



PROGRAMME
DE RECHERCHE
CARBONE ET
ÉCOSYSTÈMES
CONTINENTAUX

Drought ForC

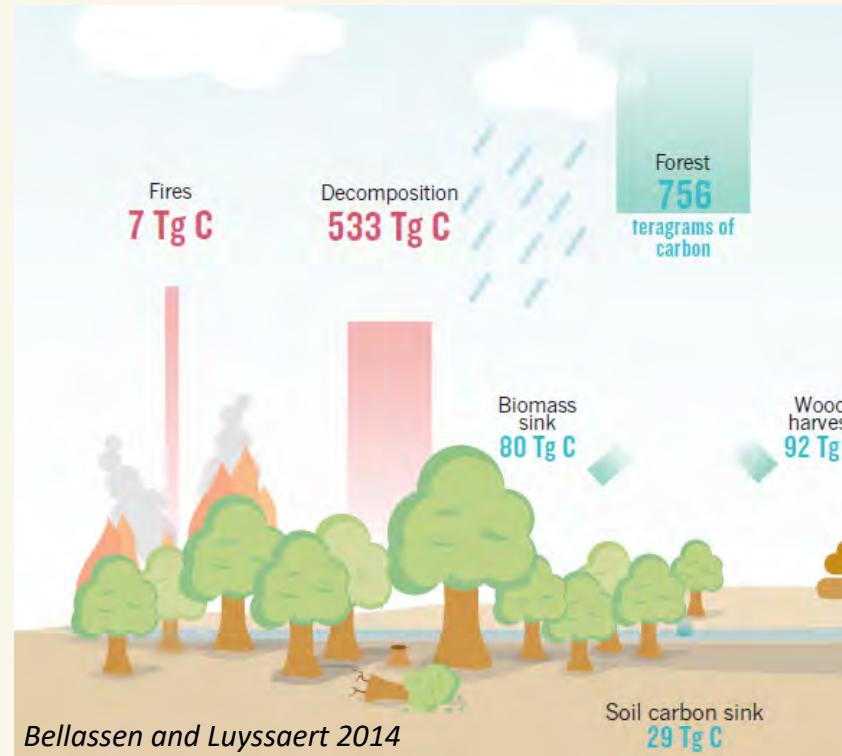
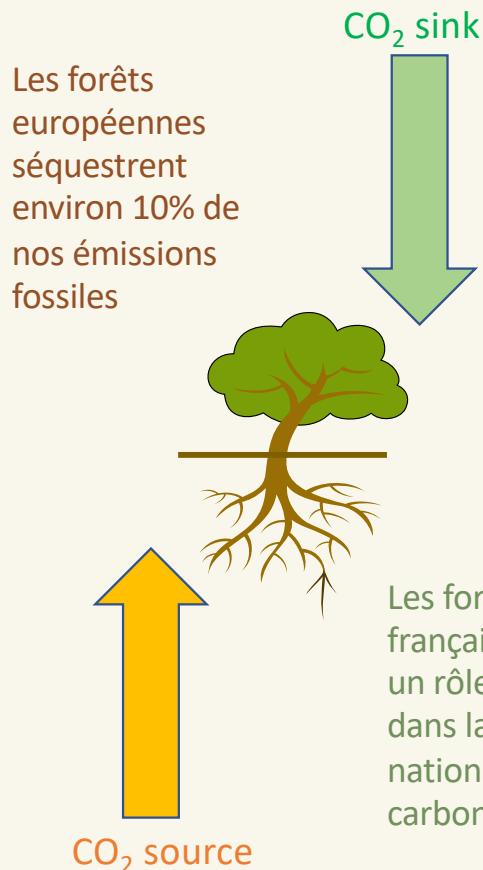
**Impacts de la sécheresse sur les flux et stocks
de carbone des écosystèmes forestiers:
études expérimentales et modélisation**

FairCarboN

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

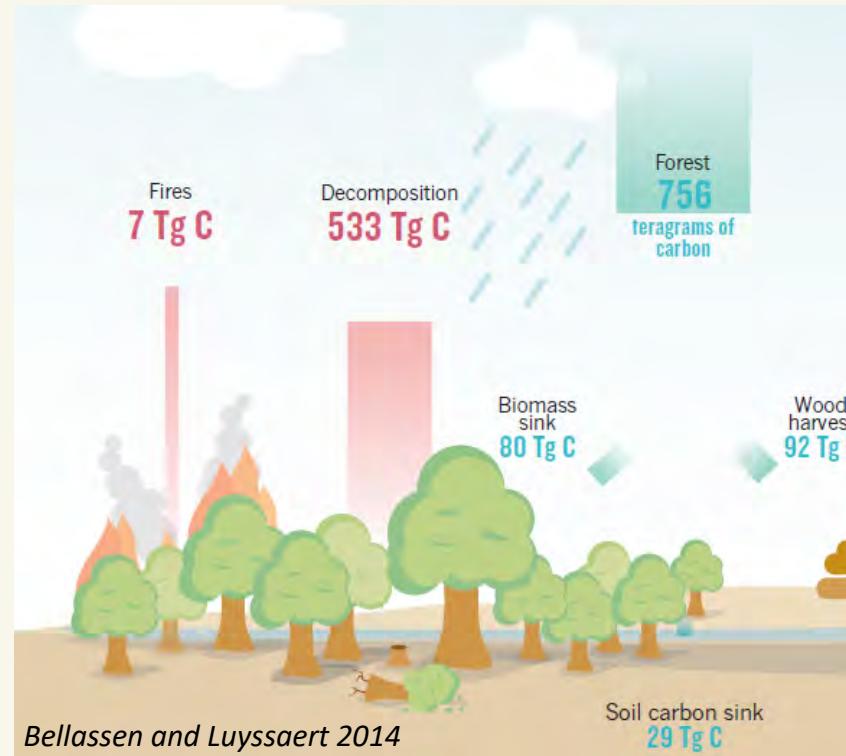
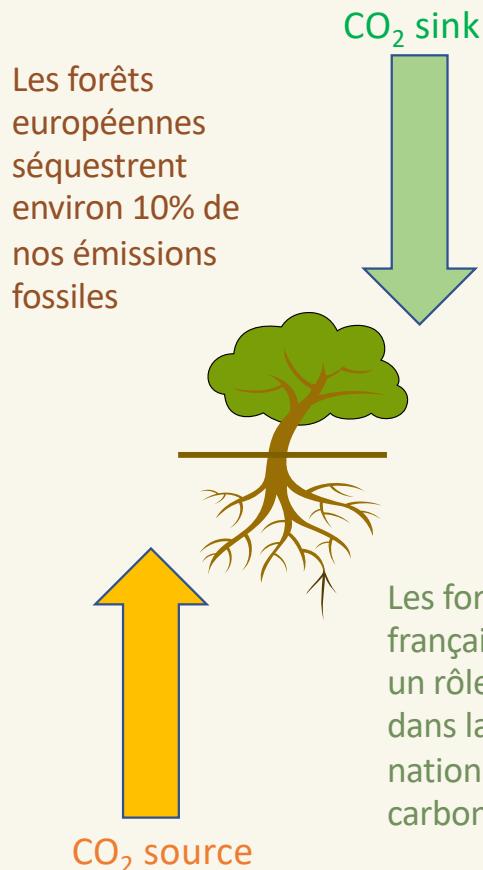
Colloque « Regards sur les sols forestiers méditerranéens » – 12-13 novembre 2025

Quelles trajectoires pour le puit de carbone forestier ?



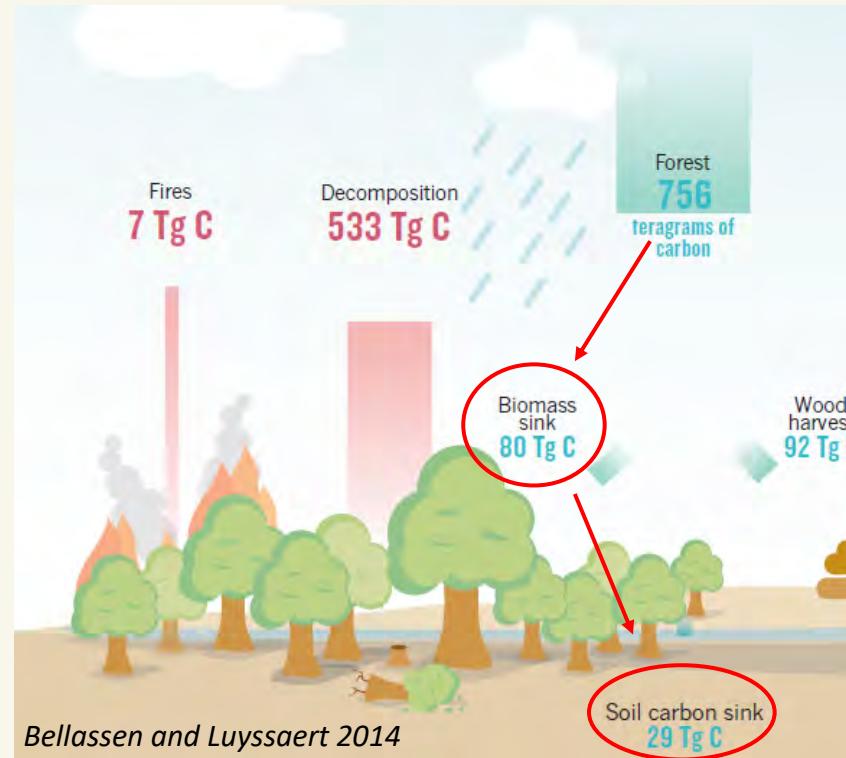
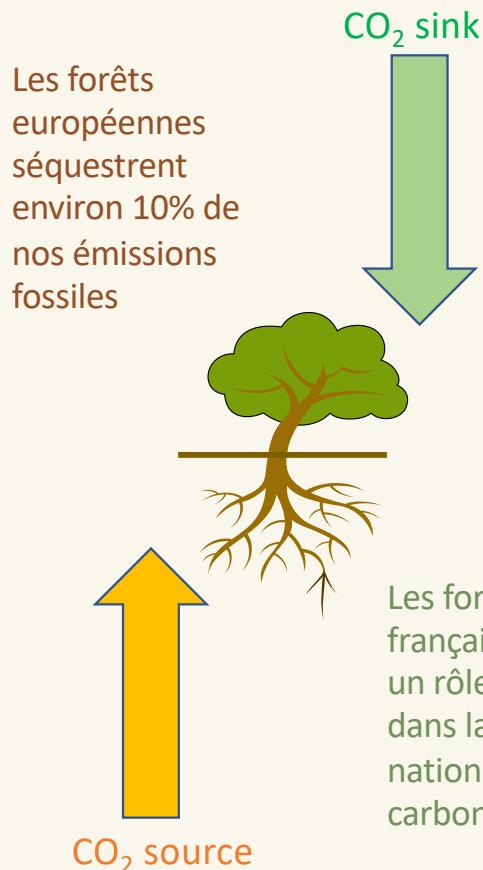
- + Fertilisation [CO₂]
- + Dépôts azotés
- + Phénologie plus longue
- Evaporation plus rapide
- Précipitations plus faibles
- Perturbations plus fréquentes

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

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

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*



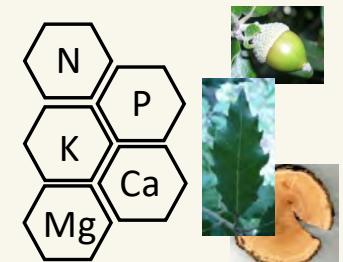
2) Comment les changements climatiques affectent-ils la décomposition de la matière organique ?

- *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 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

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



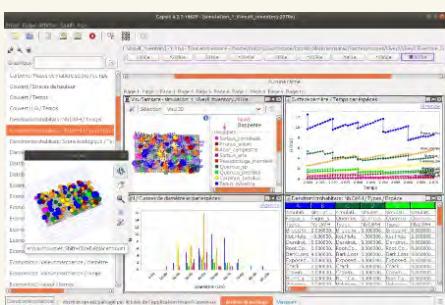
Suivi à long-terme des flux de C forestiers

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

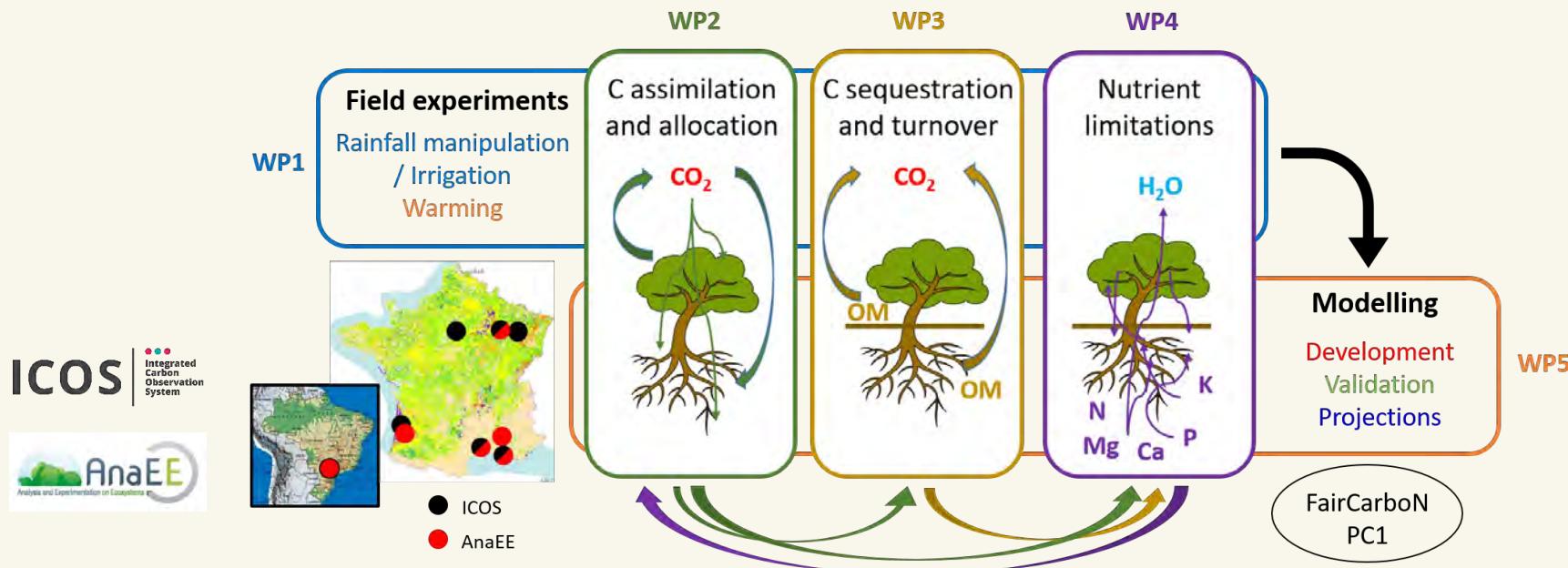
Réduction des pluies par gouttières ou par toits mobiles, augmentation de la température du sol
→ Réseau de plateformes expérimentales de l'infrastructure AnaEE
→ 5 expériences d'exclusion de pluie à long-terme dans AnaEE-France



Simulations avec des modèles forestiers basés sur les processus

Grande diversité d'hypothèses, de mécanismes et d'échelles dans les modèles forestiers
→ Nombreux modèles développés par la communauté de recherche française
→ 11 modèles forestiers réunis pour la première fois dans un même projet

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

Drought ForC – WP1: protocoles expérimentaux et données



Integrated
Ecosystem
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



Chaussage et
sécheresse
du sol

Puéchabon



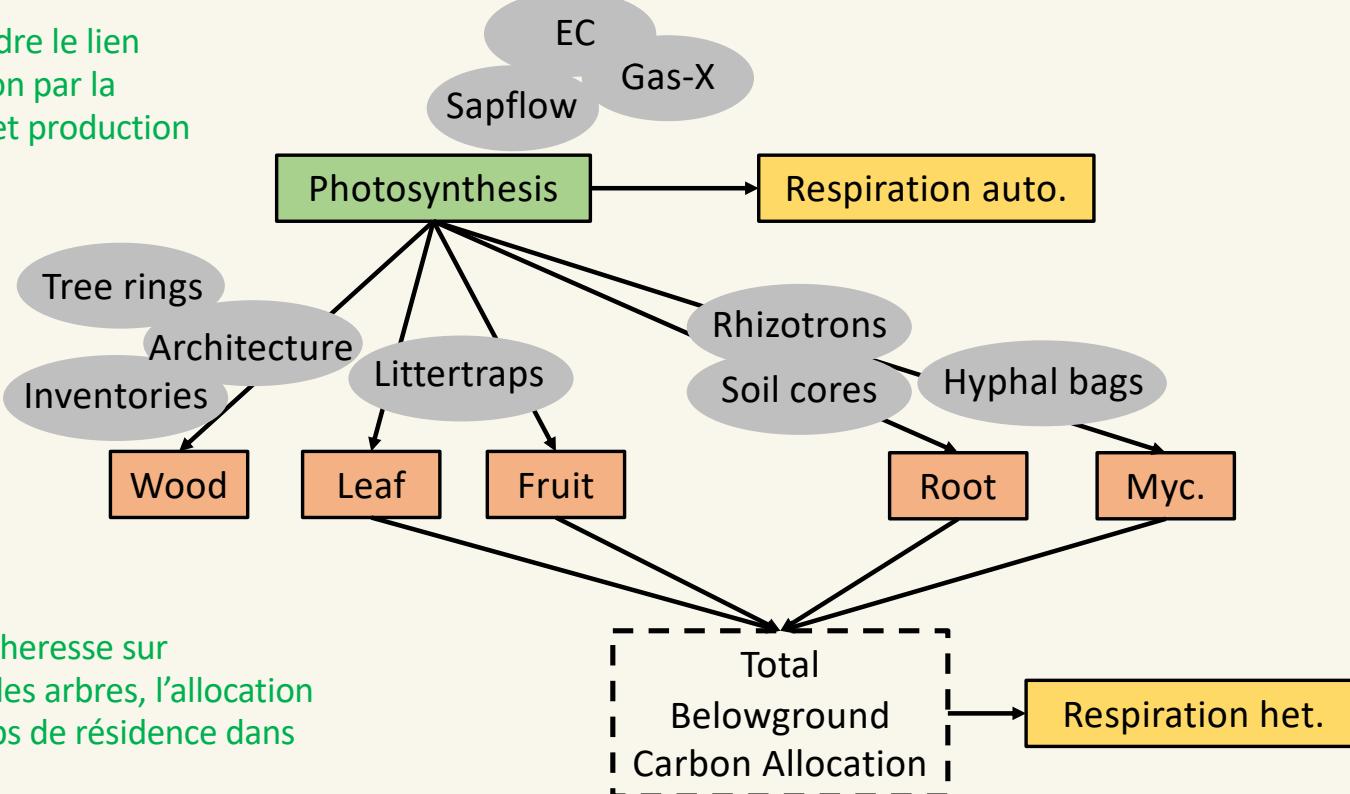
O3HP



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



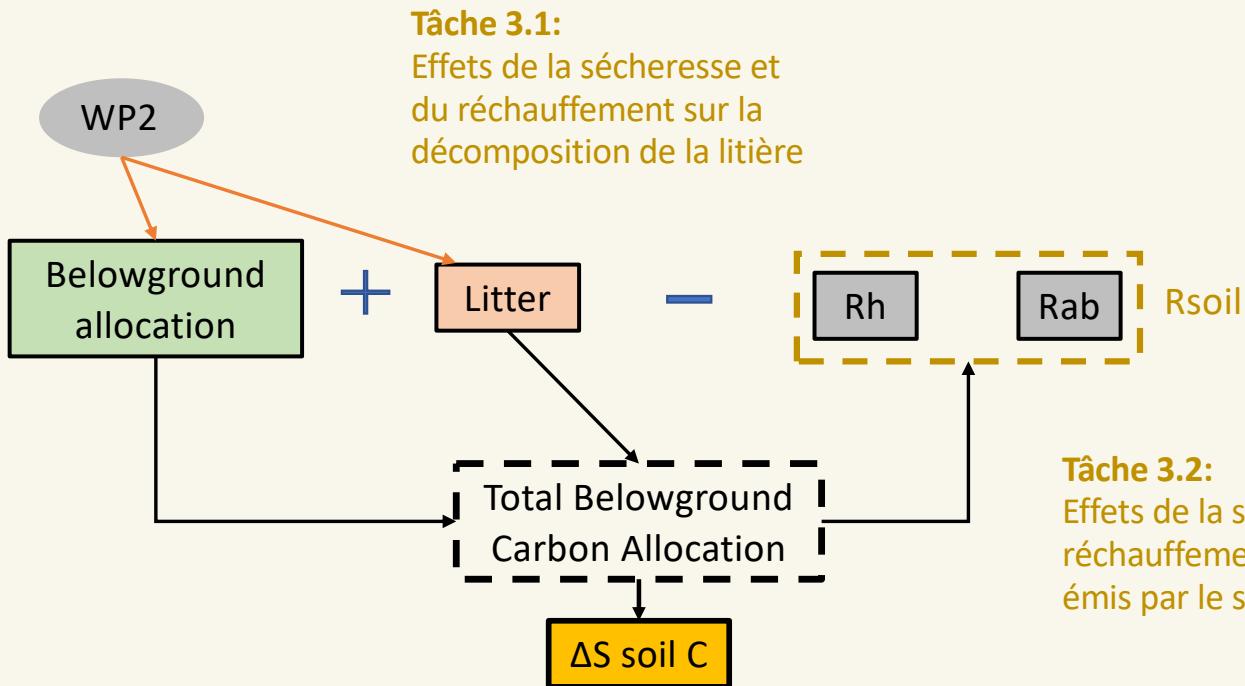
Tâche 2.2:

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

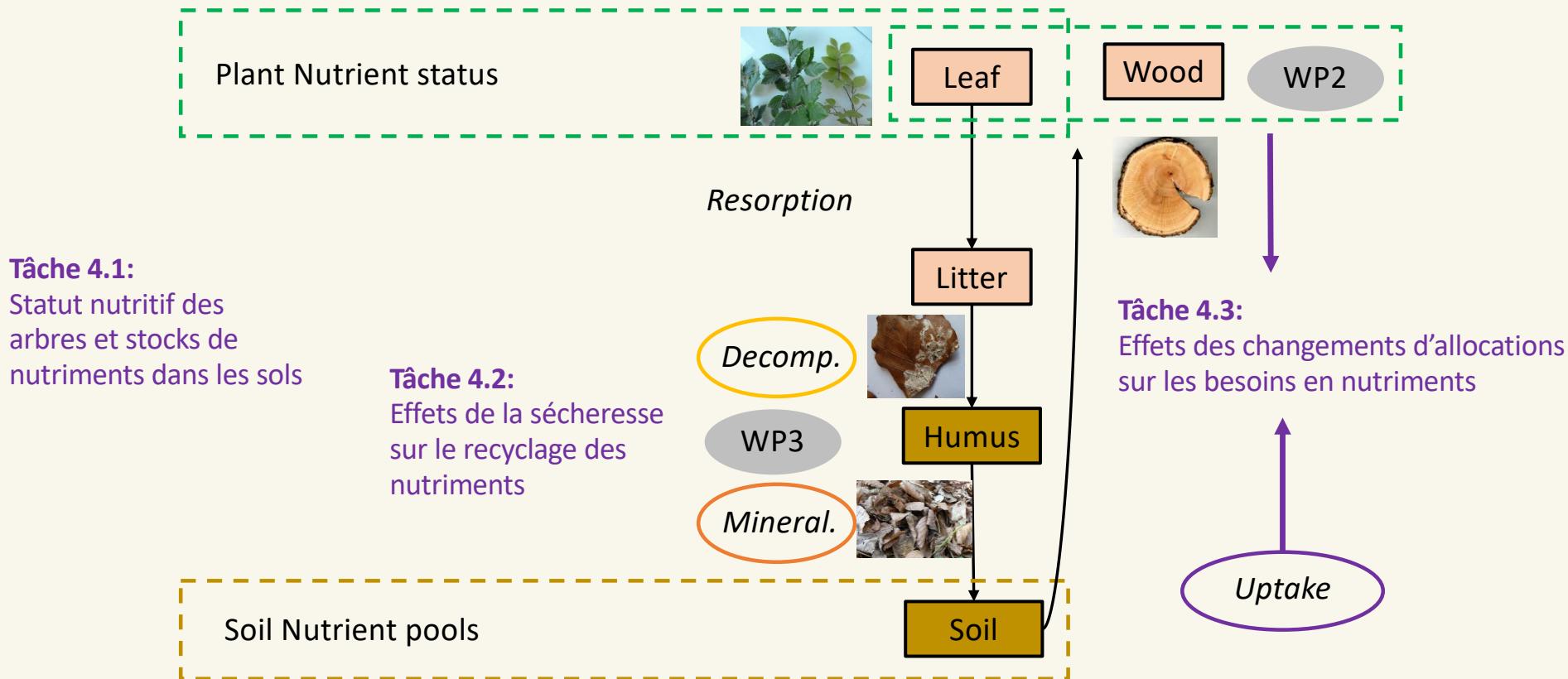


Tâche 3.2:
Effets de la sécheresse et du réchauffement sur le flux de C émis par le sol ($\text{CO}_2 + \text{BVOC}$)

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



Drought ForC – WP4: Sécheresse et limitations nutritives



Drought ForC – WP5: Modélisation des effets de la sécheresse



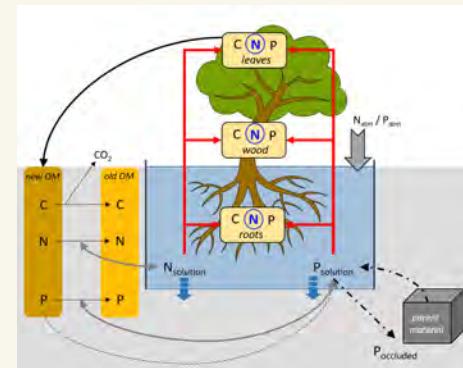
Flux de C
 Croissance des arbres
 Mortalité
 Structure du peuplement forestier

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

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

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



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



Interactions Sol Plante Atmosphère

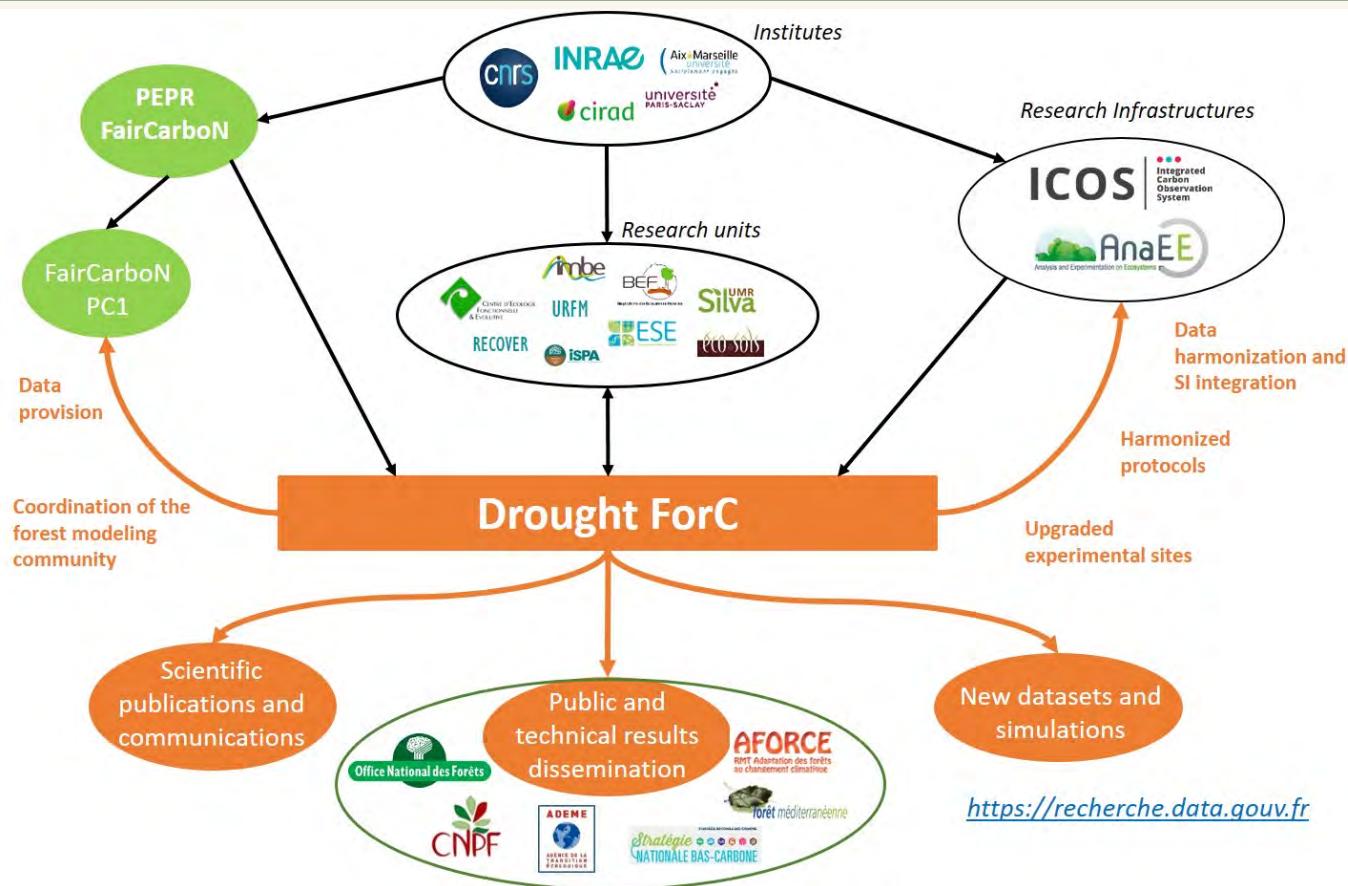


UMR Silva

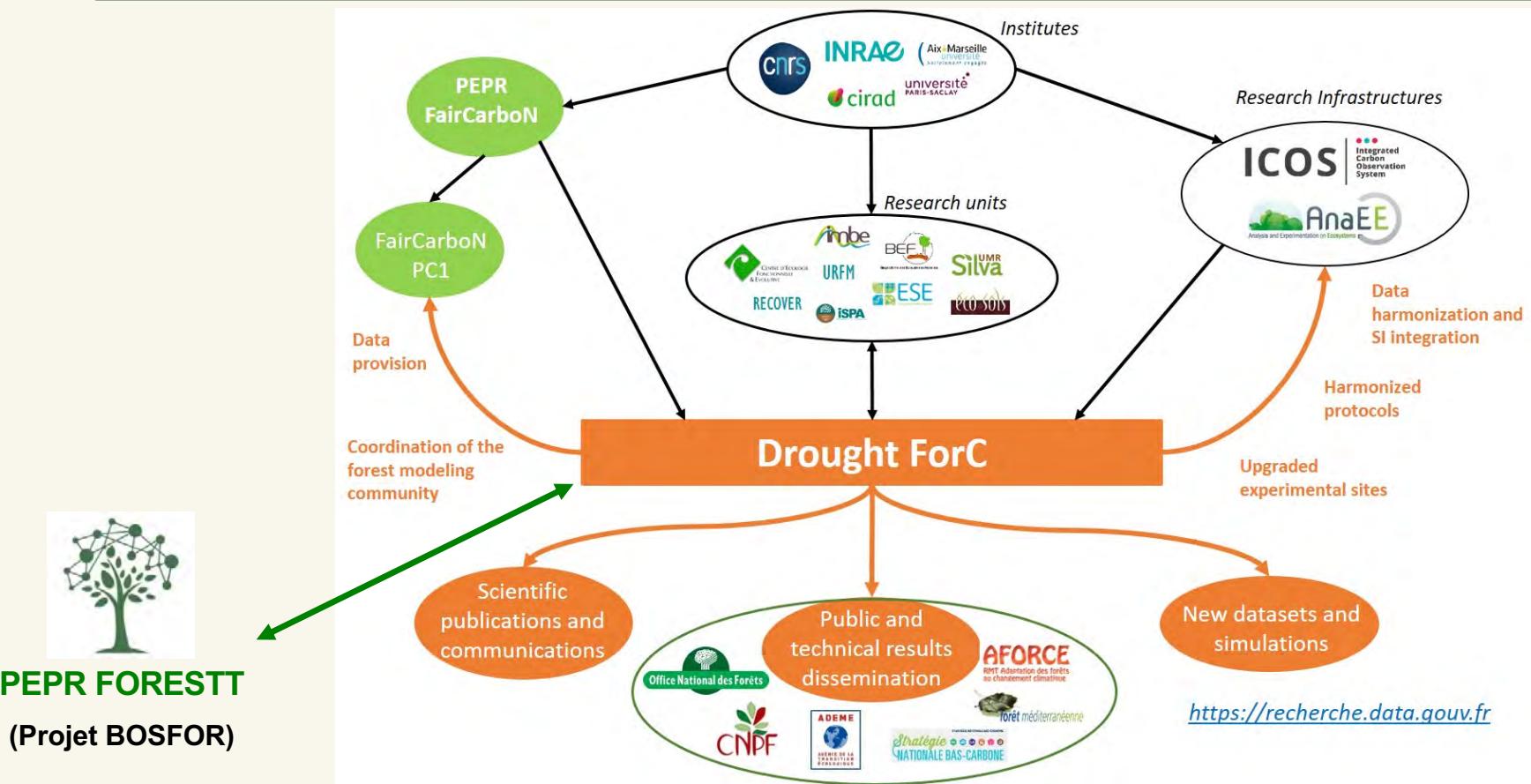


- **5 partenaires institutionnels :**
CNRS, AMU, INRAE, UPS,
CIRAD
- **9 unités de recherche**
impliquées
- **25 chercheurs et 22 IT**

Drought ForC – Intégration du projet



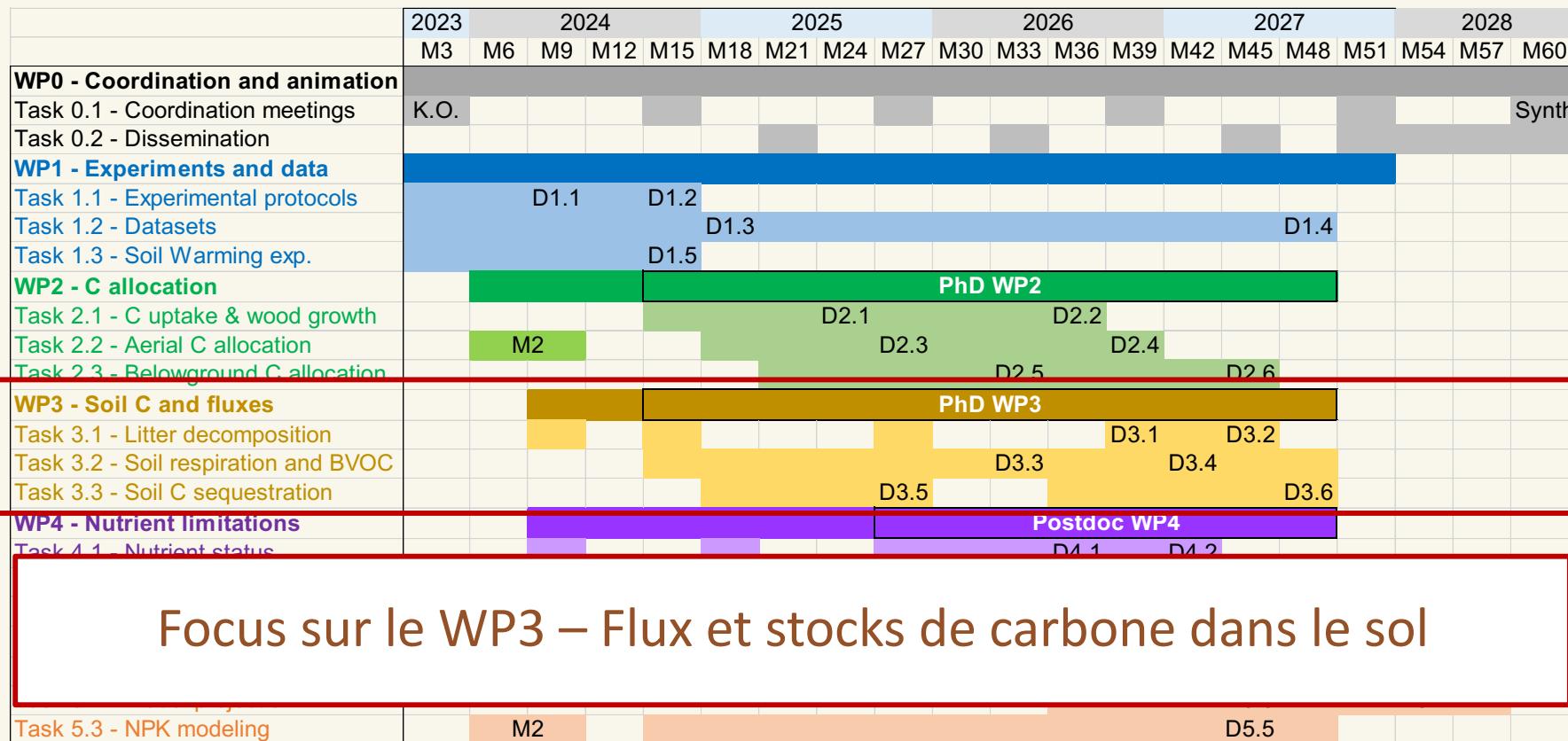
Drought ForC – Intégration du projet



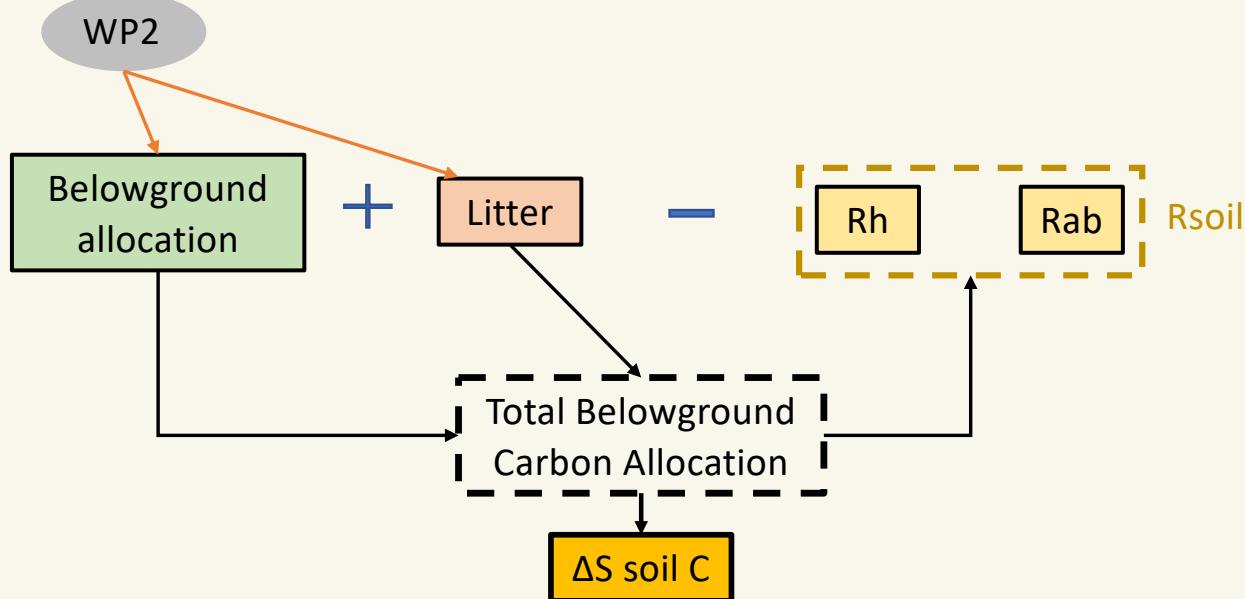
Drought ForC – Le calendrier

	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.																																																							
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						D2.5																																					
Task 2.3 - Belowground C allocation				PhD WP3																																																				
WP3 - Soil C and fluxes																																																								
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																																																								
Task 4.1 - Nutrient status	D4.1						D4.2																																																	
Task 4.2 - Nutrient recycling							D4.3			D4.4									D4.5																																					
Task 4.3 - Nutrient immobilization	Postdoc WP4																																																							
WP5 - Modeling																																																								
Task 5.1 - Model validation	D5.1									D5.2																																														
Task 5.2 - Model projection							D5.3			D5.4																																														
Task 5.3 - NPK modeling	M2			Postdoc WP5																																																				

Drought ForC – Le calendrier



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 ($\text{CO}_2 + \text{COVB}$)

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



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)



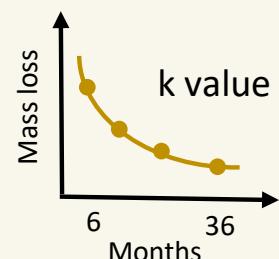
Drought ForC – WP3: Flux et stocks de C dans le sol

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)



WP4



WP5

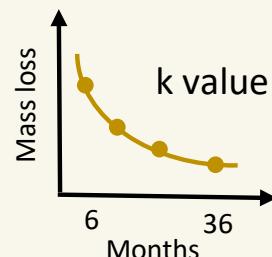
Drought ForC – WP3: Flux et stocks de C dans le sol

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

- 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 µm 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**



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



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



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

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



Eddy covariance



Exclusion de pluies « long terme »



Chauffage et sécheresse du sol

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 »



Informer, Échanger, Rassembler, Proposer

Colloque organisé avec le soutien de



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-mediterraneenne.org