



forêt méditerranéenne



PROGRAMME
DE RECHERCHE
CARBONE ET
ÉCOSYSTÈMES
CONTINENTAUX

FairCarbon

Drought ForC

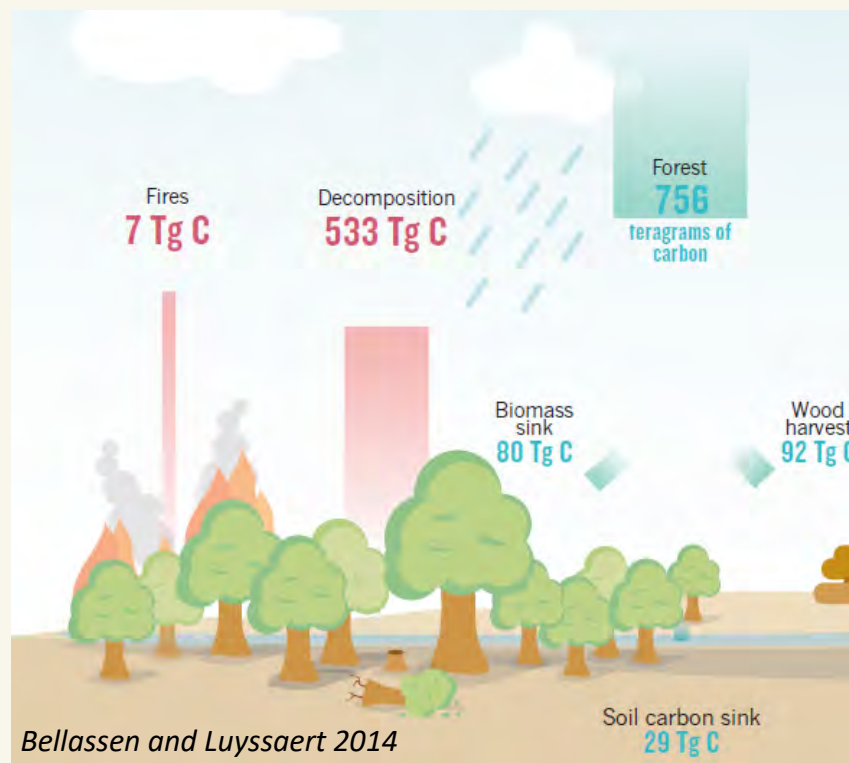
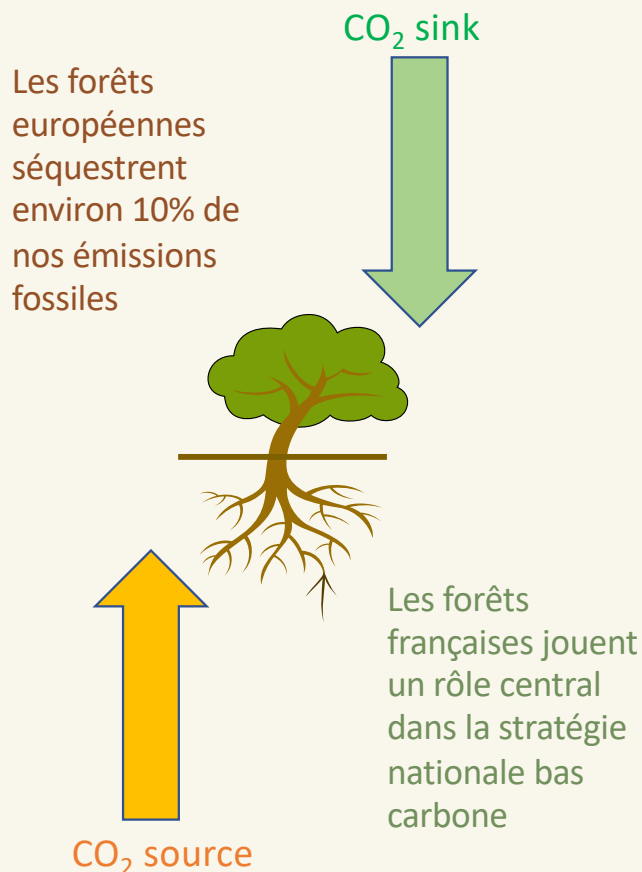
**Impacts de la sécheresse sur les flux et stocks
de carbone des écosystèmes forestiers:
études expérimentales et modélisation**

Mathieu Santonja

Enseignant-chercheur à l'Université d'Aix-Marseille

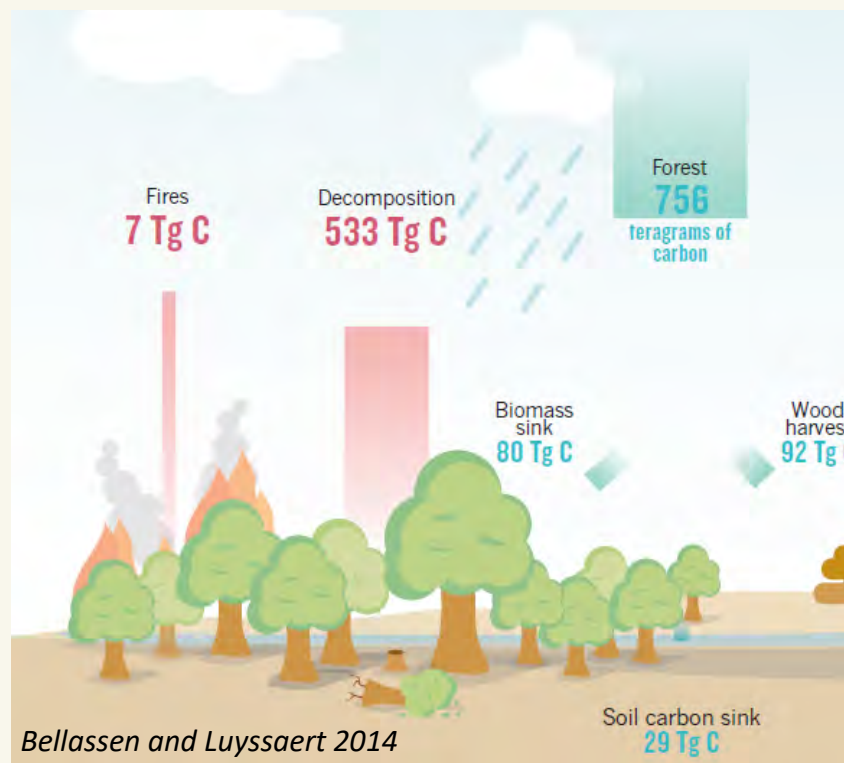
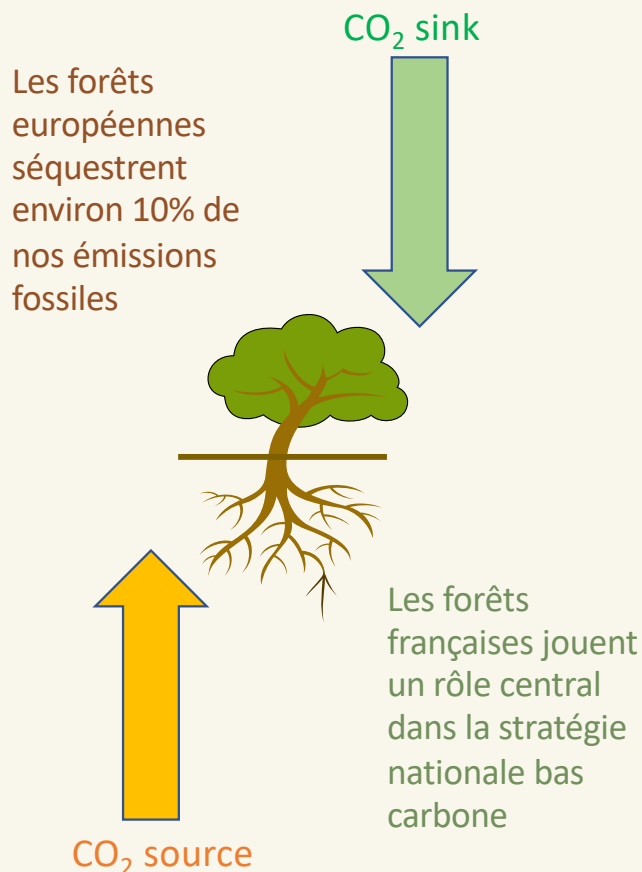
Colloque « Regards sur les sols forestiers méditerranéens » – 12-13 novembre 2025

Quelles trajectoires pour le puit de carbone forestier ?



- + Fertilisation [CO₂]
- + Dépôts azotés
- + Phénologie plus longue
- Evaporation plus rapide
- Précipitations plus faibles
- Perturbations plus fréquentes

Quelles trajectoires pour le puit de carbone forestier ?



- + Fertilisation [CO₂]
- + Dépôts azotés
- + Phénologie plus longue

Sécheresse

- Evaporation plus rapide
- Précipitations plus faibles
- Perturbations plus fréquentes

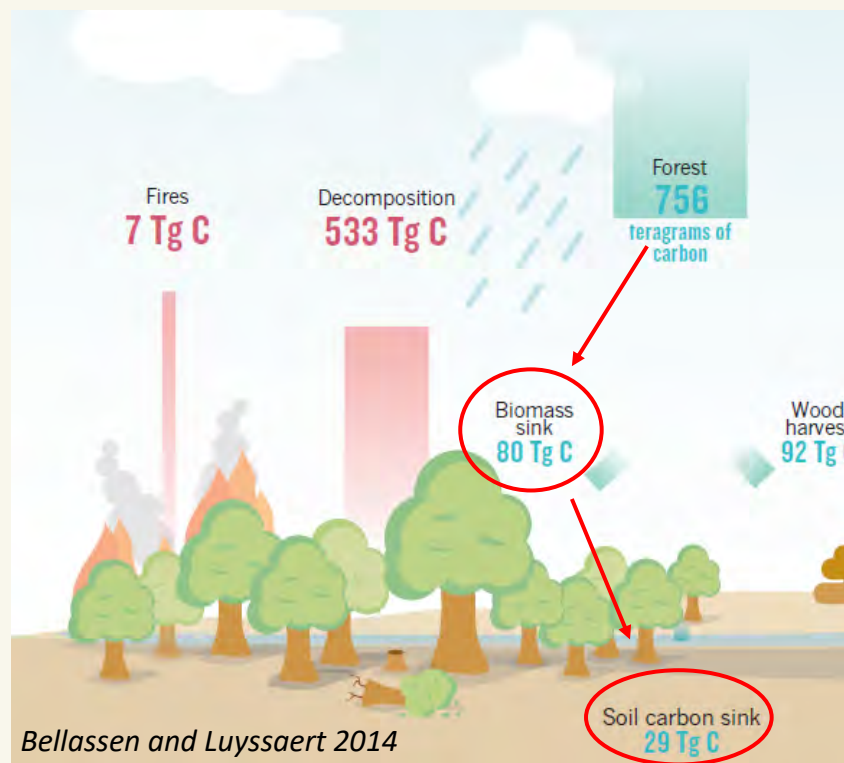
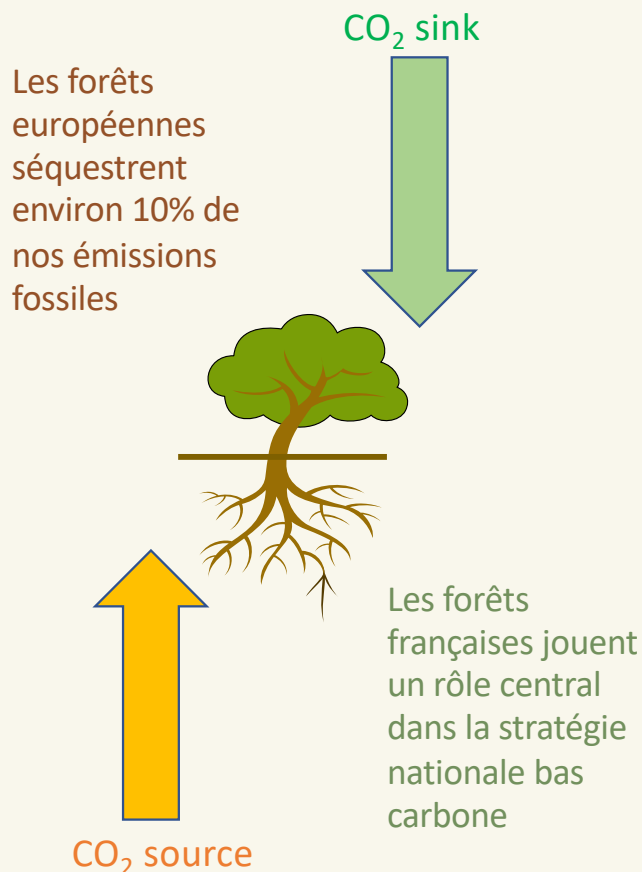


forêt méditerranéenne

Colloque « Regards sur les sols forestiers méditerranéens » – 12 novembre 2025

www.foret-mediterranneenne.org

Quelles trajectoires pour le puit de carbone forestier ?



- + Fertilisation [CO₂]
- + Dépôts azotés
- + Phénologie plus longue

Sécheresse

- Evaporation plus rapide
- Précipitations plus faibles
- Perturbations plus fréquentes



forêt méditerranéenne

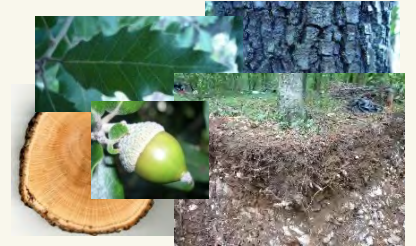
Colloque « Regards sur les sols forestiers méditerranéens » – 12 novembre 2025

www.foret-mediterranneenne.org

Drought ForC – principales questions scientifiques

1) Comment le carbone assimilé par les arbres est-il alloué dans la biomasse vivante ?

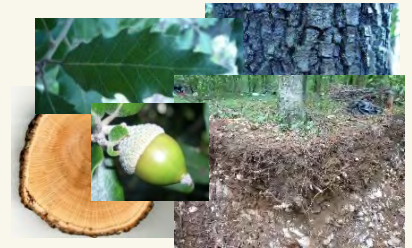
- limitation de la croissance par la photosynthèse ou l'activité cambiale
- effets de la sécheresse sur l'architecture des arbres
- temps de résidence du carbone dans l'écosystème



Drought ForC – principales questions scientifiques

1) Comment le carbone assimilé par les arbres est-il alloué dans la biomasse vivante ?

- limitation de la croissance par la photosynthèse ou l'activité cambiale
- effets de la sécheresse sur l'architecture des arbres
- temps de résidence du carbone dans l'écosystème



2) Comment les changements climatiques affectent-ils la décomposition de la matière organique ?

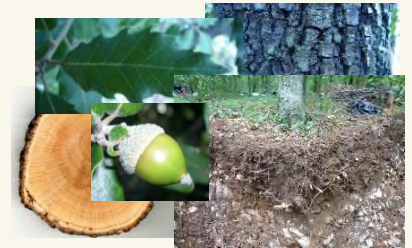
- effets de la sécheresse sur la quantité et la qualité de la matière organique
- effets de la sécheresse et du réchauffement sur l'activité biologique des sols
- changements de stocks de carbone dans le sol



Drought ForC – principales questions scientifiques

1) Comment le carbone assimilé par les arbres est-il alloué dans la biomasse vivante ?

- limitation de la croissance par la photosynthèse ou l'activité cambiale
- effets de la sécheresse sur l'architecture des arbres
- temps de résidence du carbone dans l'écosystème



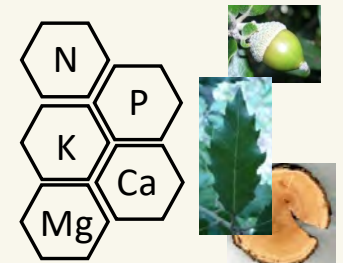
2) Comment les changements climatiques affectent-ils la décomposition de la matière organique ?

- effets de la sécheresse sur la quantité et la qualité de la matière organique
- effets de la sécheresse et du réchauffement sur l'activité biologique des sols
- changements de stocks de carbone dans le sol



3) Comment les limitations nutritives interagissent avec la sécheresse ?

- effets de la sécheresse sur le statut nutritif des arbres et les stocks dans le sol
- effets de la sécheresse sur le recyclage des nutriments
- effets des changements d'allocation de la biomasse sur l'immobilisation des nutriments



Drought ForC – principaux outils mobilisés



Suivi à long-terme des flux de C forestiers

Mesure par eddy covariance des échanges de CO_2 et H_2O entre les forêts et l'atmosphère

→ Réseau de stations écosystème de l'infrastructure ICOS ERIC

→ 5 stations labellisées ICOS dans les forêts françaises

Drought ForC – principaux outils mobilisés



Suivi à long-terme des flux de C forestiers

Mesure par eddy covariance des échanges de CO₂ et H₂O entre les forêts et l'atmosphère

→ Réseau de stations écosystème de l'infrastructure ICOS ERIC

→ 5 stations labellisées ICOS dans les forêts françaises



Expériences de manipulation d'écosystème

Réduction des pluies par gouttières ou par toits mobiles, augmentation de la température du sol

→ Réseau de plateformes expérimentales de l'infrastructure AnaEE

→ 5 expériences d'exclusion de pluie à long-terme dans AnaEE-France

Drought ForC – principaux outils mobilisés



Suivi à long-terme des flux de C forestiers

Mesure par eddy covariance des échanges de CO_2 et H_2O entre les forêts et l'atmosphère

→ Réseau de stations écosystème de l'infrastructure ICOS ERIC

→ 5 stations labellisées ICOS dans les forêts françaises

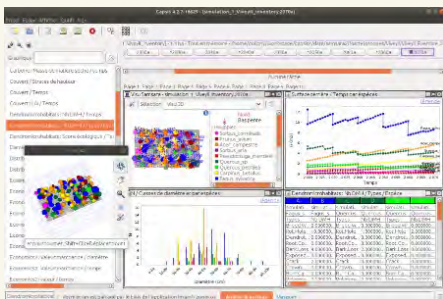


Expériences de manipulation d'écosystème

Réduction des pluies par gouttières ou par toits mobiles, augmentation de la température du sol

→ Réseau de plateformes expérimentales de l'infrastructure AnaEE

→ 5 expériences d'exclusion de pluie à long-terme dans AnaEE-France



Simulations avec des modèles forestiers basés sur les processus

Grande diversité d'hypothèses, de mécanismes et d'échelles dans les modèles forestiers

→ Nombreux modèles développées par la communauté de recherche française

→ 11 modèles forestiers réunis pour la première dans un même projet

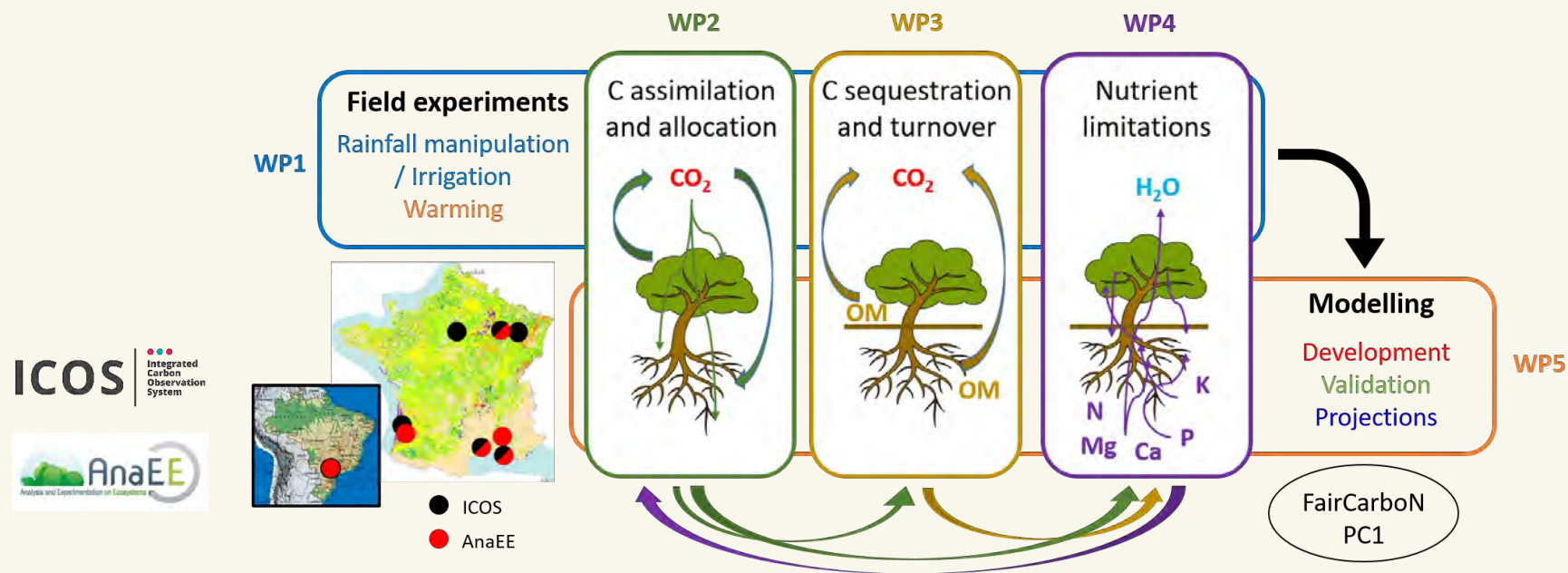


forêt méditerranéenne

Colloque « Regards sur les sols forestiers méditerranéens » – 12 novembre 2025

www.foret-mediterranneenne.org

Drought ForC – organisation du projet



- Un projet fédérateur autour du carbone forestier réunissant 8 sites expérimentaux, 2 infrastructures de recherche et 11 modèles forestiers
- 3 axes de travail thématiques et 2 groupes de travail transversaux autour des outils



forêt méditerranéenne

Colloque « Regards sur les sols forestiers méditerranéens » – 12 novembre 2025

www.foret-mediterranneenne.org

Drought ForC – WP1: protocoles expérimentaux et données

ICOS

Integrated
Carbon
Observation
System

Eddy
covariance

Puéchabon



Font-Blanche



Barbeaux



Bilos



Hesse



Tâches 1.1 & 1.2:

Comparaison des protocoles &
Mise en commun des données
expérimentales AnaEE



Exclusion
de pluies

Puéchabon



Font-Blanche



O3HP



Montiers



Itatinga



Tâche 1.3:

Installation de nouveaux
dispositifs expérimentaux



Chauffage et
sécheresse
du sol

Puéchabon



O3HP



forêt méditerranéenne

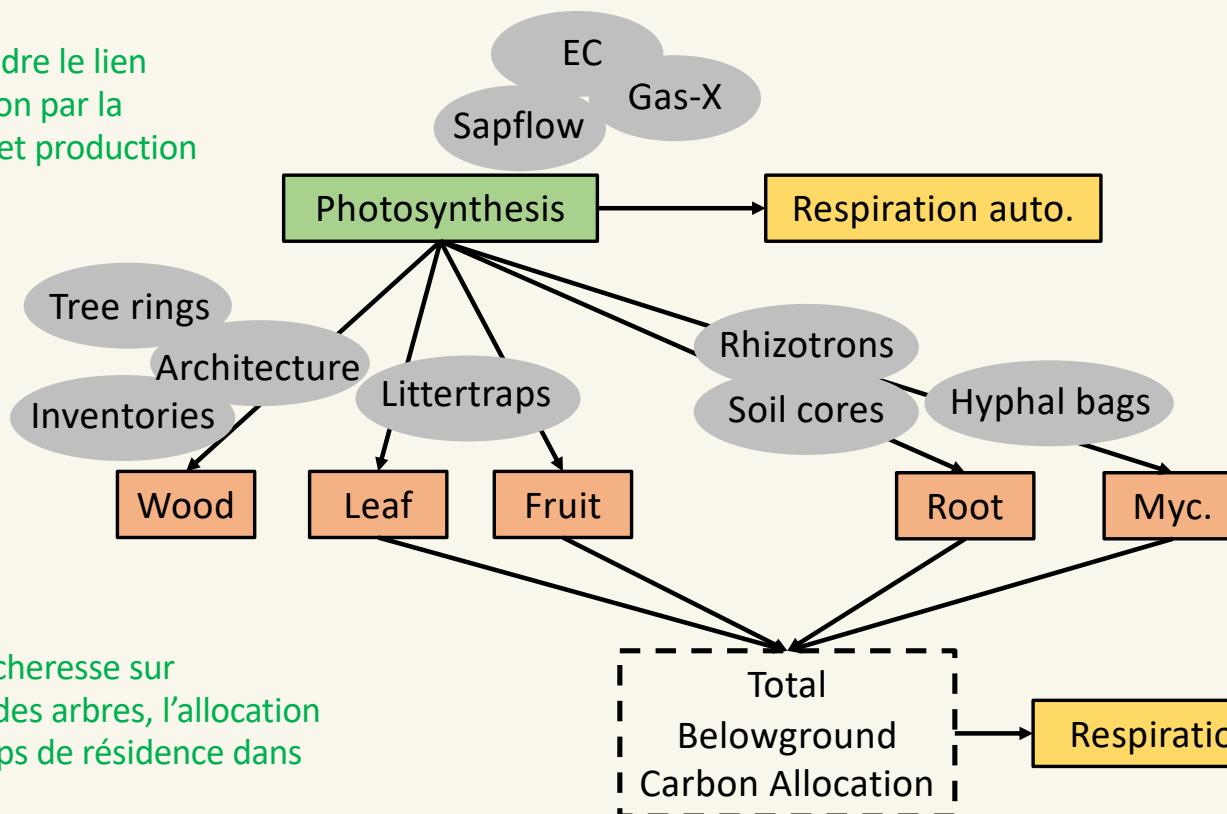
Colloque « Regards sur les sols forestiers méditerranéens » – 12 novembre 2025

www.foret-mediterrannee.org

Drought ForC – WP2: allocation du C dans la biomasse

Tâche 2.1:

Mieux comprendre le lien entre assimilation par la photosynthèse et production de biomasse



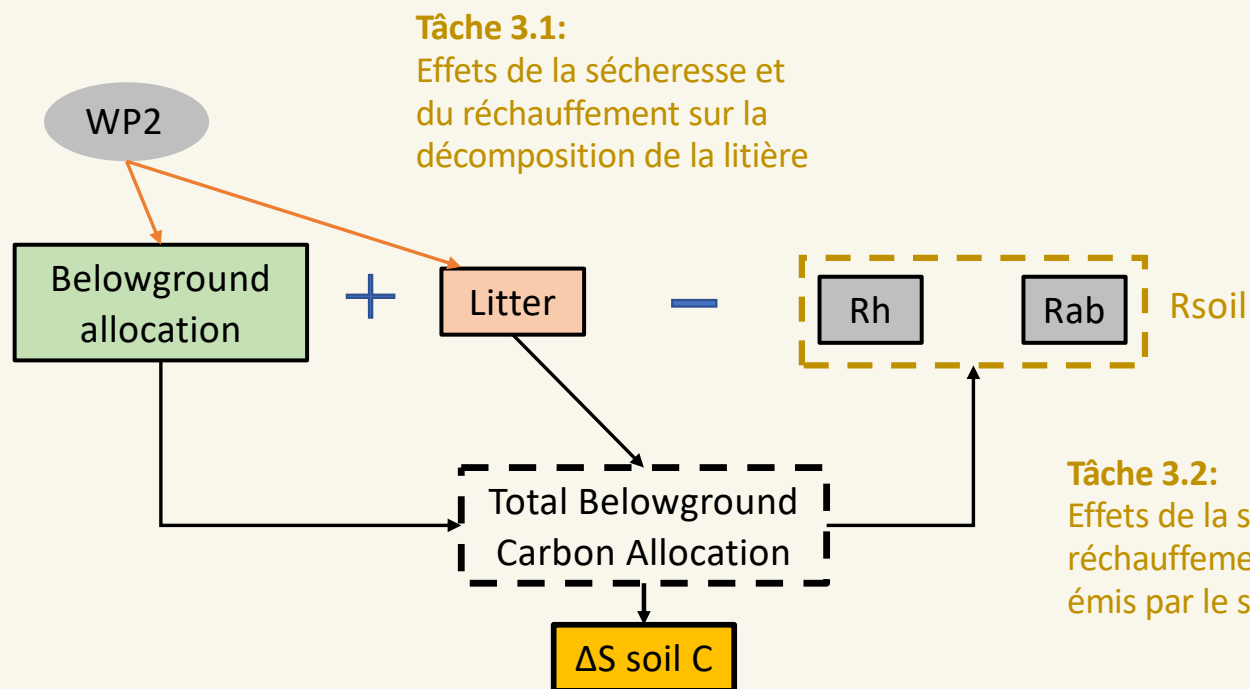
Tâche 2.2:

Effets de la sécheresse sur l'architecture des arbres, l'allocation du C et le temps de résidence dans l'écosystème

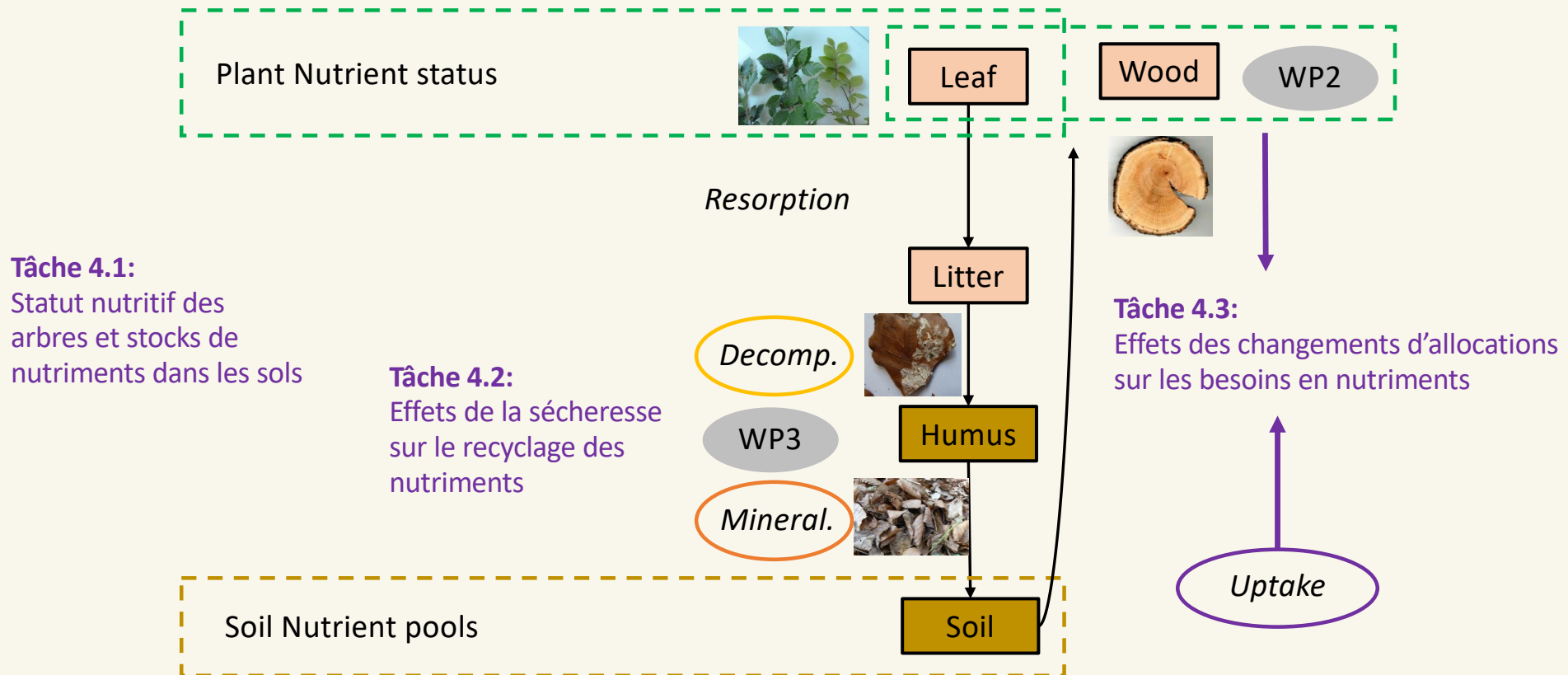
Tâche 2.3:

Quantifier l'allocation de C au compartiment souterrain et sa réponse à la sécheresse

Drought ForC – WP3: Flux et stocks de C dans le sol



Drought ForC – WP4: Sécheresse et limitations nutritives



Drought ForC – WP5: Modélisation des effets de la sécheresse



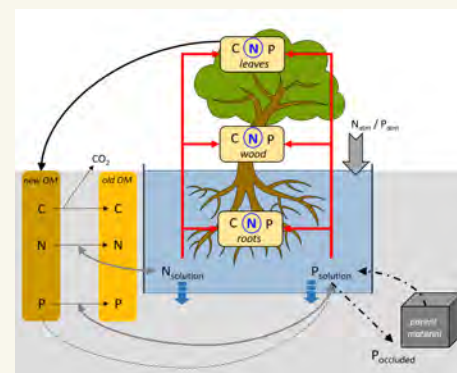
Flux de C
Croissance des arbres
Mortalité
Structure du
peuplement forestier

Tâche 5.1:
Utilisation des résultats
expérimentaux pour calibrer les
modèles et comparer les
résultats avec les traitements
de réduction des pluies

11 Forest Models

Tâche 5.2:
Modélisations
d'ensemble avec
la diversité des
modèles et
projections en
climat futur

Scale	Model	Carbon		Water		Nutrients		
		tree	soil	balance	hydrau.	N	P	K
indiv	NoTG							
indiv	ForCEEPS							
stand + cohort	Go+							
stand + cohort	CASTANEA							
stand	MAESPA							
stand	SurEau							
stand	MuSICA							
stand	PHENOFIT							
stand	Yasso20							
stand	ORCHIDEE							
stand	SALEM							



Tâche 5.3:
Développement
d'un nouveau
modèle prenant en
compte les cycles
C-H₂O-NPK

Drought ForC – Le consortium



Jean-Marc
LIMOUSIN
Coordinator
Co-leader WP1
Co-leader WP2



Xavier
MORIN
Co-leader WP5



Mathieu
SANTONJA
Co-leader WP3



Virginie
BALDY
Co-leader WP3



Marie-Pierre
TURPAULT
Leader WP4



Nicolas
DELPierre
Co-leader WP5



Christian
PICHOT
Co-leader WP1



Maxime
CAILLERET
Co-leader WP2



- **5 partenaires institutionnels :**
CNRS, AMU, INRAE, UPS, CIRAD
- **9 unités de recherche**
impliquées
- **25 chercheurs et 22 IT**

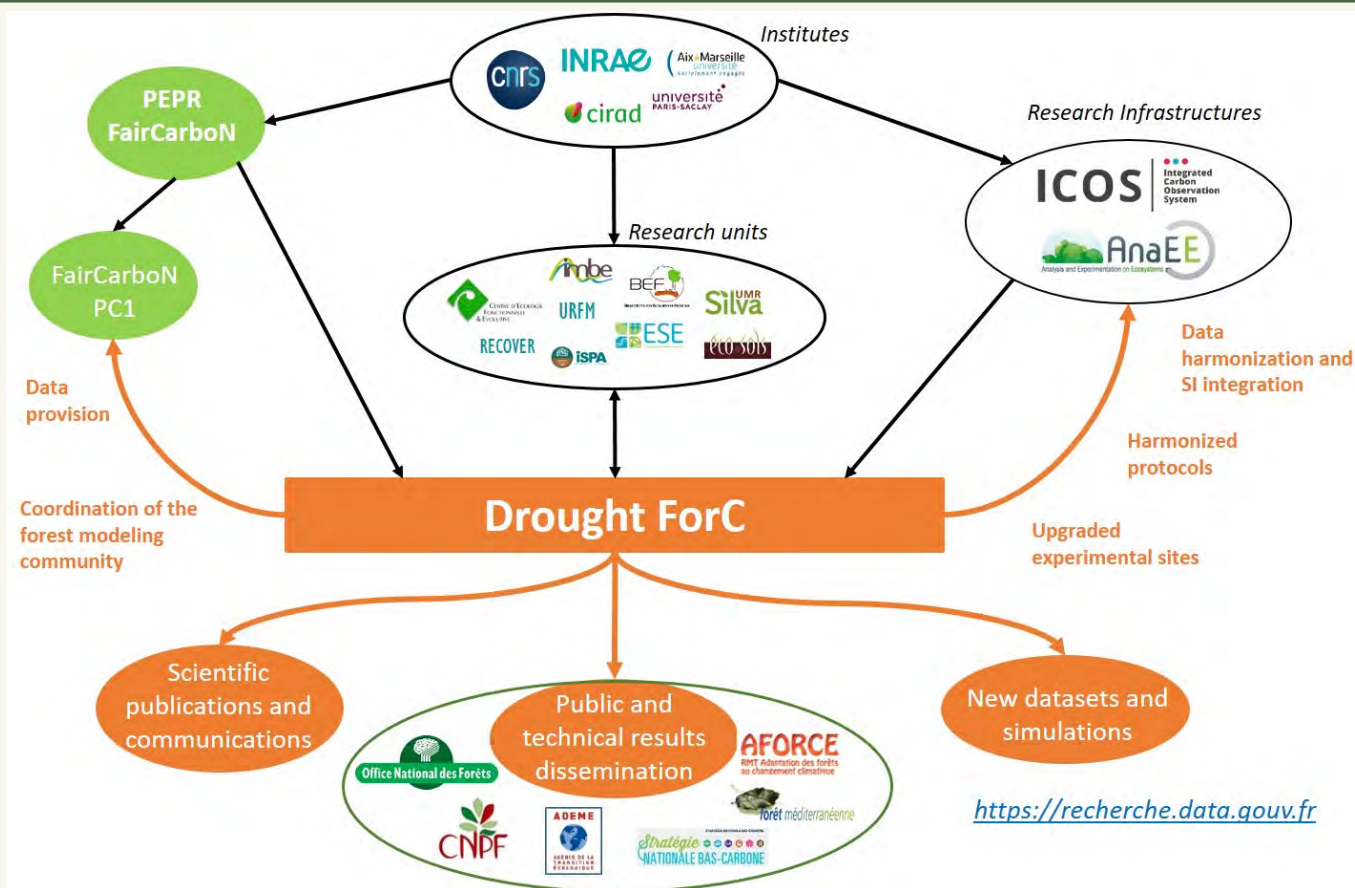


forêt méditerranéenne

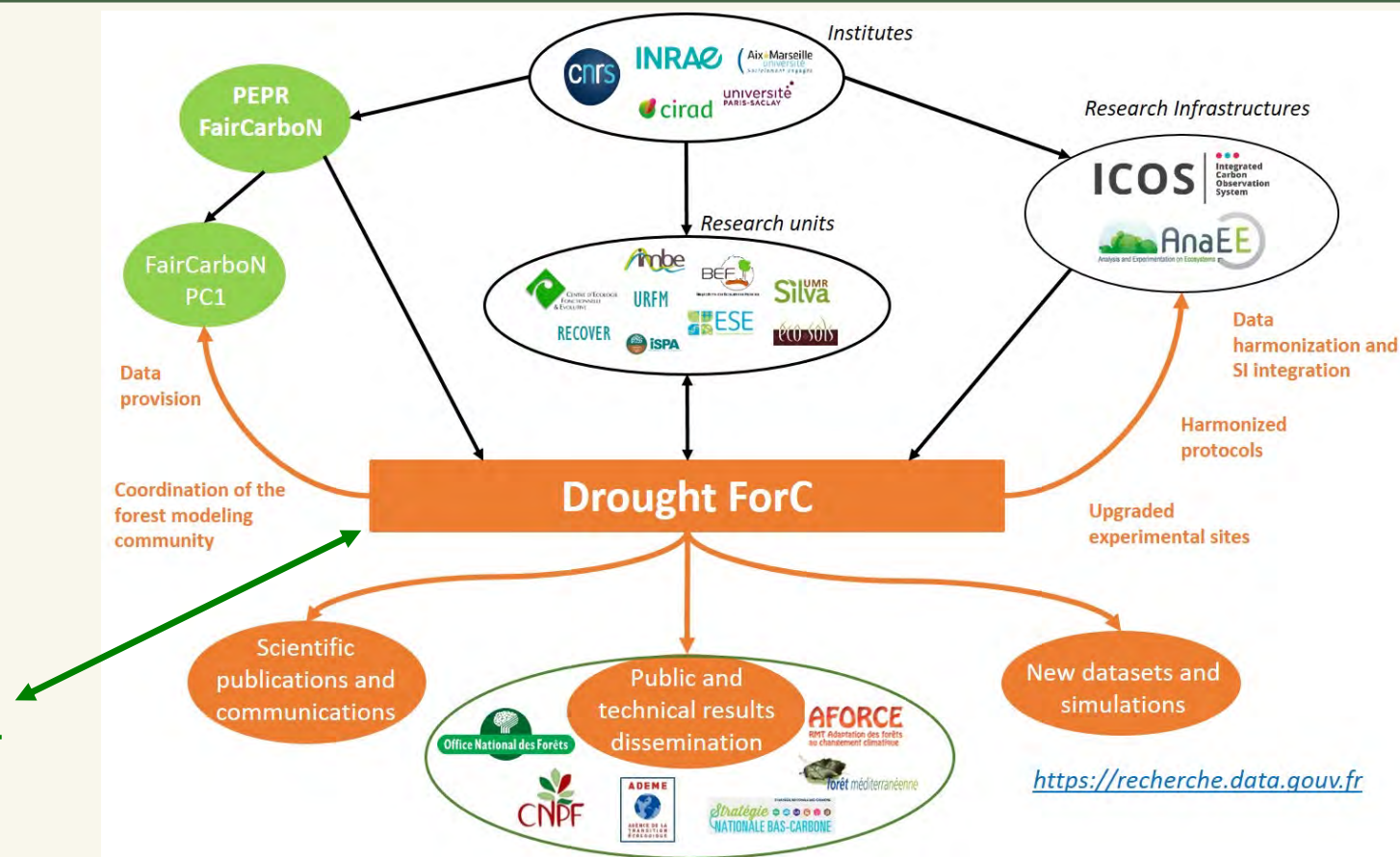
Colloque « Regards sur les sols forestiers méditerranéens » – 12 novembre 2025

www.foret-mediterranneenne.org

Drought ForC – Intégration du projet



Drought ForC – Intégration du projet




PEPR FORESTT
 (Projet BOSFOR)

Drought ForC – Le calendrier

	2023	2024				2025				2026				2027				2028						
	M3	M6	M9	M12	M15	M18	M21	M24	M27	M30	M33	M36	M39	M42	M45	M48	M51	M54	M57	M60				
WP0 - Coordination and animation																								
Task 0.1 - Coordination meetings	K.O.																			Synth				
Task 0.2 - Dissemination																								
WP1 - Experiments and data																								
Task 1.1 - Experimental protocols	D1.1				D1.2																			
Task 1.2 - Datasets					D1.3												D1.4							
Task 1.3 - Soil Warming exp.					D1.5																			
WP2 - C allocation					PhD WP2																			
Task 2.1 - C uptake & wood growth					D2.1								D2.2											
Task 2.2 - Aerial C allocation		M2				D2.3						D2.4												
Task 2.3 - Belowground C allocation						D2.5								D2.6										
WP3 - Soil C and fluxes					PhD WP3																			
Task 3.1 - Litter decomposition														D3.1		D3.2								
Task 3.2 - Soil respiration and BVOC											D3.3				D3.4									
Task 3.3 - Soil C sequestration										D3.5								D3.6						
WP4 - Nutrient limitations									Postdoc WP4															
Task 4.1 - Nutrient status												D4.1		D4.2										
Task 4.2 - Nutrient recycling												D4.3				D4.4								
Task 4.3 - Nutrient immobilization																					D4.5			
WP5 - Modeling					PhD WP5								Postdoc WP5											
Task 5.1 - Model validation														D5.1		D5.2								
Task 5.2 - Model projection																		D5.3		D5.4				
Task 5.3 - NPK modeling		M2															D5.5							

Drought ForC – Le calendrier

	2023		2024				2025				2026				2027				2028			
	M3	M6	M9	M12	M15	M18	M21	M24	M27	M30	M33	M36	M39	M42	M45	M48	M51	M54	M57	M60		
WP0 - Coordination and animation																						
Task 0.1 - Coordination meetings	K.O.																			Synth		
Task 0.2 - Dissemination																						
WP1 - Experiments and data																						
Task 1.1 - Experimental protocols			D1.1		D1.2																	
Task 1.2 - Datasets						D1.3										D1.4						
Task 1.3 - Soil Warming exp.					D1.5																	
WP2 - C allocation			PhD WP2																			
Task 2.1 - C uptake & wood growth						D2.1					D2.2											
Task 2.2 - Aerial C allocation		M2					D2.3					D2.4										
Task 2.3 - Belowground C allocation										D2.5					D2.6							
WP3 - Soil C and fluxes			PhD WP3																			
Task 3.1 - Litter decomposition													D3.1		D3.2							
Task 3.2 - Soil respiration and BVOC											D3.3			D3.4								
Task 3.3 - Soil C sequestration									D3.5								D3.6					
WP4 - Nutrient limitations			Postdoc WP4																			
Task 4.1 - Nutrient status											D4.1		D4.2									
Focus sur le WP3 – Flux et stocks de carbone dans le sol																						
Task 5.3 - NPK modeling		M2													D5.5							

Focus sur le WP3 – Flux et stocks de carbone dans le sol

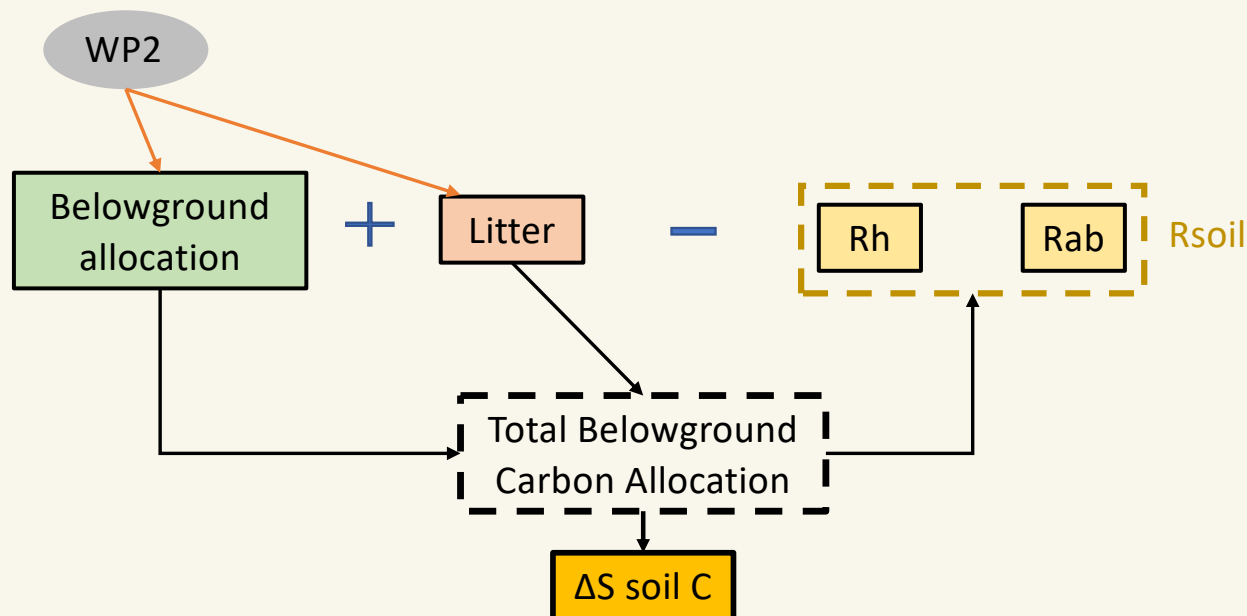


forêt méditerranéenne

Colloque « Regards sur les sols forestiers méditerranéens » – 12 novembre 2025

www.foret-mediterranneenne.org

Drought ForC – WP3: Flux et stocks de C dans le sol



Tâche 3.1:

Effets de la sécheresse et du réchauffement sur la décomposition de la litière

Tâche 3.2:

Effets de la sécheresse et du réchauffement sur le flux de C émis par le sol (CO_2 + COVB)

Tâche 3.3:

Effets de la sécheresse et du réchauffement sur la séquestration de C dans le sol forestier

Drought ForC – WP3: Flux et stocks de C dans le sol

Tâche 3.1: Effets de la sécheresse et du réchauffement sur la décomposition de la litière

- 3 expériences de décomposition des litières
 - Sites ICOS
 - Sites d'exclusion de pluie « long terme »
 - Nouveaux dispositifs expérimentaux

ICOS | Integrated Carbon Observation System

Eddy covariance



Exclusion de pluies
« long terme »



Chauffage et sécheresse du sol

Drought ForC – WP3: Flux et stocks de C dans le sol

Tâche 3.1: Effets de la sécheresse et du réchauffement sur la décomposition de la litière

- 3 expériences de décomposition des litières
 - Sites ICOS
 - Sites d'exclusion de pluie « long terme »
 - Nouveaux dispositifs expérimentaux
- Décomposition de la MO et perte du C et des nutriments (N, P, K, Ca, Mg, Na, S)



WP4

ICOS

Integrated
Carbon
Observation
System

Eddy
covariance

AnaEE

Exclusion de
pluies
« long terme »

AnaEE

Chauffage et
sécheresse du
sol



forêt méditerranéenne

Colloque « Regards sur les sols forestiers méditerranéens » – 12 novembre 2025

www.foret-mediterraneenne.org

Drought ForC – WP3: Flux et stocks de C dans le sol

Tâche 3.1: Effets de la sécheresse et du réchauffement sur la décomposition de la litière

- 3 expériences de décomposition des litières
 - Sites ICOS
 - Sites d'exclusion de pluie « long terme »
 - Nouveaux dispositifs expérimentaux

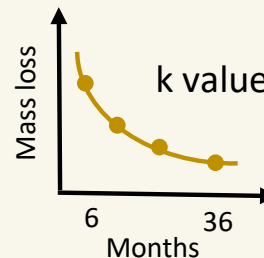


- Décomposition de la MO et perte du C et des nutriments (N, P, K, Ca, Mg, Na, S)



WP4

- Expériences sur 3 ans en litterbags (2 échantillonnages par an)



WP5

Drought ForC – WP3: Flux et stocks de C dans le sol

Tâche 3.1: Effets de la sécheresse et du réchauffement sur la décomposition de la litière

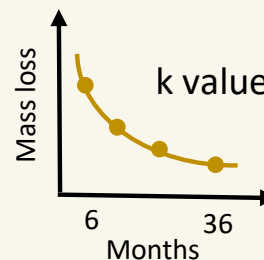
- 3 expériences de décomposition des litières
 - Sites ICOS
 - Sites d'exclusion de pluie « long terme »
 - Nouveaux dispositifs expérimentaux



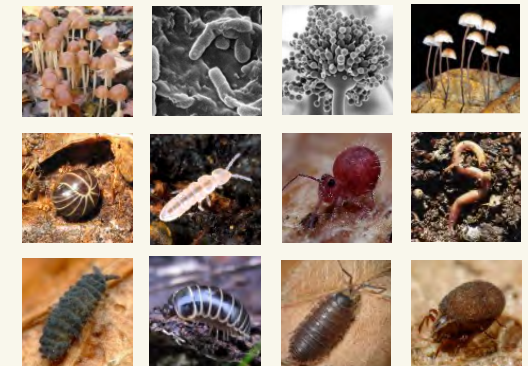
- Décomposition de la MO et perte du C et des nutriments (N, P, K, Ca, Mg, Na, S)
- Expériences sur 3 ans en litterbags (2 échantillonnages par an)
- Contribution des microorganismes et de la faune du sol (2 mailles : 125 μ m vs. 5 mm)



WP4



WP5



Drought ForC – WP3: Flux et stocks de C dans le sol

Tâche 3.1: Effets de la sécheresse et du réchauffement sur la décomposition de la litière

- Récolte des feuilles/aiguilles en fonction de la phénologie (i.e. à partir d'**Octobre/Novembre 2024** pour les décidus)
- Expérience de décomposition des litières sur 3 ans en litterbags à partir de **Novembre/Décembre 2024**

Barbeau



Hesse



O3HP



Montiers



Décidus caducifoliés
(Chênes, charmes, hêtres)
R= Oct/Nov - Exp= Nov/Dec

Fontblanche



Puéchabon



Décidus sempervirents
(Chênes)
R= Avr/Mai - Exp= Mai/Juin

Fontblanche



Bilos



Conifères sempervirents
(Pins)
R= Juin/Juil - Exp= Juil/Aout



forêt méditerranéenne

Colloque « Regards sur les sols forestiers méditerranéens » – 12 novembre 2025

www.foret-mediterrannee.org

Drought ForC – WP3: Flux et stocks de C dans le sol

Tâche 3.2: Effets de la sécheresse et du réchauffement sur le flux de C émis par le sol (CO₂ + COVB)

- Emissions de CO₂
 - Mesures automatiques (LI-COR system)
 - Campagnes de mesures ponctuelles (EGM5 / PP system)
 - Inter-calibration entre systèmes et sites d'étude

Drought ForC – WP3: Flux et stocks de C dans le sol

Tâche 3.2: Effets de la sécheresse et du réchauffement sur le flux de C émis par le sol (CO₂ + COVB)

- Emissions de CO₂
 - Mesures automatiques (LI-COR system)
 - Campagnes de mesures ponctuelles (EGM5 / PP system)
 - Inter-calibration entre systèmes et sites d'étude
- Emissions de COVB [nouveaux dispositifs chauffage x exclusion de pluie]
 - Campagnes de mesures ponctuelles effectuées à l'aide de chambres dynamiques "pull-push" placées sur le sol
 - PTRMS (*in situ*)



Campagnes prévues en **été 2026**
en collaboration avec le LCE de Marseille
(Plateforme Massalya, <https://lce.univ-amu.fr/fr/massalya>)



Drought ForC – WP3: Flux et stocks de C dans le sol

Tache 3.3: Effets de la sécheresse et du réchauffement sur la séquestration de C dans le sol forestier

- Une campagne durant le projet
 - Sites ICOS
 - Sites d'exclusion de pluie « long terme »
 - ➡ Stocks de C dans les différents horizons organique, organo-minéral et minéral
 - ➡ Comparaison avec précédents relevés



Campagne de prélèvement effectuée au **printemps 2024**

Drought ForC – WP3: Flux et stocks de C dans le sol

- 3 sites expérimentaux forestiers méditerranéens
 - FontBlanche (pin d'Alep)
 - O3HP (chêne pubescent)
 - Puéchabon (chêne vert)



Drought ForC – WP3: Flux et stocks de C dans le sol

- 3 sites expérimentaux forestiers méditerranéens
 - FontBlanche (pin d'Alep)
 - O3HP (chêne pubescent)
 - Puéchabon (chêne vert)
- Impacts d'une simulation du changement climatique sur l'activité biologique et la dynamique du carbone associée
 - Le processus de décomposition de la litière
 - Les émissions de CO₂ et de COVB
 - La séquestration du carbone dans les sols

Drought ForC – WP3: Flux et stocks de C dans le sol

- 3 sites expérimentaux forestiers méditerranéens
 - FontBlanche (pin d'Alep)
 - O3HP (chêne pubescent)
 - Puéchabon (chêne vert)
- Impacts d'une simulation du changement climatique sur l'activité biologique et la dynamique du carbone associée
 - Le processus de décomposition de la litière
 - Les émissions de CO₂ et de COVB
 - La séquestration du carbone dans les sols
- Réponse à des manipulations pluviométriques long terme présentes sur les 3 sites forestiers
 - ➡ Approche diachronique des effets de la sécheresse sur la biodiversité des sols

Drought ForC – WP3: Flux et stocks de C dans le sol

- 3 sites expérimentaux forestiers méditerranéens
 - FontBlanche (pin d'Alep)
 - O3HP (chêne pubescent)
 - Puéchabon (chêne vert)
- Impacts d'une simulation du changement climatique sur l'activité biologique et la dynamique du carbone associée
 - Le processus de décomposition de la litière
 - Les émissions de CO₂ et de COVB
 - La séquestration du carbone dans les sols
- Réponse à des manipulations pluviométriques long terme présentes sur les 3 sites forestiers
 - ➡ Approche diachronique des effets de la sécheresse sur la biodiversité des sols
- Réponse aux effets isolés et interactifs de la sécheresse et du réchauffement dans de nouveaux dispositifs
 - ➡ Meilleure compréhension de l'effet du changement climatique sur le compartiment sol.

Drought ForC – WP3: Flux et stocks de C dans le sol

- 3 sites expérimentaux forestiers méditerranéens
 - FontBlanche (pin d'Alep)
 - O3HP (chêne pubescent)
 - Puéchabon (chêne vert)
- Impacts d'une simulation du changement climatique sur l'activité biologique et la dynamique du carbone associée
 - Le processus de décomposition de la litière
 - Les émissions de CO₂ et de COVB
 - La séquestration du carbone dans les sols

Thèse de Joséphine HUET qui a débutée le 01 octobre 2025

« Découplage expérimental des effets de la sécheresse et du réchauffement climatique sur l'activité biologique et la dynamique du carbone dans les sols forestiers méditerranéens »



forêt méditerranéenne

Informier, Échanger, Rassembler, Proposer

Colloque organisé avec le soutien de

**RÉGION
SUD**



**PROVENCE
ALPES
CÔTE D'AZUR**



**DÉPARTEMENT
BOUCHES
DU RHÔNE**



**METROPOLE
AIX
MARSEILLE
PROVENCE**



**MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE,
DE LA BIODIVERSITÉ,
DE LA FORÊT, DE LA MER
ET DE LA PÊCHE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



**MINISTÈRE
DE L'AGRICULTURE
ET DE LA SOUVERAINETÉ
ALIMENTAIRE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

www.foret-mediterraneeenne.org