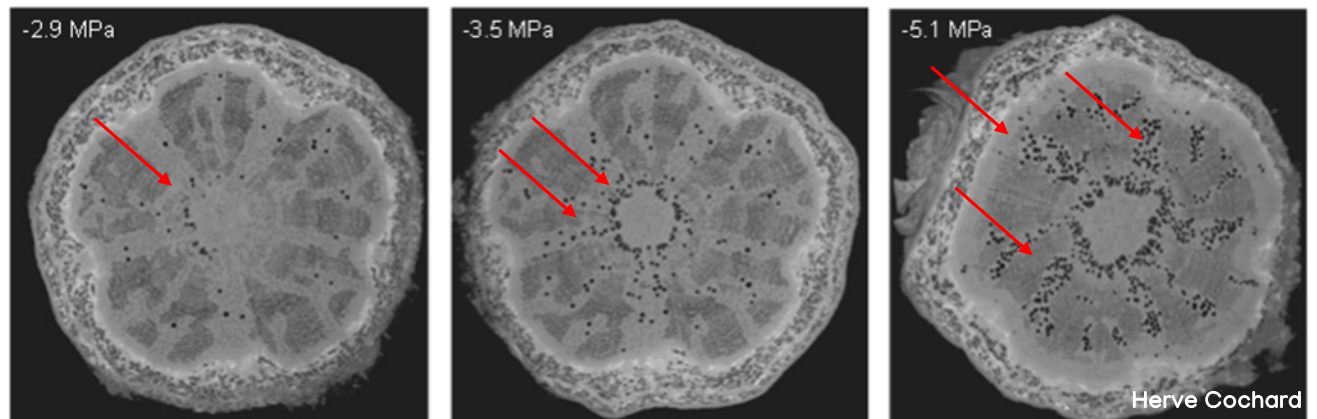
Volume d'eau dans le sol utilisable par la végétation

Surface foliaire

Surface de feuille par rapport à la surface au sol

Embolie

Rupture irréversible de la colonne d'eau dans l'arbre (au niveau du xylème) due à une sécheresse. Cela **interrompt le flux de sève** dans les vaisseaux touchés.
= Perte de conductance hydraulique



--

Intensité de la sécheresse

++



INRAE

URFM - Druel Arsène

25/04/2023 – Séminaire Forêt, sol et eau, des alliés

> Pourquoi ?

Réserve Utile

Volume d'eau dans le sol utilisable par la végétation

Exemple : Fontblanche

Réseau ICOS : mesure de gaz à effet de serre

- 2 sites en Méditerranée
- 1 en PACA



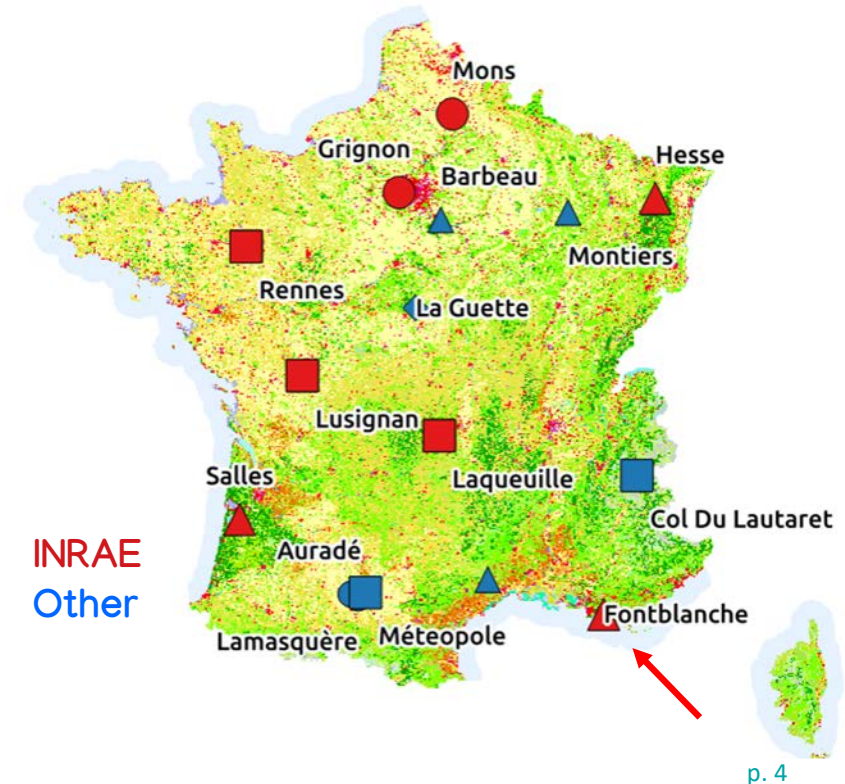
© Thibaut VERGOZ/IMBE/CNRS Images

Arsène

Séminaire Forêt, sol et eau, des alliés naturels - Marseille

- grasslands
- △ forests
- ◇ wetlands
- grassland

Réseau européen ICOS
www.icos-ri.eu



> Pourquoi ?

Réserve Utile

Volume d'eau dans le sol utilisable par la végétation

Exemple : Fontblanche

Observation :

Fosse pédologique

RU = 50 mm



INRAE

URFM - Druel Arsène

25/04/2023 – Séminaire Forêt, sol et eau, des alliés naturels - Marseille

> Pourquoi ?

Réserve Utile

Exemple : Fontblanche

Observation :



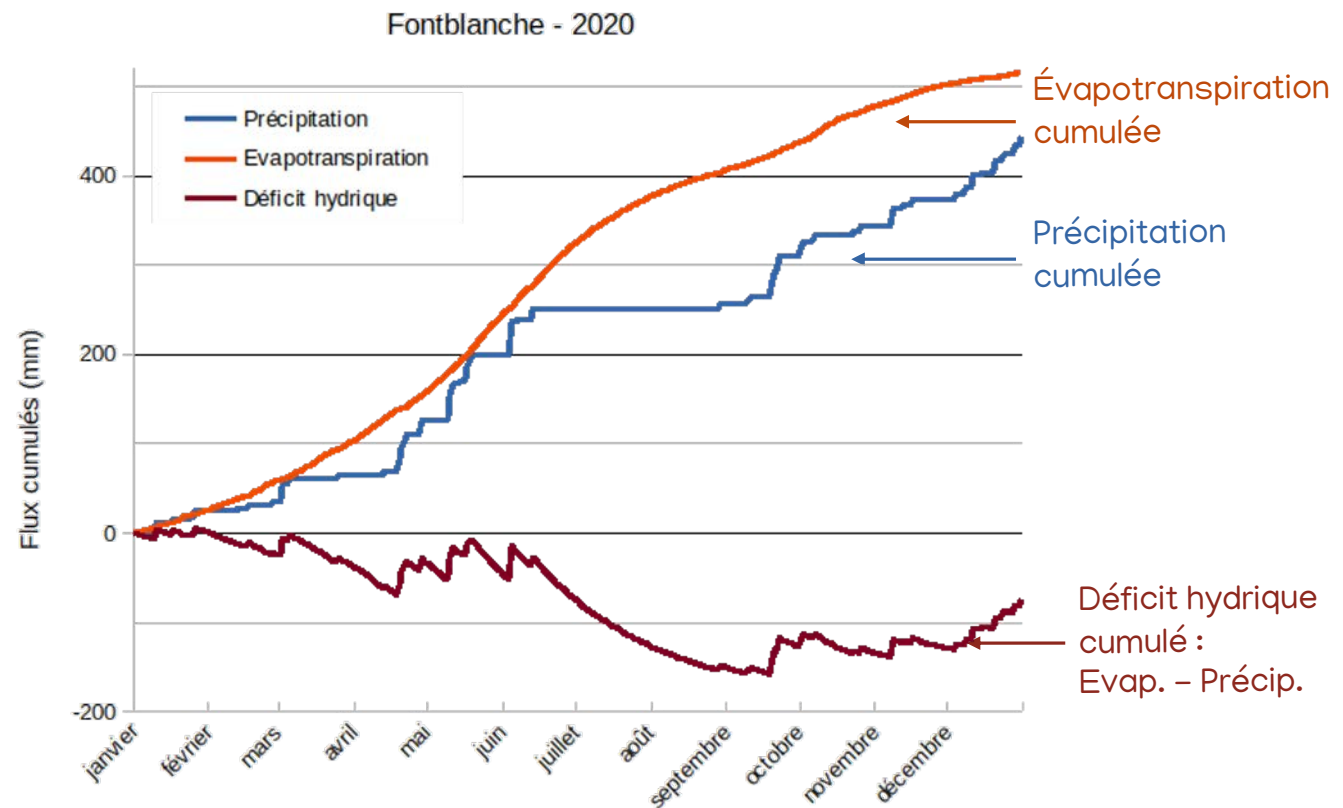
Fosse pédologique
RU = 50 mm

Observation 2020 :

Évapotranspiration = 516 mm

Précipitation = 444 mm

Volume d'eau dans le sol utilisable par la végétation



INRAE

URFM - Druel Arsène

25/04/2023 – Séminaire Forêt, sol et eau, des alliés naturels - Marseille

> Pourquoi ?

Réserve Utile

Exemple : Fontblanche

Observation :



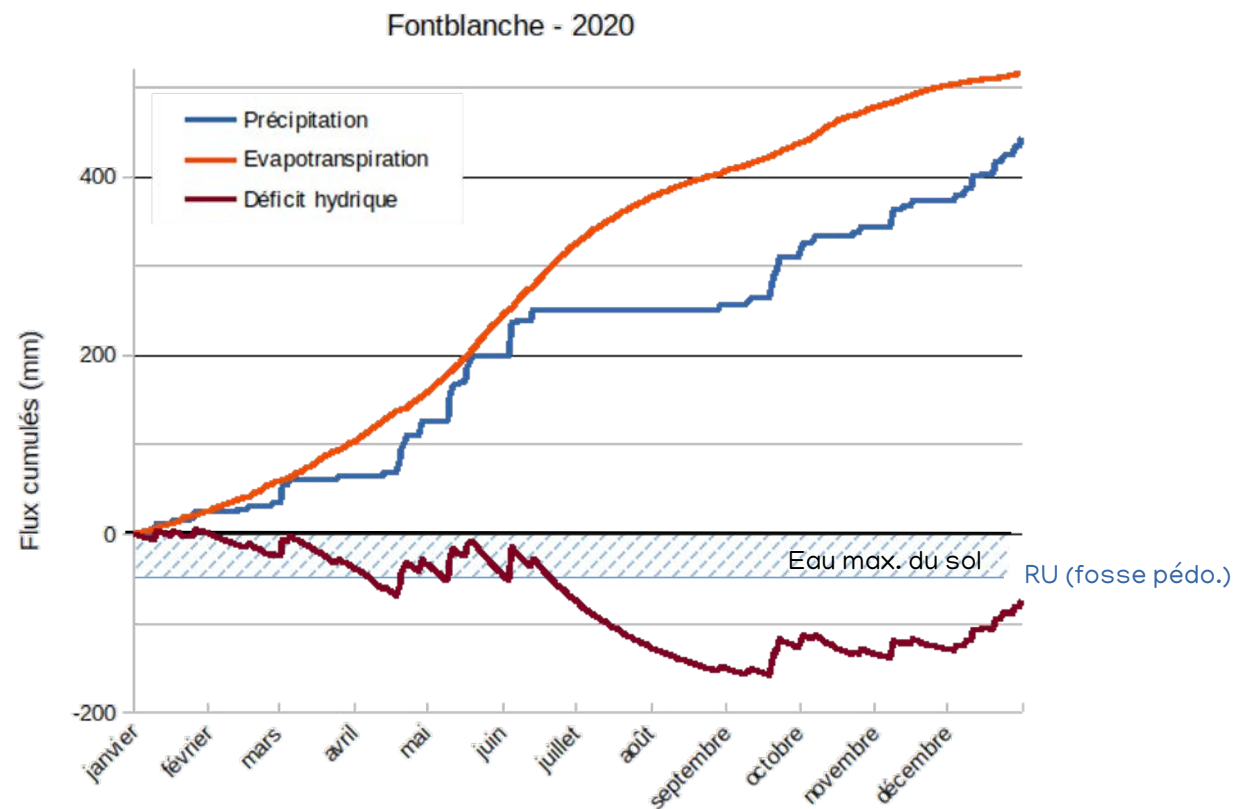
Fosse pédologique
RU = 50 mm

Observation 2020 :

Évapotranspiration = 516 mm

Précipitation = 444 mm

Volume d'eau dans le sol utilisable par la végétation



INRAE

URFM - Druel Arsène

25/04/2023 – Séminaire Forêt, sol et eau, des alliés naturels - Marseille

> Pourquoi ?

Réserve Utile

Exemple : Fontblanche

Observation :



Fosse pédologique
RU = 50 mm

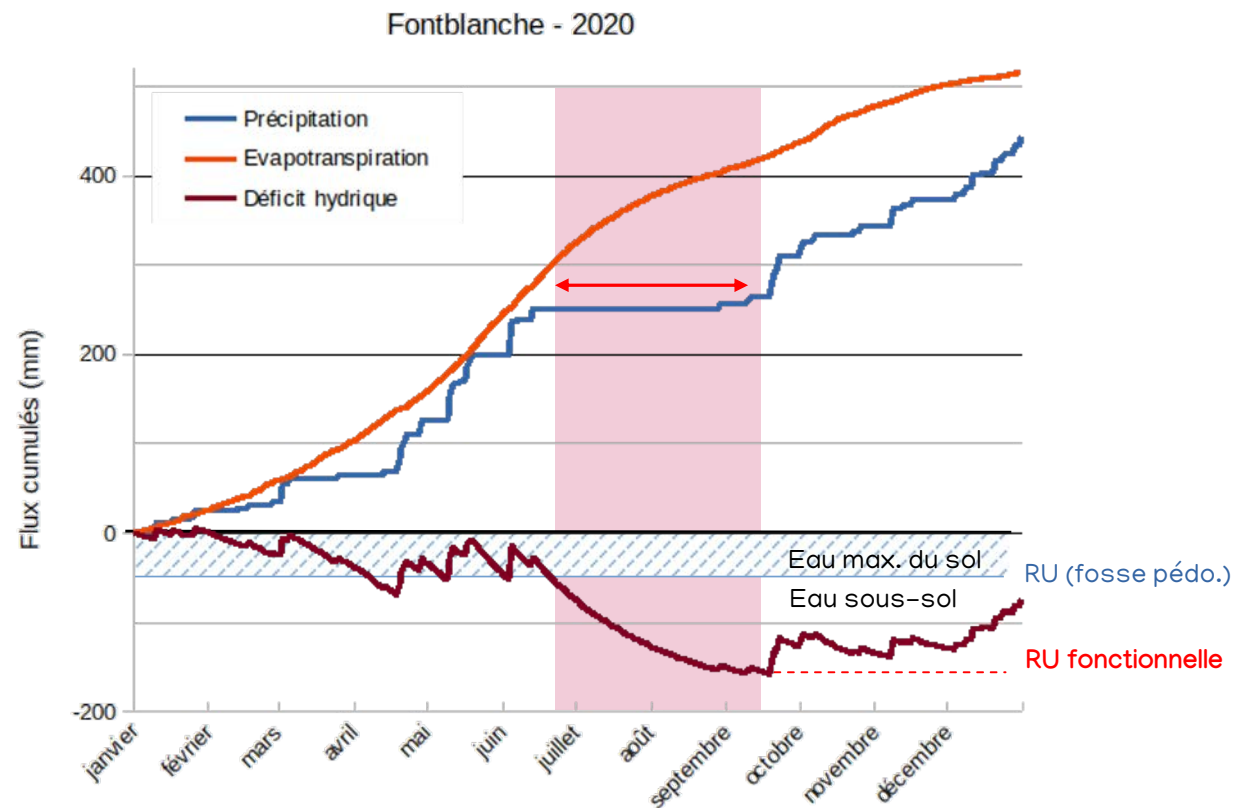
Observation 2020 :

Évapotranspiration = 516 mm

Précipitation = 444 mm

RU fonctionnelle = 157 mm

Volume d'eau dans le sol utilisable par la végétation



INRAE

URFM - Druel Arsène

25/04/2023 – Séminaire Forêt, sol et eau, des alliés naturels - Marseille

> Pourquoi ?

Réserve Utile

Volume d'eau dans le sol utilisable par la végétation

Exemple : Fontblanche

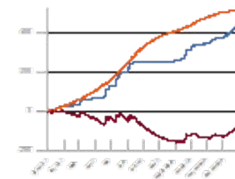
Observation :



Fosse pédologique
RU = 50 mm

VS

Observation 2020:



Tour à flux

RU fonctionnelle = 157 mm



→ Delta de 300 %, qui se trouve en dessous de 50 cm, dans la roche !

Comment estimer la réserve utile totale/fonctionnelle
disponible pour la forêt ?



INRAE

URFM - Druel Arsène

25/04/2023 – Séminaire Forêt, sol et eau, des alliés naturels - Marseille

> Concept : l'équilibre éco-hydrologique ?

Les forêts, composées de différentes **espèces** d'arbres,
sont à l'**équilibre** avec le **sol** et le **climat**

on considère qu'il n'y a pas de perturbation extérieure (telle que le feu, les nuisibles ou l'exploitation)



Équilibre optimal
sol / climat

> Concept : l'équilibre éco-hydrologique ?

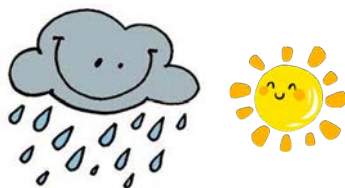
Les forêts, composées de différentes **espèces** d'arbres,
sont à **l'équilibre** avec le **sol** et le **climat**

on considère qu'il n'y a pas de perturbation extérieure (telle que le feu, les nuisibles ou l'exploitation)

Amélioration
des conditions
climatiques



Augmentation
de la surface
foliaire



Équilibre optimal
sol / climat

→ I. La **surface foliaire**
d'une forêt est en **équilibre**
avec les **ressources en**
eau



INRAE

URFM - Druel Arsène

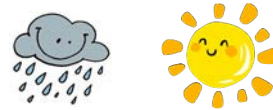
25/04/2023 – Séminaire Forêt, sol et eau, des alliés naturels - Marseille

> Concept : l'équilibre éco-hydrologique ?

Les forêts, composées de différentes **espèces** d'arbres,
sont à **l'équilibre** avec le **sol** et le **climat**

on considère qu'il n'y a pas de perturbation extérieure (telle que le feu, les nuisibles ou l'exploitation)

→ Il. La forêt s'est développée
afin de ne pas souffrir d'une
sécheresse commune.



Équilibre optimal
sol / climat



Détérioration
des conditions
climatiques

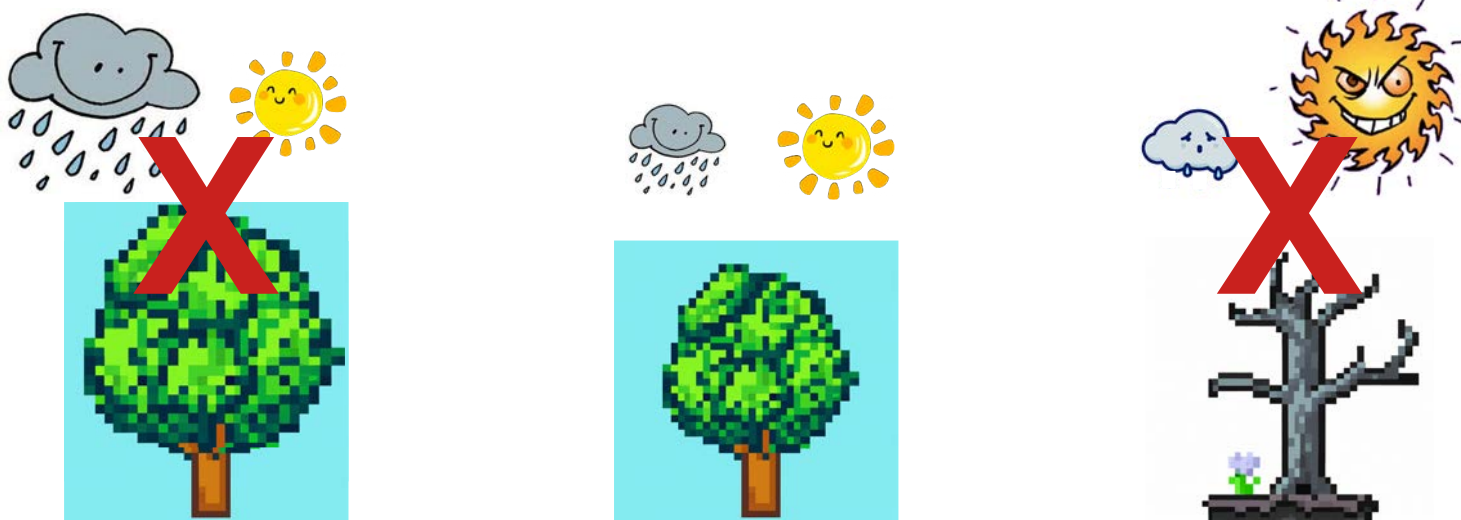


Augmentation
de la mortalité

> Concept : l'équilibre éco-hydrologique ?

Les forêts, composées de différentes **espèces** d'arbres,
sont à **l'équilibre** avec le **sol** et le **climat**

on considère qu'il n'y a pas de perturbation extérieure (telle que le feu, les nuisibles ou l'exploitation)



⇒ La surface foliaire est à l'équilibre avec la capacité en eau du sol et le climat afin de ne pas présenter de mortalité (sauf dans le cas de sécheresse exceptionnelle)

INRAE

URFM - Druel Arsène

25/04/2023 – Séminaire Forêt, sol et eau, des alliés naturels - Marseille

> Concept : l'équilibre éco-hydrologique ?

Les forêts, composées de différentes **espèces** d'arbres,
sont à l'**équilibre** avec le **sol** et le **climat**

on considère qu'il n'y a pas de perturbation extérieure (telle que le feu, les nuisibles ou l'exploitation)

> Concept : comment quantifier la réserve utile fonctionnelle

Simuler les états théoriques / fictifs de la forêt afin de sélectionner celui qui permet de représenter la forêt observée !



INRAE

URFM - Druel Arsène

25/04/2023 – Séminaire Forêt, sol et eau, des alliés naturels - Marseille

> Simuler la forêt : le modèle SurEau



Risque
hydrau-
lique

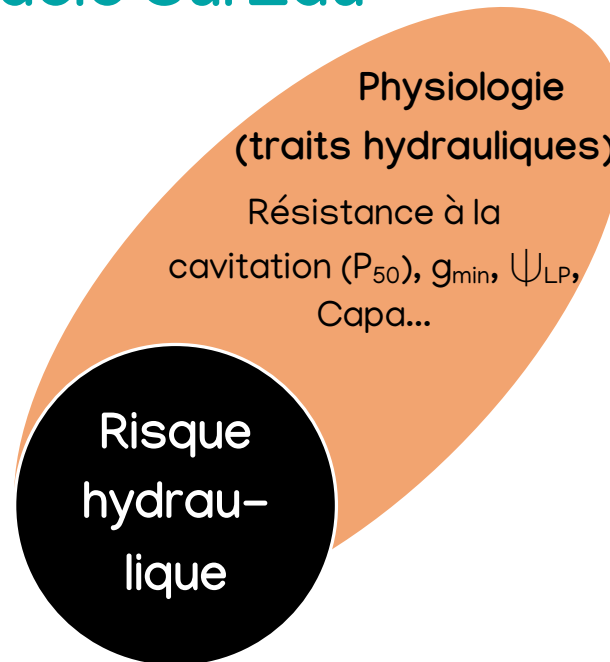


INRAE

URFM - Druel Arsène

25/04/2023 – Séminaire Forêt, sol et eau, des alliés naturels - Marseille

> Simuler la forêt : le modèle SurEau



INRAE

URFM - Druel Arsène

25/04/2023 – Séminaire Forêt, sol et eau, des alliés naturels - Marseille

> Simuler la forêt : le modèle SurEau

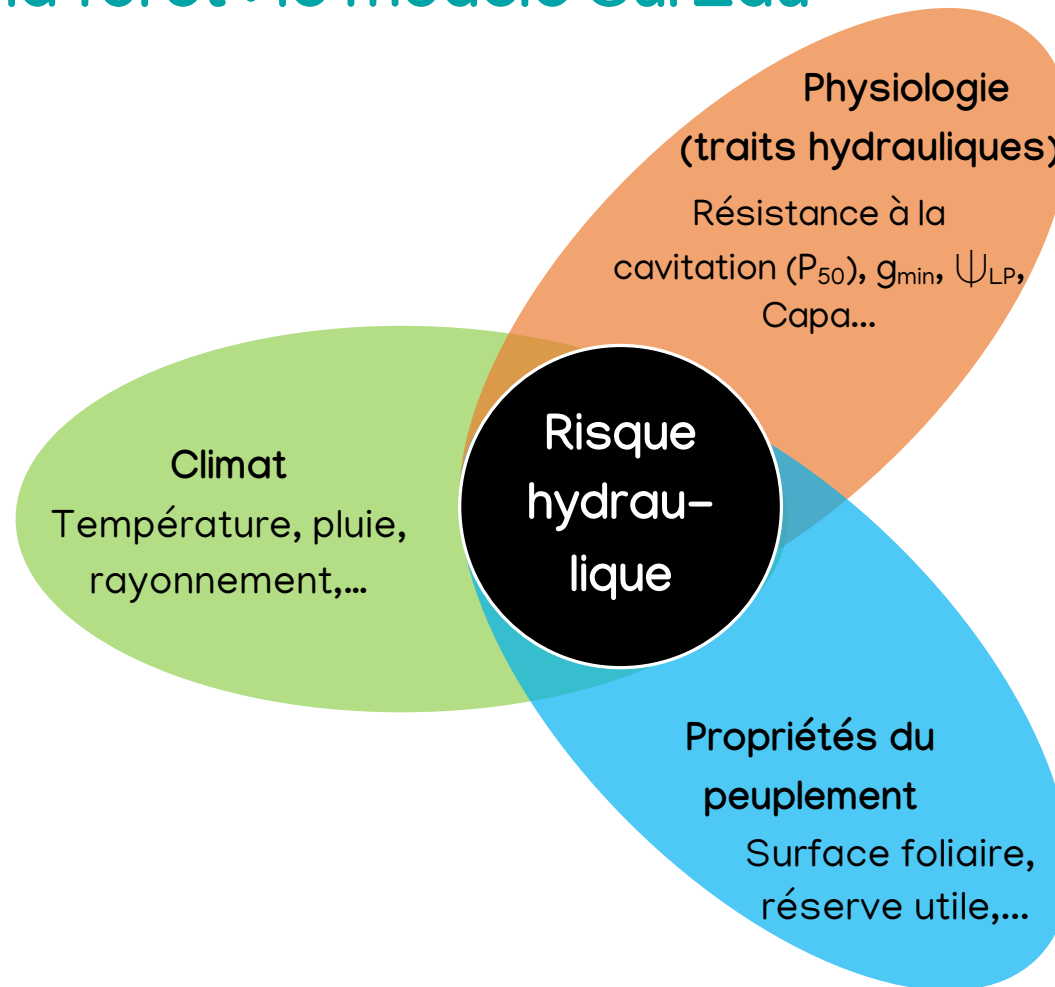


INRAE

URFM - Druel Arsène

25/04/2023 – Séminaire Forêt, sol et eau, des alliés naturels - Marseille

> Simuler la forêt : le modèle SurEau



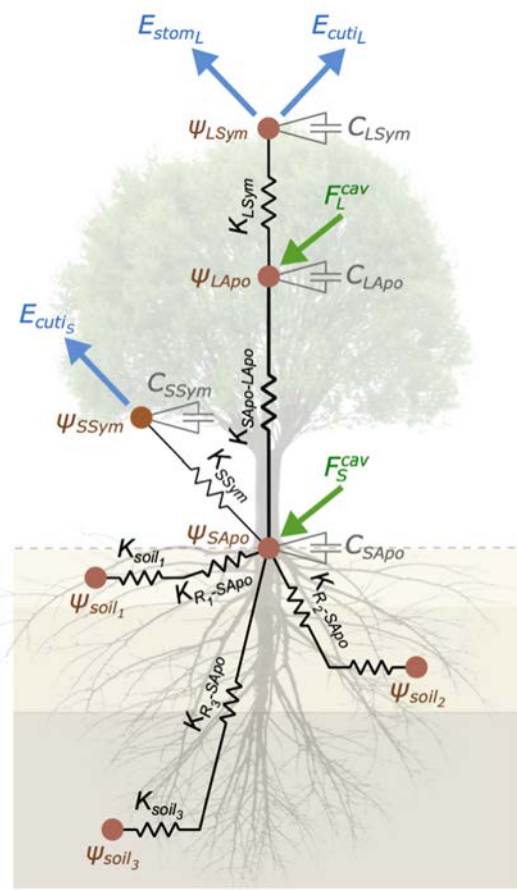
INRAE

URFM - Druel Arsène

25/04/2023 – Séminaire Forêt, sol et eau, des alliés naturels - Marseille

> Simuler la forêt : le modèle SurEau

Climat
Température, pluie,
rayonnement,...



Physiologie
(traits hydrauliques)
Résistance à la
cavitation (P_{50}), g_{min} , ψ_{LP} ,
Capa...

**Propriétés du
peuplement**
Surface foliaire,
réserve utile,...

(SurEau: Cochard et al., 2021; Ruffault et al., 2022)

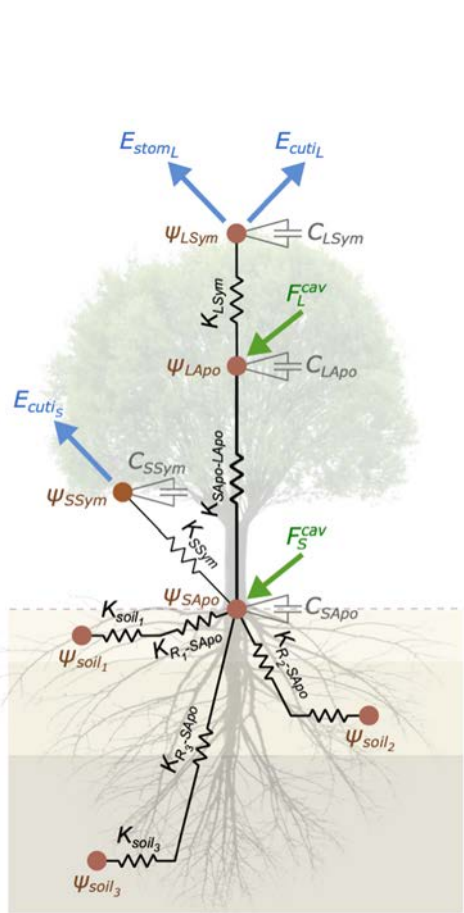


INRAE
URFM - Druel Arsène

25/04/2023 – Séminaire Forêt, sol et eau, des alliés naturels - Marseille

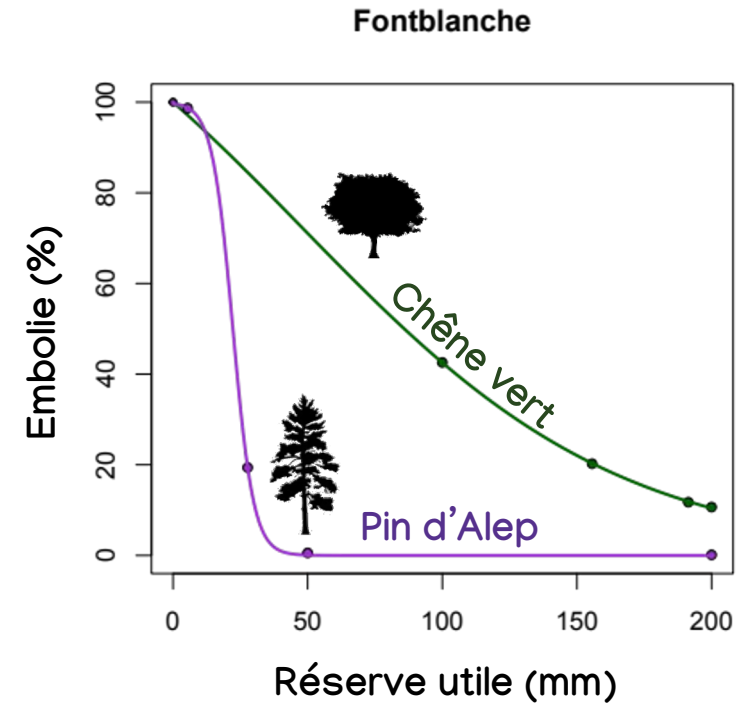
> Simuler la forêt : le modèle SurEau

Climat
Température, pluie,
rayonnement,...



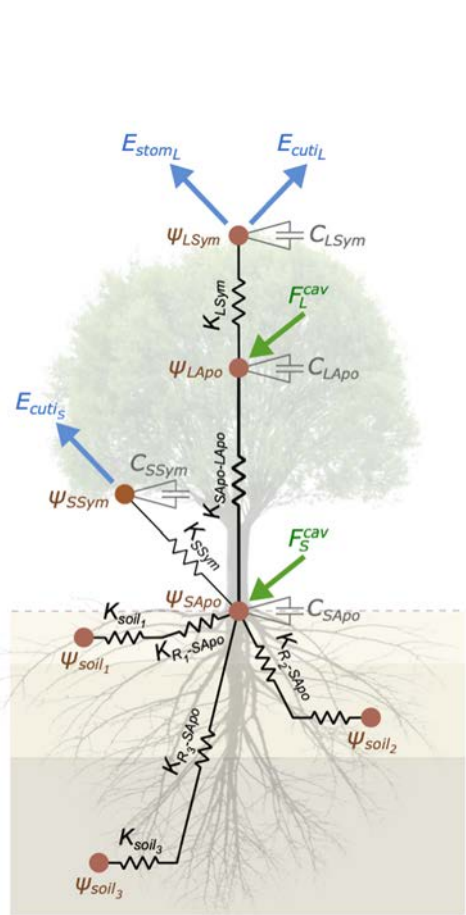
Physiologie
(traits hydrauliques)
Résistance à la
cavitation (P_{50} , g_{min} ,
 ψ_{LP} , Capa...)

Propriétés du
peuplement
Surface foliaire,
réserve utile,...



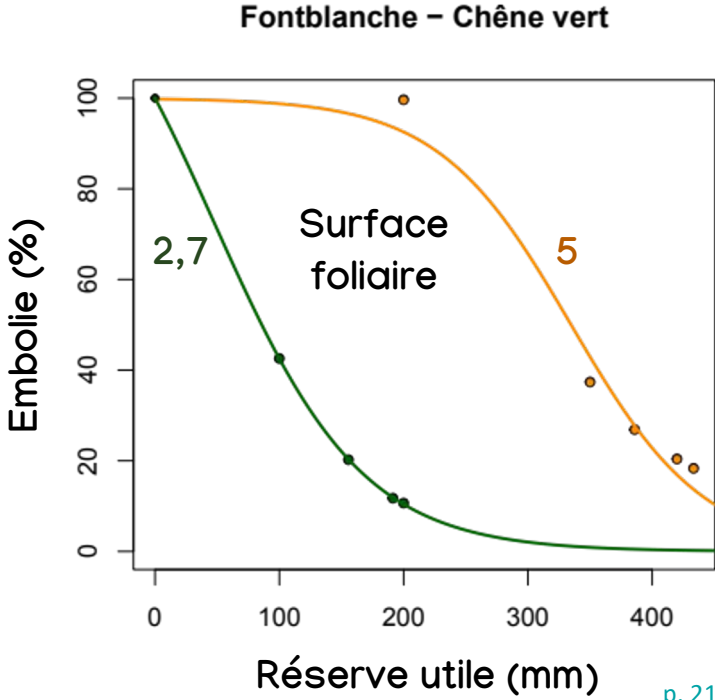
> Simuler la forêt : le modèle SurEau

Climat
Température, pluie,
rayonnement,...



Physiologie
(traits hydrauliques)
Résistance à la
cavitation (P_{50} , g_{min} ,
 ψ_{LP} , $Capa$...

Propriétés du
peuplement
Surface foliaire,
réserve utile,...



INRAE

URFM - Druel Arsène

25/04/2023 – Séminaire Forêt, sol et eau, des alliés naturels - Marseille

> Simuler la forêt : le modèle SurEau

Climat
Température, pluie, rayonnement,...



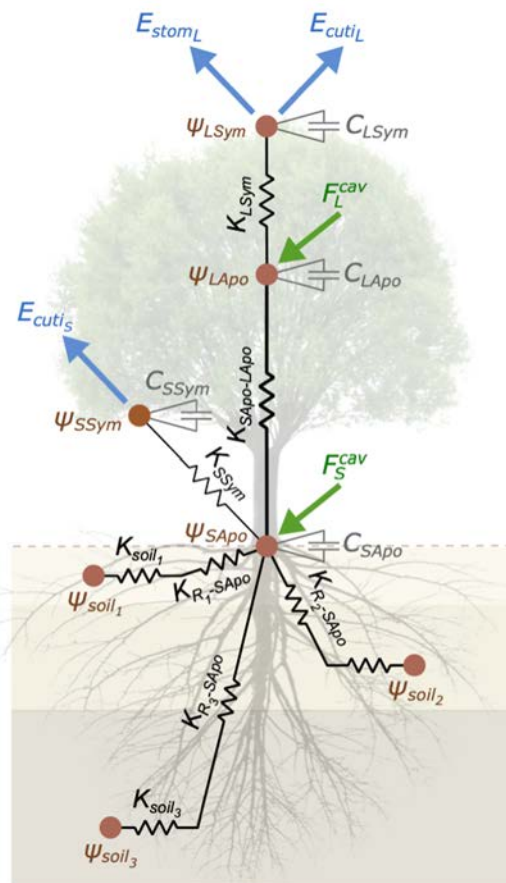
Données issues de la télédétection: Era 5 (Copernicus)



INRAE

URFM - Druel Arsène

25/04/2023 – Séminaire Forêt, sol et eau, des alliés naturels - Marseille



(SurEau: Cochard et al., 2021; Ruffault et al., 2022)

Physiologie (traits hydrauliques)
Résistance à la cavitation (P_{50}), g_{min} , ψ_{LP} , Capa...



Données issues de la littérature (bases de données) et de mesures en laboratoire

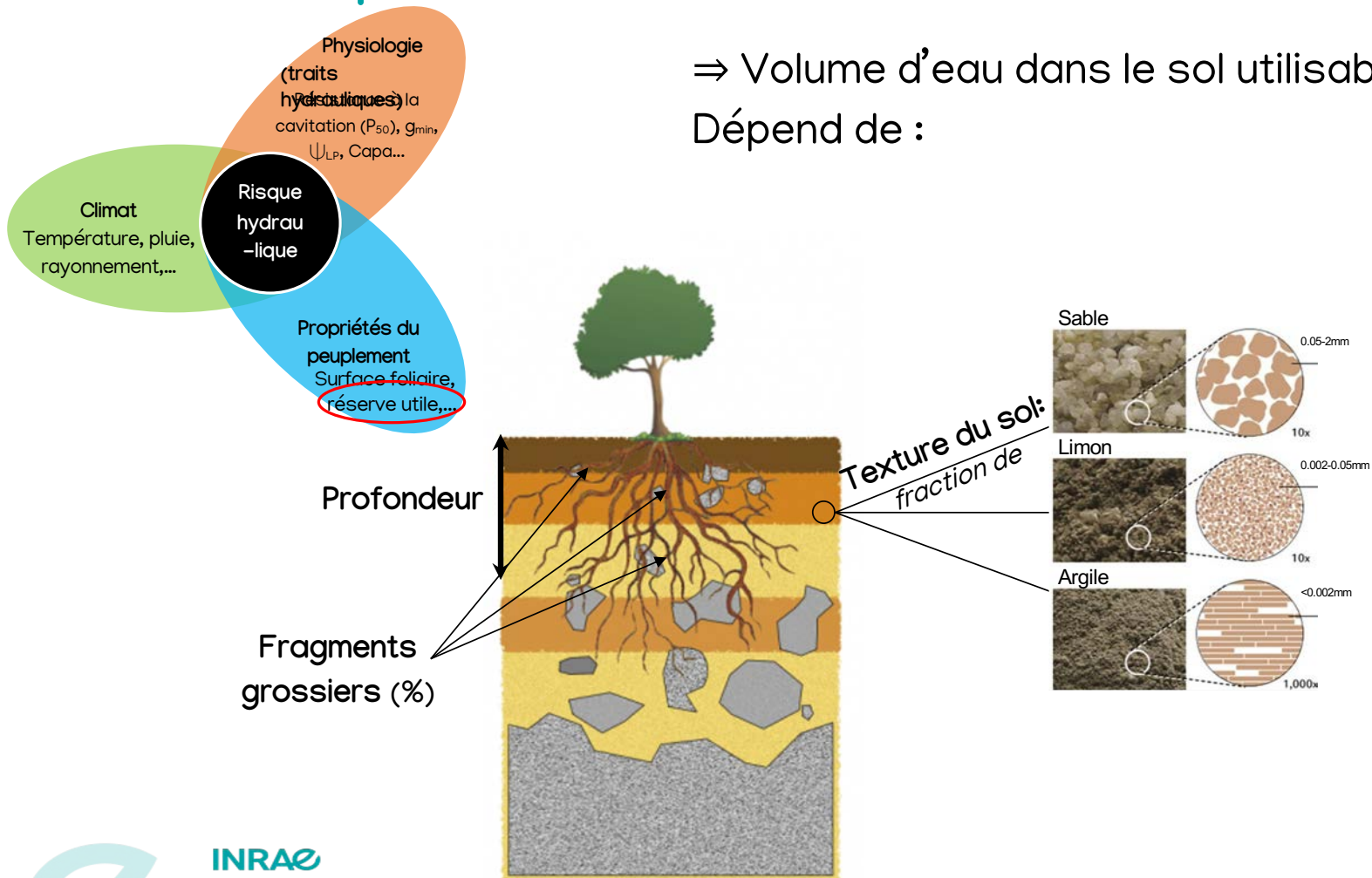


Données issues de la télédétection: Proba-V (Copernicus)

Propriétés du peuplement
Surface foliaire, réserve utile...

> Concept : inversion de la réserve utile

⇒ Volume d'eau dans le sol utilisable par la végétation.
Dépend de :



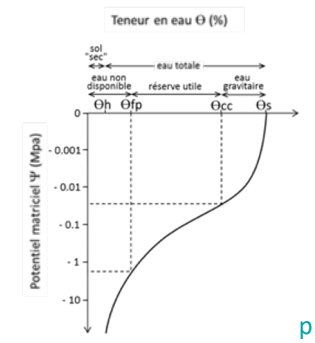
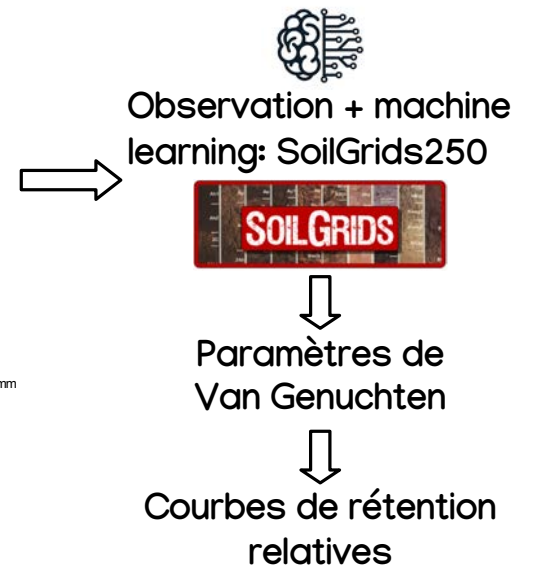
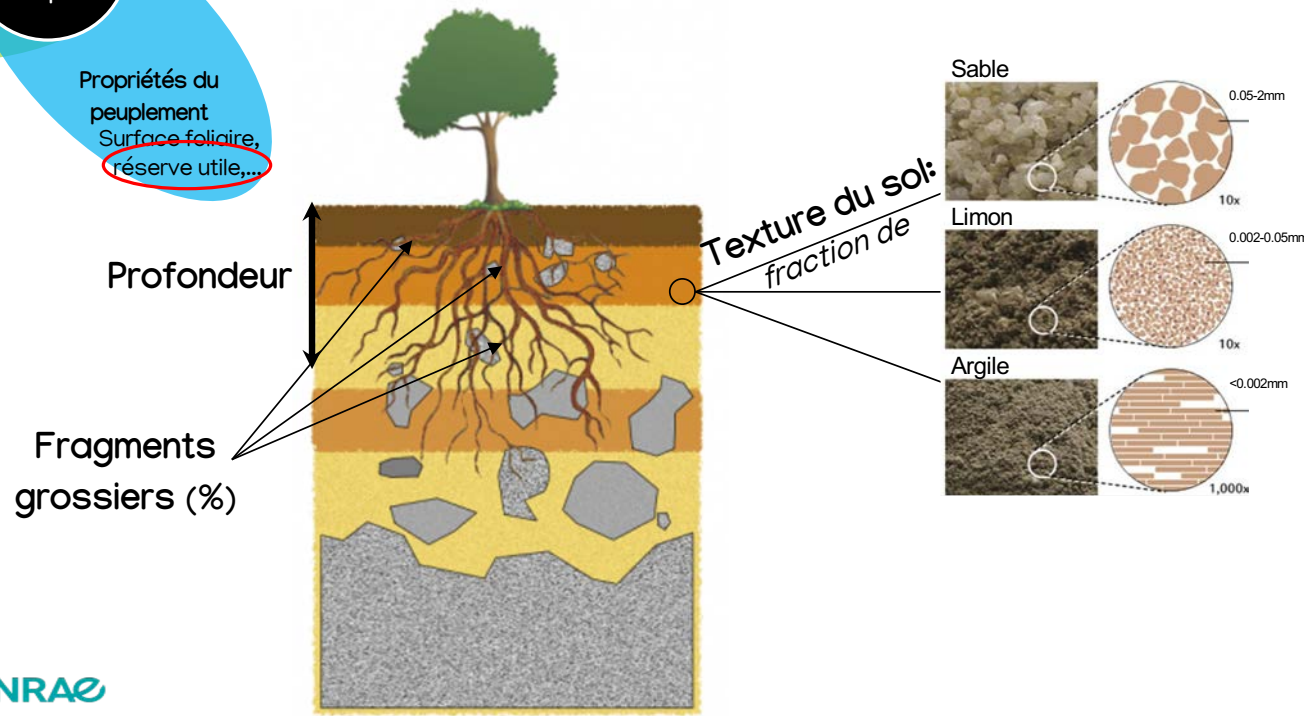
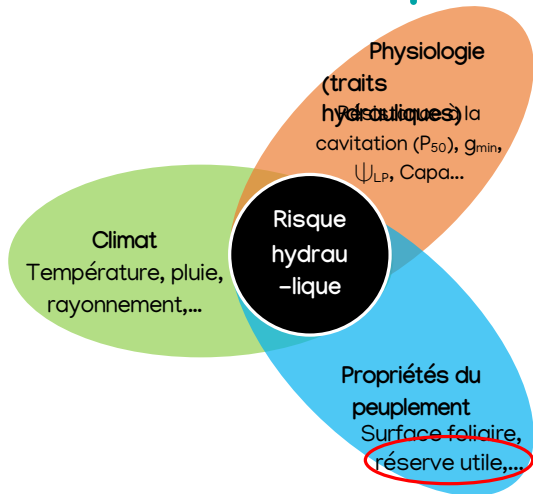
INRAE

URFM - Druel Arsène

25/04/2023 – Séminaire Forêt, sol et eau, des alliés naturels - Marseille

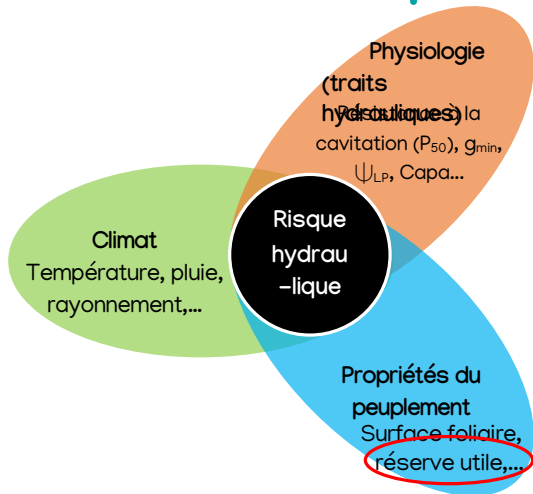
> Concept : inversion de la réserve utile

⇒ Volume d'eau dans le sol utilisable par la végétation.
 Dépend de :

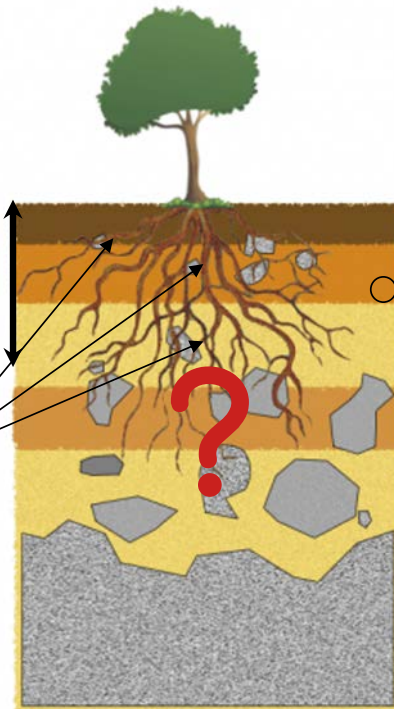


> Concept : inversion de la réserve utile

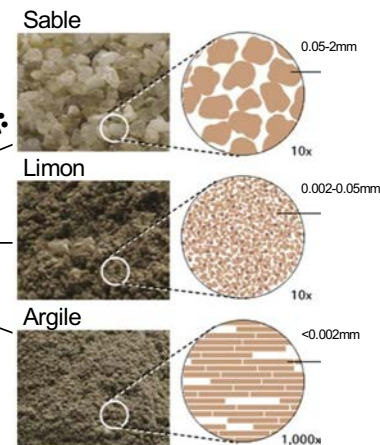
⇒ Volume d'eau dans le sol utilisable par la végétation.
Dépend de :



Profondeur
→ Absence de profondeur de sol
Fragments grossiers (%)
→ Pas réalistes la plupart du temps



Texture du sol: fraction de

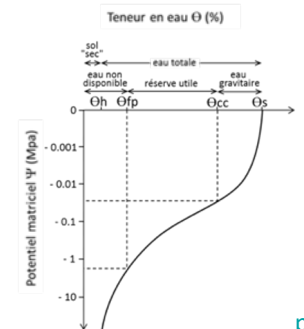


Observation + machine learning: SoilGrids250



Paramètres de Van Genuchten

Courbes de rétention relatives

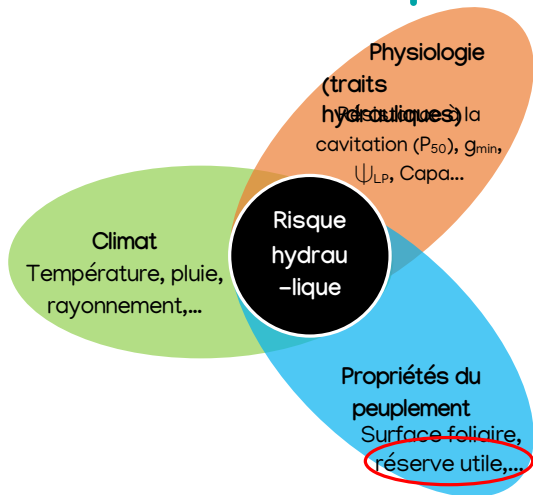


INRAE

URFM - Druel Arsène

25/04/2023 – Séminaire Forêt, sol et eau, des alliés naturels - Marseille

> Concept : inversion de la réserve utile

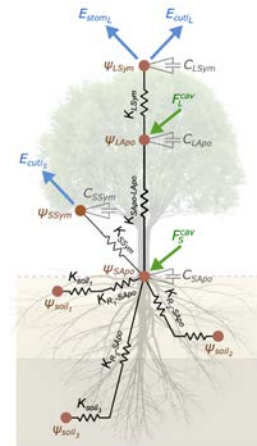
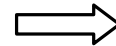


Texture du sol

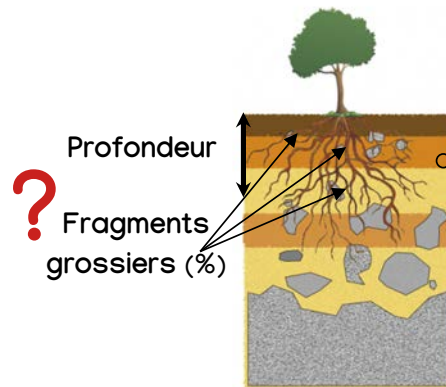
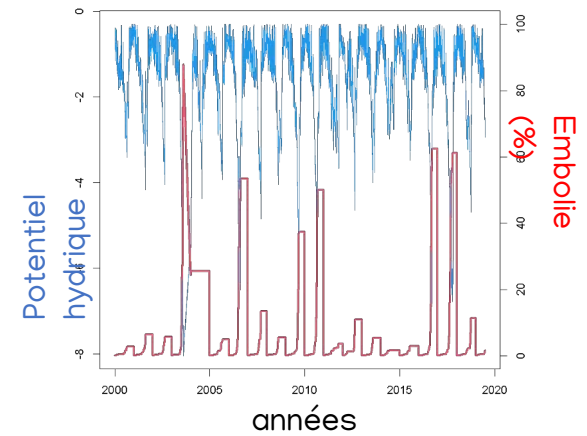
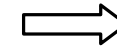


+

Valeur de fraction de roche arbitraire (profondeur const.)



1 simulation

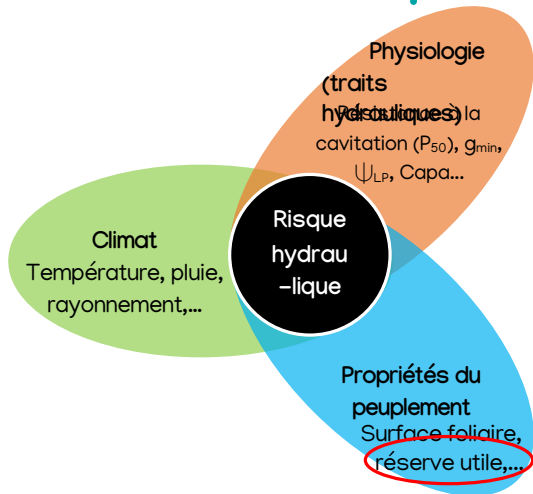


INRAE

URFM - Druel Arsène

25/04/2023 – Séminaire Forêt, sol et eau, des alliés naturels - Marseille

> Concept : inversion de la réserve utile

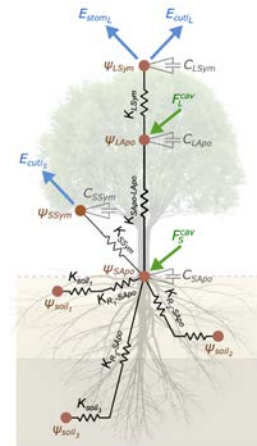
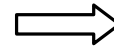


Texture du sol

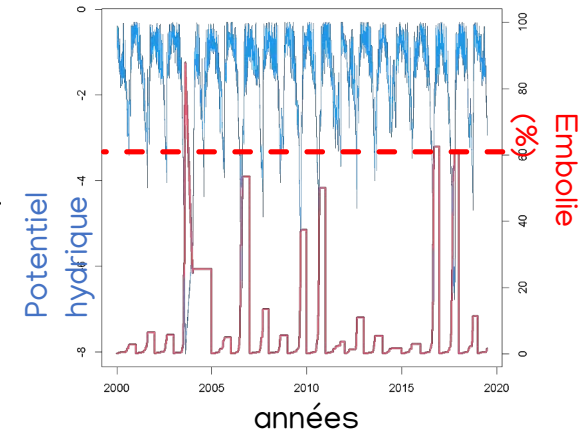
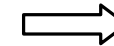


+

Valeur de fraction de roche arbitraire (profondeur const.)

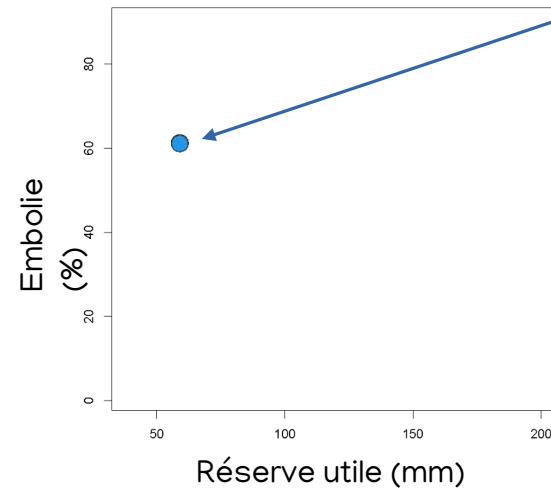
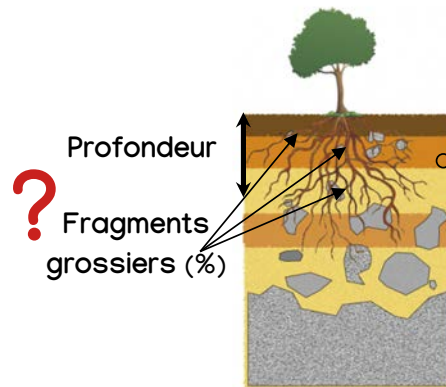


1 simulation



Quantile 0,9

Afin d'ignorer les sécheresses exceptionnelles

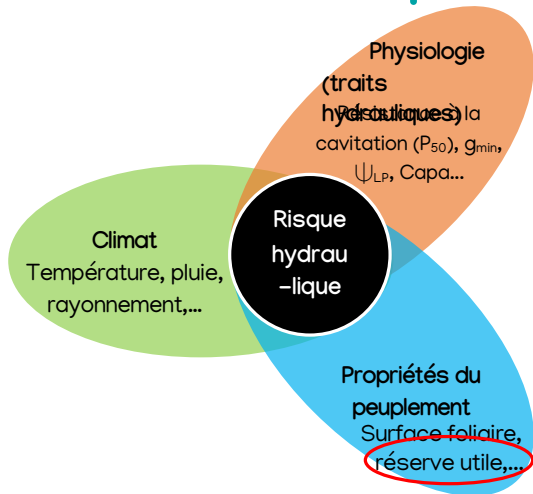


INRAE

URFM - Druel Arsène

25/04/2023 – Séminaire Forêt, sol et eau, des alliés naturels - Marseille

> Concept : inversion de la réserve utile



Texture du sol

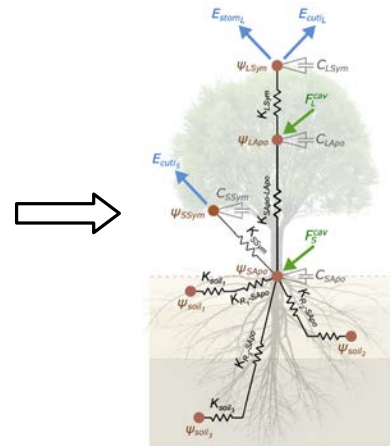
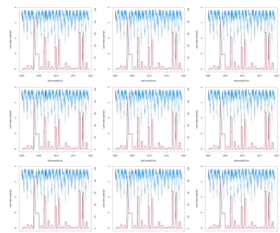


+

Valeur de fraction de roche arbitraire (profondeur const.)

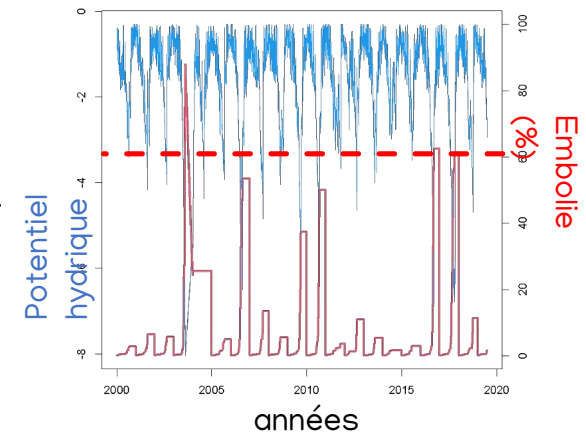
↓

9 simulations afin de **générer un gradient de réserve utile**



1 simulation

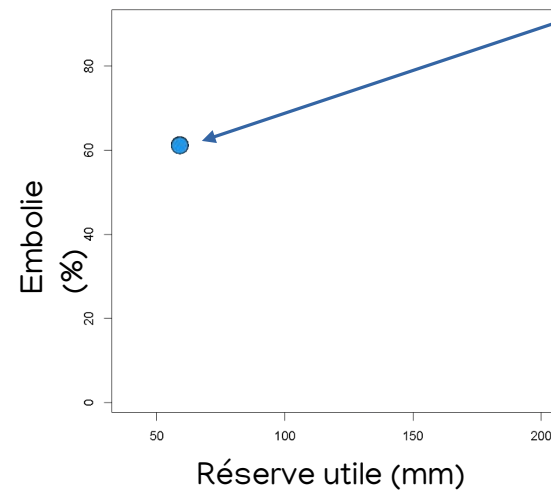
→



↓

Quantile 0,9

Afin d'ignorer les sécheresses exceptionnelles

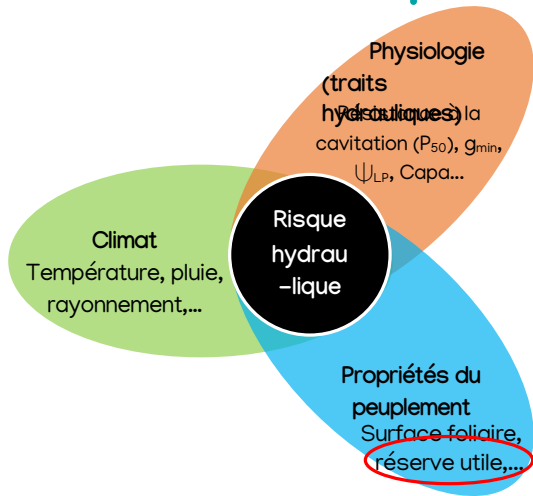


INRAE

URFM - Druel Arsène

25/04/2023 – Séminaire Forêt, sol et eau, des alliés naturels - Marseille

> Concept : inversion de la réserve utile



Texture du sol

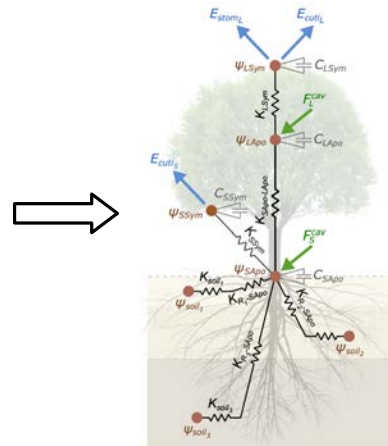
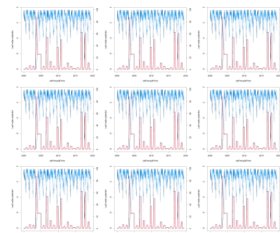


+

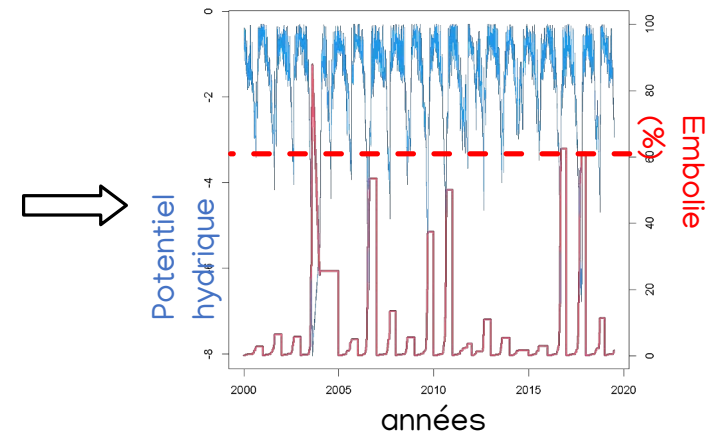
Valeur de fraction de roche arbitraire (profondeur const.)



9 simulations afin de générer un gradient de réserve utile

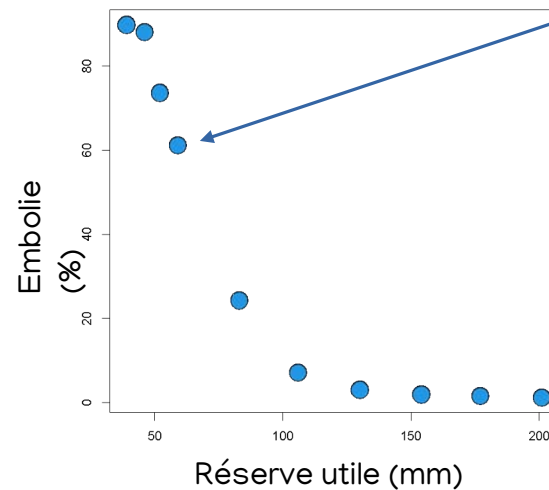


1 simulation



Quantile 0,9

Afin d'ignorer les sécheresses exceptionnelles

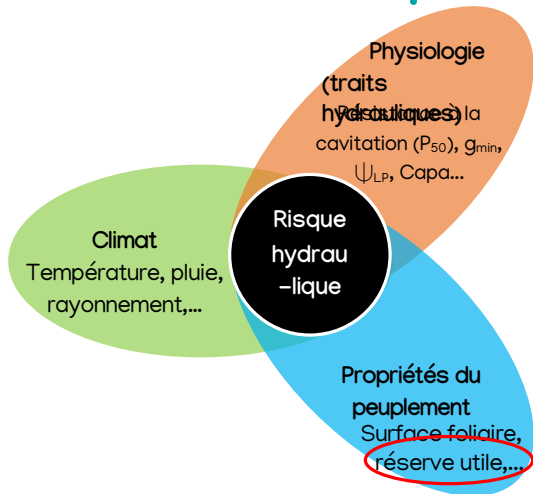


INRAE

URFM - Druel Arsène

25/04/2023 – Séminaire Forêt, sol et eau, des alliés naturels - Marseille

> Concept : inversion de la réserve utile



Texture du sol

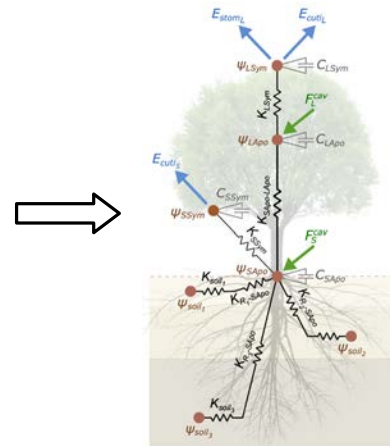


+

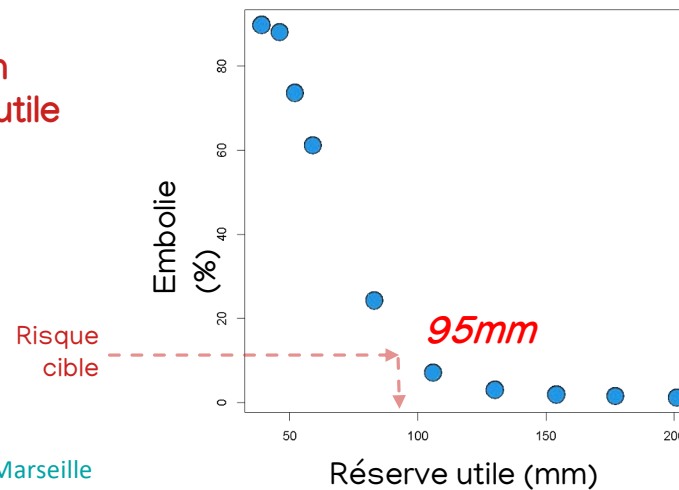
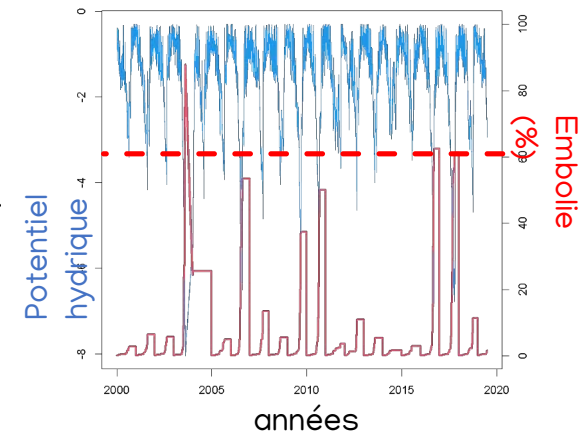
Valeur de fraction de roche arbitraire (profondeur const.)



9 simulations afin de générer un gradient de réserve utile



1 simulation



Résultat :
 RU = 95 mm :
 Embolie < 12 %
 (la majorité des années)

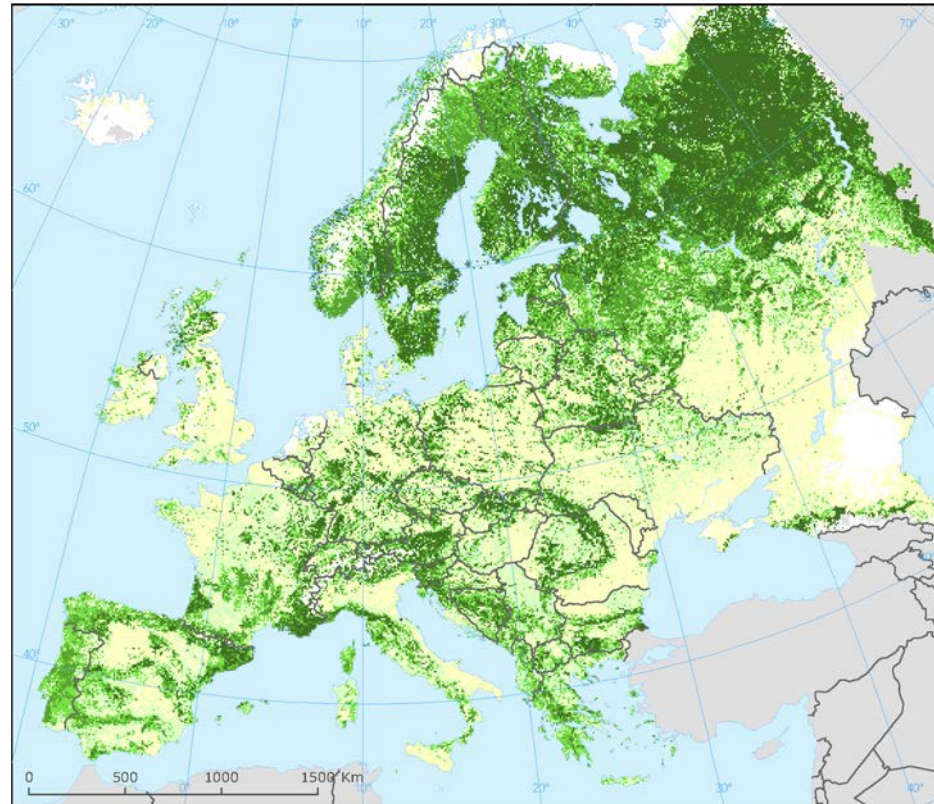


INRAE

URFM - Druel Arsène

25/04/2023 – Séminaire Forêt, sol et eau, des alliés naturels - Marseille

> Résultats : application au niveau des forêts européennes



INRAE

URFM - Druel Arsène

25/04/2023 – Séminaire Forêt, sol et eau, des alliés naturels - Marseille

> Résultats : application au niveau des forêts européennes

Conditions

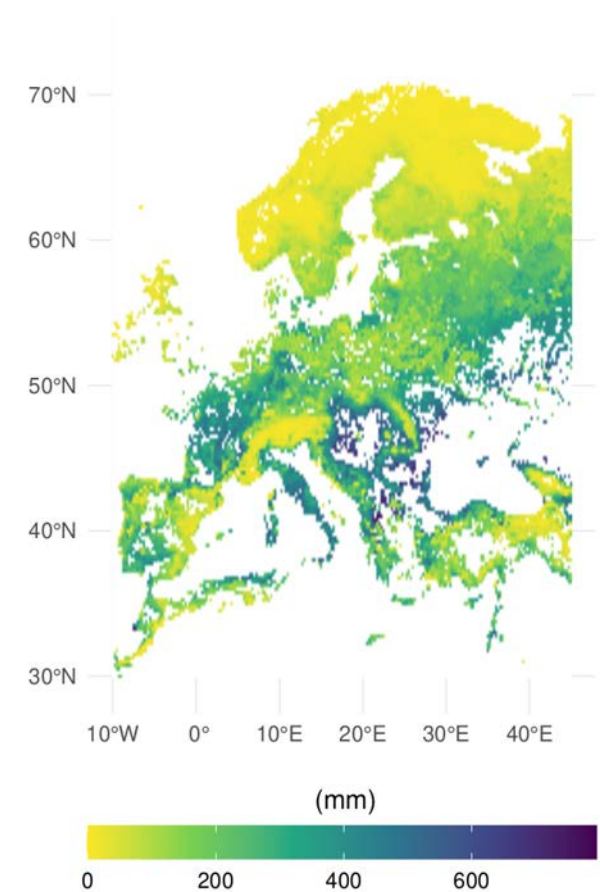
Choix des espèces majoritaires :
suivant Koppen et ESA-CCI land cover

Textures du sol : SoilGrid250

Surface foliaire : PROBA-V

Climat : ERA-5

Réserve utile calculée



INRAE

URFM - Druel Arsène

25/04/2023 – Séminaire Forêt, sol et eau, des alliés naturels - Marseille

> Résultats : application au niveau des forêts européennes

Conditions

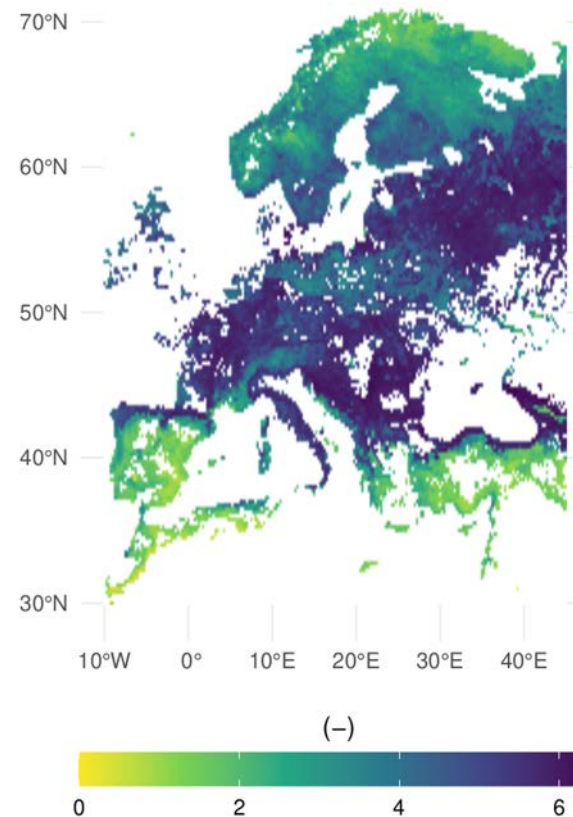
Choix des espèces majoritaires :
suivant Koppen et ESA-CCI land cover

Textures du sol : SoilGrid250

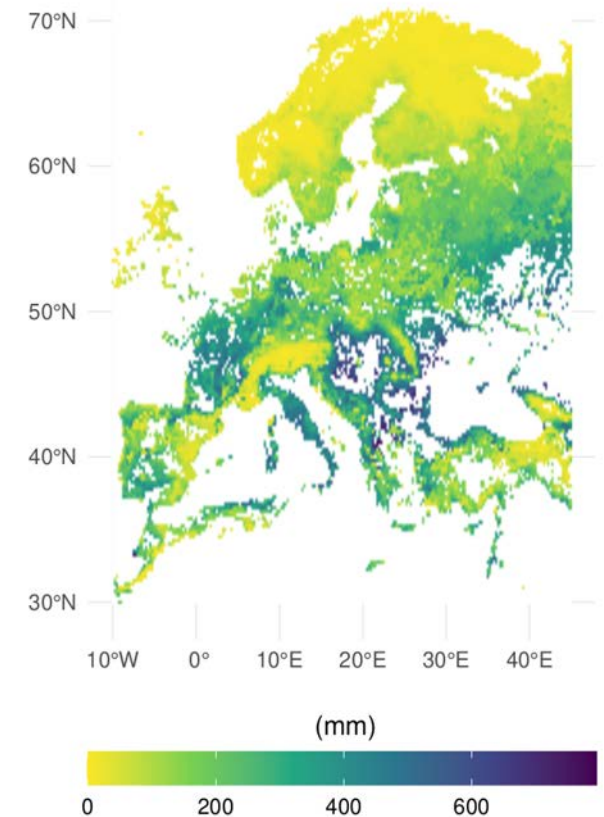
Surface foliaire : PROBA-V

Climat : ERA-5

Surface foliaire



Réserve utile calculée



INRAE

URFM - Druel Arsène

25/04/2023 – Séminaire Forêt, sol et eau, des alliés

> Résultats : application au niveau des forêts européennes

Conditions

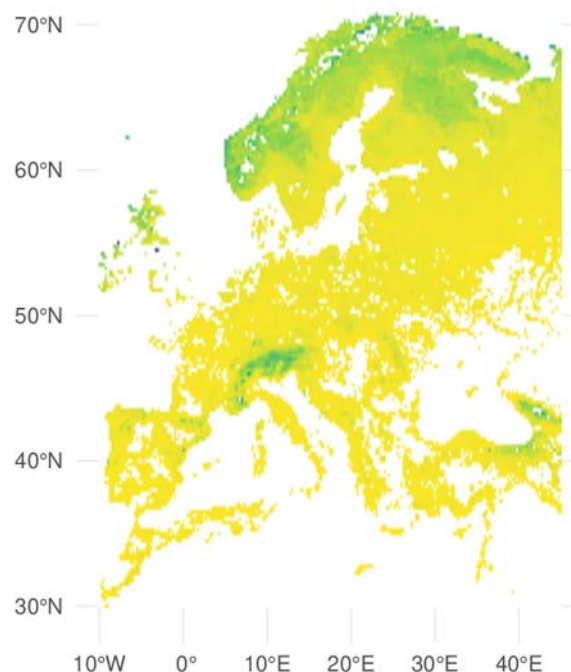
Choix des espèces majoritaires :
suivant Koppen et ESA-CCI land cover

Textures du sol : SoilGrid250

Surface foliaire : PROBA-V

Climat : ERA-5

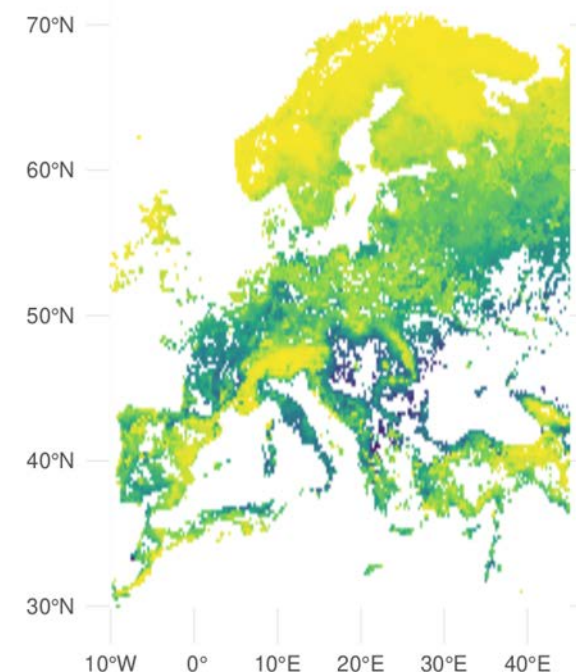
Surface foliaire /
réserve utile



ratio LAI/TAW (-)



Réserve utile calculée



(mm)



INRAE

URFM - Druel Arsène

25/04/2023 – Séminaire Forêt, sol et eau, des alliés

> Résultats : application au niveau des forêts européennes

Risque hydraulique = embolie
Perte de conductance hydraulique (%)

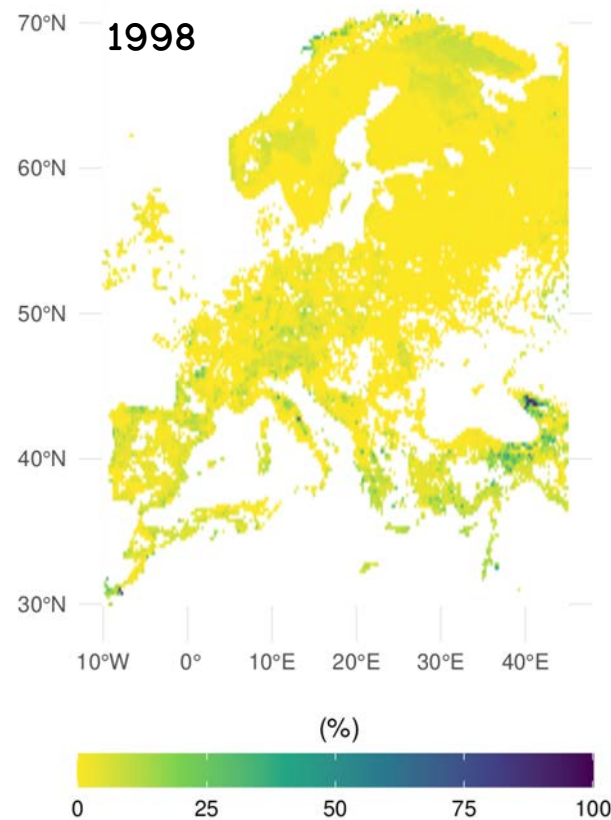
Conditions

Choix des espèces majoritaires :
suivant Koppen et ESA-CCI land cover

Textures du sol : SoilGrid250

Surface foliaire : PROBA-V

Climat : ERA-5



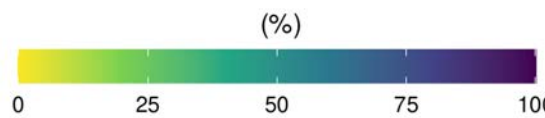
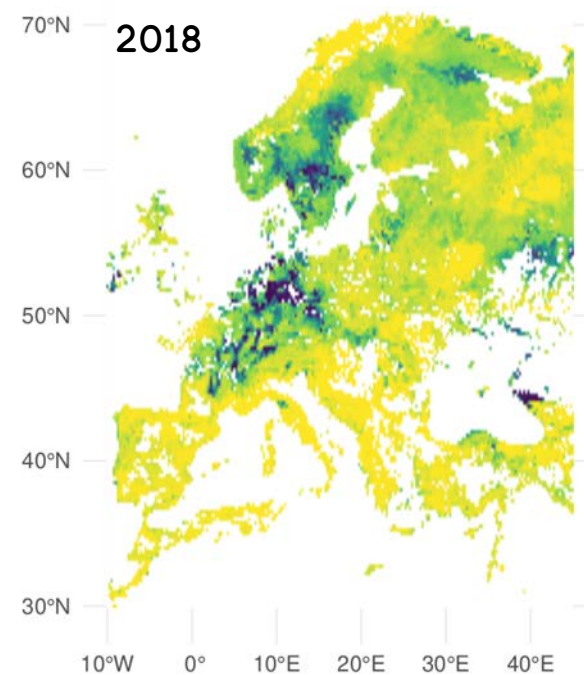
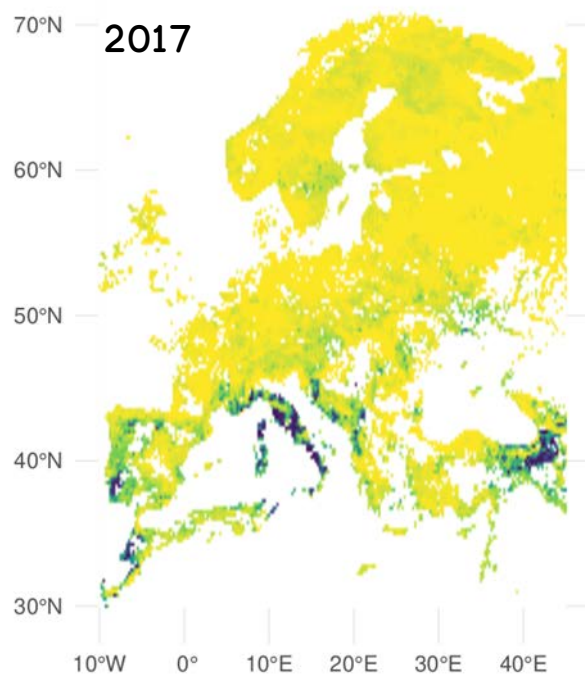
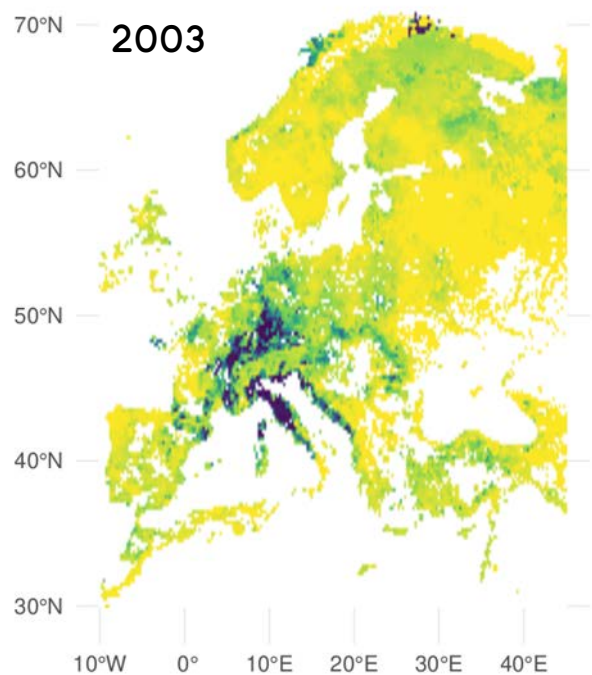
INRAE

URFM - Druel Arsène

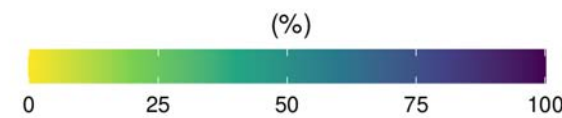
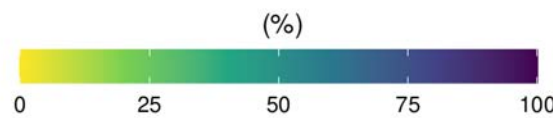
25/04/2023 – Séminaire Forêt, sol et eau, des alli

> Résultats : application au niveau des forêts européennes

Risque hydraulique = embolie
Perte de conductance hydraulique (%)

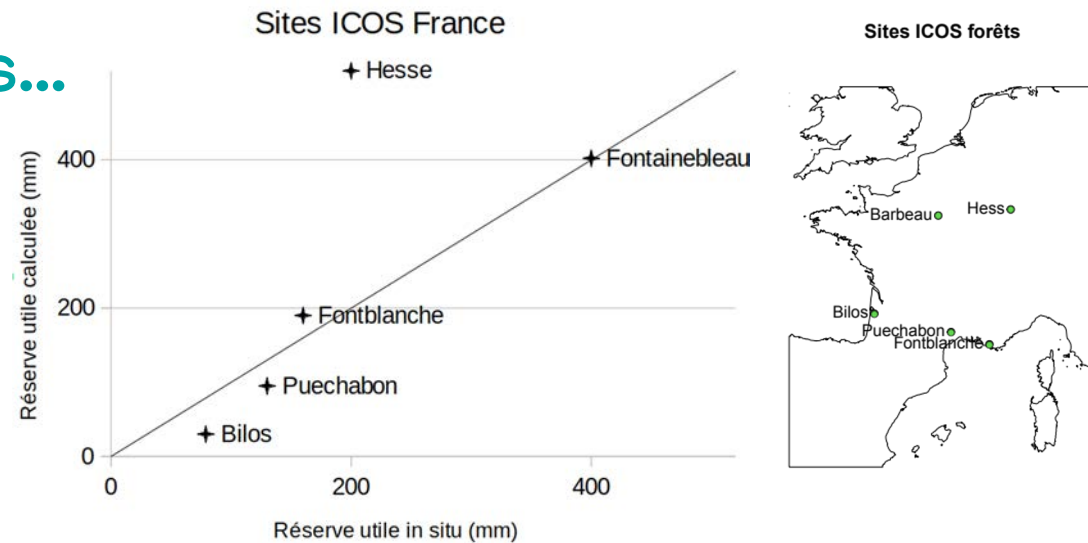


l et eau, des alli

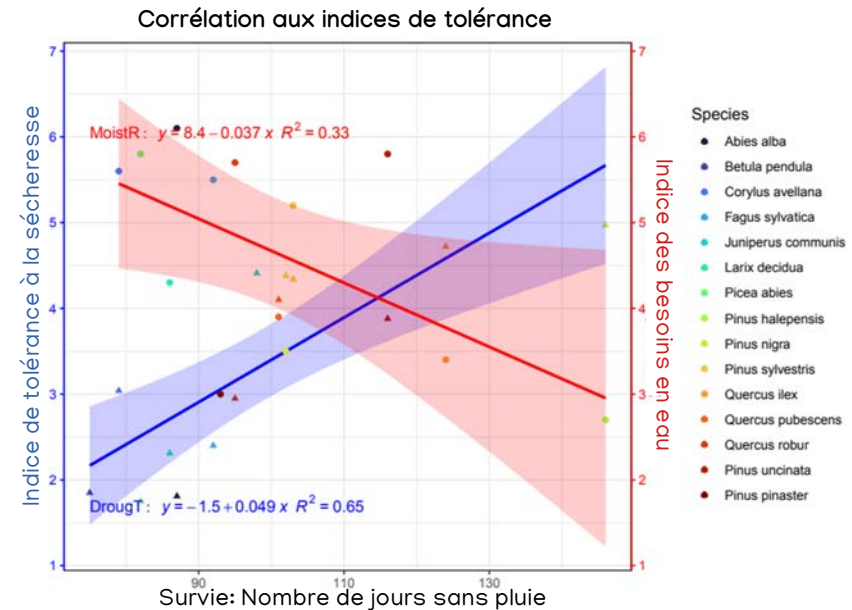


> Validation : en cours...

Réserves utiles calculées
(inversion)
versus RU observées :



Corrélation :
indices de tolérance au stress
hydrique versus nombre de jours de
survie depuis la dernière pluie :



INRAE

URFM - Druel Arsène

25/04/2023 – Séminaire Forêt, sol et eau, des alliés naturels - Marseille

> Conclusion

L'évaluation de la vulnérabilité des forêts méditerranéennes au stress hydrique nécessite de connaître la réserve utile (RU) disponible

Mais il y a un manque de données à large échelle des volumes d'eau disponible pour nos forêts

⇒ Nous avons développé une méthode afin de connaître la RU fonctionnelle d'une forêt, basée sur l'équilibre éco-hydrologique des forêts

Limites :

- Fonctionne lorsque la disponibilité en eau est une contrainte au développement de l'arbre...
- Doit encore être validée au niveau européen (en cours)



INRAE

URFM - Druel Arsène

25/04/2023 – Séminaire Forêt, sol et eau, des alliés naturels - Marseille

Merci à tous pour votre attention

Et merci encore à tous contributeurs et les financeurs (projet européen H2020 FORGENIUS)

arsene.druel@inrae.fr

Arsène Druel - INRAE - URFM - 25/04/2023 - Séminaire Forêt, sol et eau, des alliés naturels - Marseille

