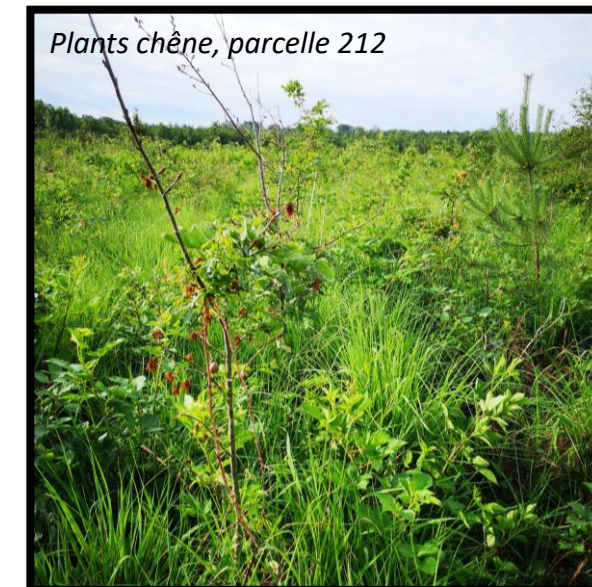




Comment prendre en compte le travail du sol dans les bilans carbone des prospectives de séquestration dans les écosystèmes forestiers ?



Parcelle 212



Sonia Carmon – M2 Gestion de l'Environnement – Biodiversité – 2019
Structure d'accueil : Pôle RDI de l'ONF de Dole
Maître de stage : Emila Akroume
Tuteur de stage : Michaël Aubert

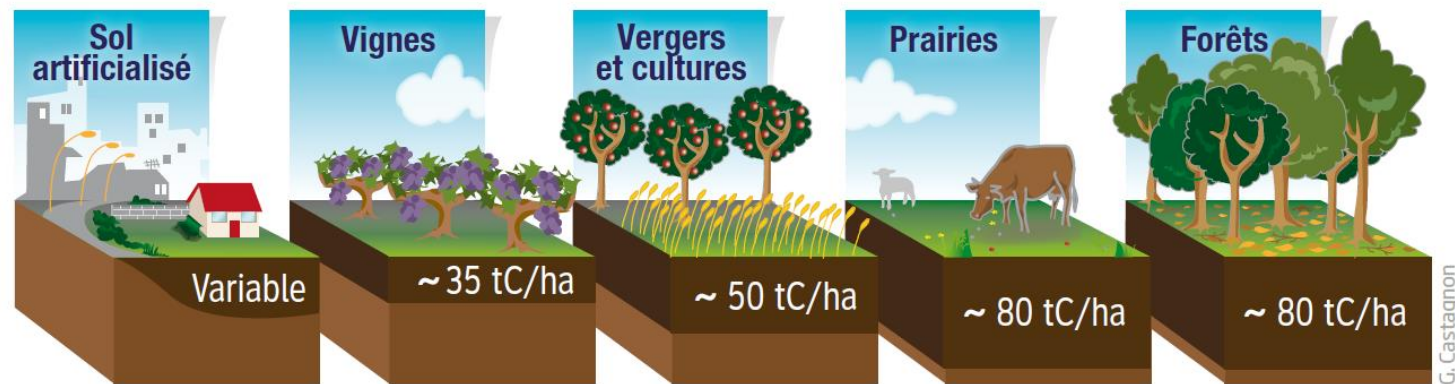


Introduction



Introduction

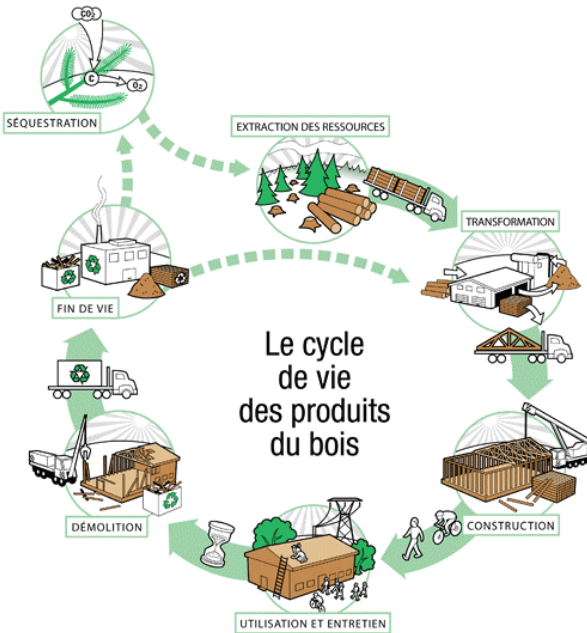
- **Changements globaux** (pollution, changements climatiques, changement d'occupation des sols...)
 - **Diminuer/Compenser** notre impact (émissions CO₂) ?
 - Favoriser le stockage du **carbone dans les écosystèmes** → **Forêts**
- **L'écosystème forestier** = un des systèmes **stockant le plus** de Carbone sur les 30 premiers cm du sol
 - 81 Mg/ha en moyenne en France (Pellerin et al., 2019)
 - Stockage du **Carbone** dans le **sol** (principalement dans la **Matière Organique** par séquestration du Carbone)
 - Dans la **biomasse** des arbres (séquestration activité photosynthétique)



Stock de Carbone organique du sol dans les grands systèmes, sur les 30 premiers centimètres
(ADEME, 2014)

Introduction

- **Cycles/Gestion sylvicoles** → Influent sur le stock de Carbone
→ **Exploitation** joue aussi un rôle : Matériaux stockent du Carbone et sont des substituts
- **Equilibre** : la **production** (économie), les **services** rendus (stockage du Carbone, filtre eau...)
- Adaptation des peuplements face au **changement climatique**
→ Conditions difficiles → Renouvellements des peuplements compliqués
→ **Plantation** : essences nouvelles ou natives + demande en bois
→ **Nécessité de préparation du sol**



boisenergie.guidenr.fr

- **L'Objectif du stage :**

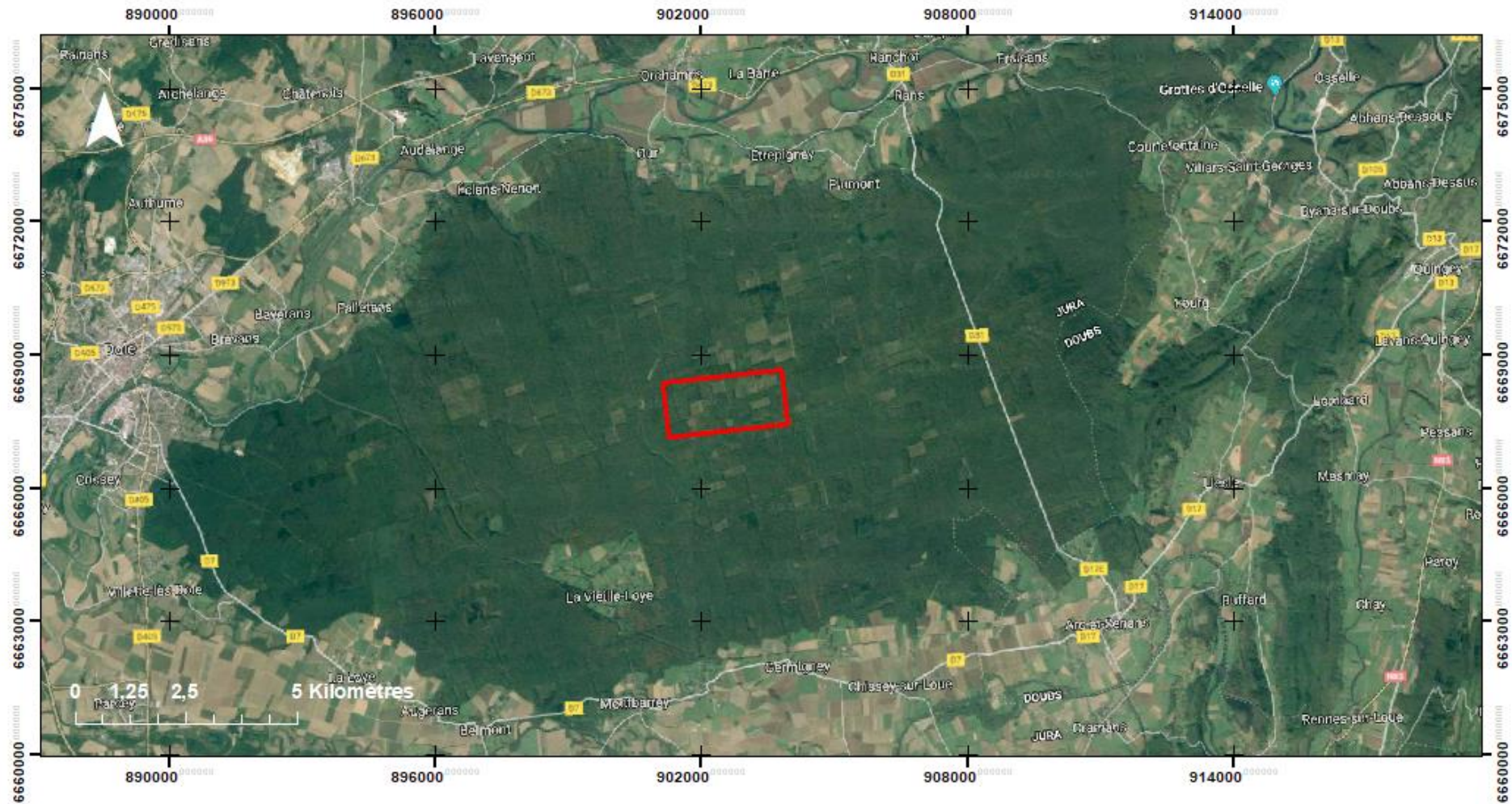
Evaluer, à l'échelle d'une **révolution forestière** complète, l'effet de différentes méthodes de **préparation du sol** sur la **dynamique de la biomasse aérienne** et sur le **stockage de carbone** dans l'écosystème forestier.

Focalisé sur le cas d'étude de **plantations de chêne sessile** en contexte de blocage par la **molinie**

Introduction

- Hypothèses de travail :

La préparation mécanisée du sol induit...	Travail effectué / Données à disposition...
(1) Perte du Carbone Organique du sol (COS), au moins au niveau de la ligne de plantation	Mesures : Prélèvements sol, stock de Carbone organique du sol
(2) Amélioration de la survie ainsi que de la croissances des plants de chênes sessiles	Mesures : Suivis des arbres, relevés de hauteur
(3) Meilleure séquestration du carbone dans la biomasse aérienne sur une révolution forestière complète	Estimations (simulations) : De la croissance, de la biomasse et de la séquestration du Carbone du peuplement, à partir de mesures réelles (nos données ou autres d'exploitation similaire)
(4) Modélisation du Carbone organique du sol sur 5 ans	Estimations (modélisation) : à partir de nos mesures réelles



Contexte et Modalités

Contexte

- **Parcelles étudiées (forêt de Chaux, Jura) : 212, 1026 (Pilote)**
- **Envahies par la molinie**
- **Redoxisol avec hydromorphie de surface**
(Engorgement, concurrence directe ou indirectes...)
- **Limiter contraintes**
- **Préparation mécanique** des sols avant plantation
- Outils **préparation des sols** avant plantation (Impact ?)
- **Comparaison** avec des parcelles matures (>120 ans) **sans travail du sol** et avec une parcelle (25 ans, 213) ayant subit un travail « **extrême** » (labour en plein et gros billons)

Plant de chêne, billons, molinie et hydromorphie



Jeune plant de
chêne sessile

Hydromorphie

Billon

Modalités de l'étude

- 4 modalités étudiées

- **Local (1026)** : Plantation (5ans) → Razherb = désherbage molinie au niveau LP
→ Culti 3B = décompacte le sol et créer billon au niveau LP
= **Travail localisé**

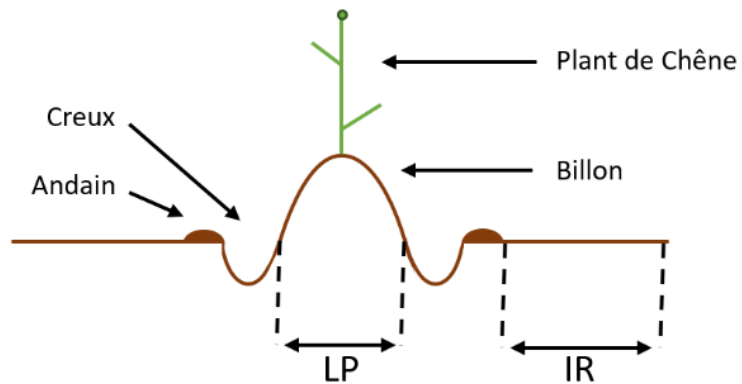


Schéma de la modalité « Local »



Culti 3B tracté, Bord-Louviers

Le stock de carbone du sol

○ 4 modalités étudiées

- **Local (1026)** : Plantation (5ans) → Razherb = désherbage molinie au niveau LP
→ Culti 3B = décompacte le sol et créer billon au niveau LP
= **Travail localisé**
- **Témoin (212)** : Plantation (5ans) → **Sans travail du sol**

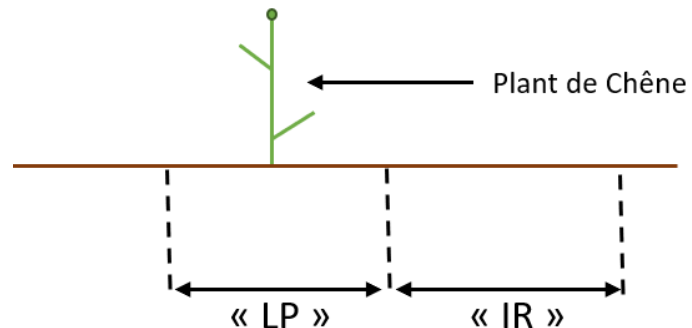


Schéma des modalités « Témoin » et « Mature »

Le stock de carbone du sol

○ 4 modalités étudiées

- **Local (1026)** : Plantation (5ans) → Razherb = désherbage molinie au niveau LP
→ Culti 3B = décompacte le sol et créer billon au niveau LP
= **Travail localisé**
- **Témoin (212)** : Plantation (5ans) → **Sans travail du sol**
- **Extrême (213)** : Plantation (25ans) → labour en plein + mise en place de hauts billons
= **Travail général**

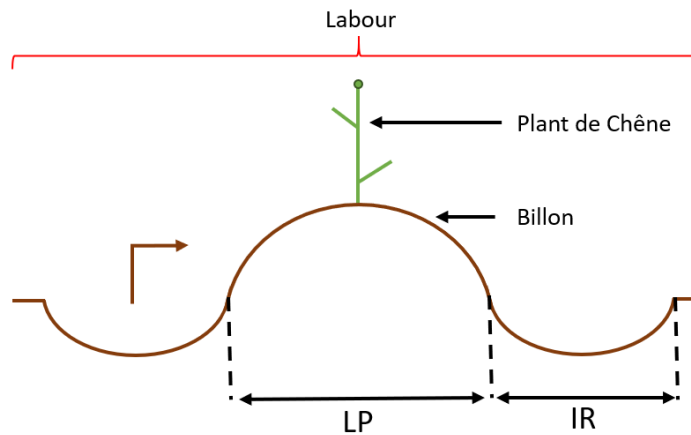


Schéma de la modalité « Extrême »



Billon en 2019 de la parcelle 213

Le stock de carbone du sol

○ 4 modalités étudiées

- **Local (1026)** : Plantation (5ans) → Razherb = désherbage molinie au niveau LP
→ Culti 3B = décompacte le sol et créer billon au niveau LP
= **Travail localisé**
- **Témoin (212)** : Plantation (5ans) → **Sans travail du sol**
- **Extrême (213)** : Plantation (25ans) → labour en plein + mise en place de hauts billons
= **Travail général**
- **Mature (M)** : Parcelles matures (régénérations naturelles >120 ans),
Proches géographiquement des parcelles de test, **sans travail du sol**

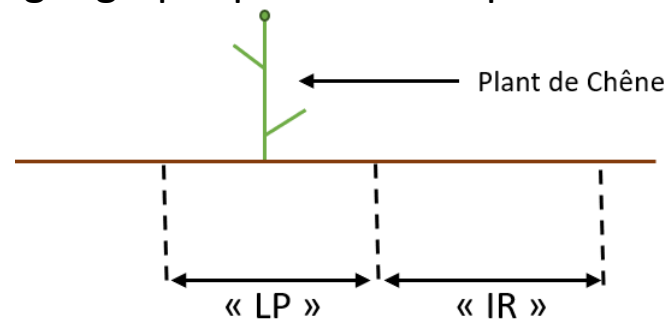


Schéma de des modalités « Témoin » et « Mature »



Parcelle mature



(1) Le stock de carbone du sol

(1) Le stock de carbone du sol - Echantillonnage

○ Les prélèvements de sol

→ Prélèvements: sur la ligne de plantation (LP) et l'inter rang (IR)

→ 5 profondeurs : Litière (OL), 0-10cm, 10-20, 20-30, 30-45, 45-60

→ Echantillons analysés → **Stock de Carbone Organique du Sol**

Stock COS (mg.cm^2) = g Carbone (g/kg) * DA (g.cm^{-3}) * Epaisseur (cm)
(d'après Jonard et al., 2017)

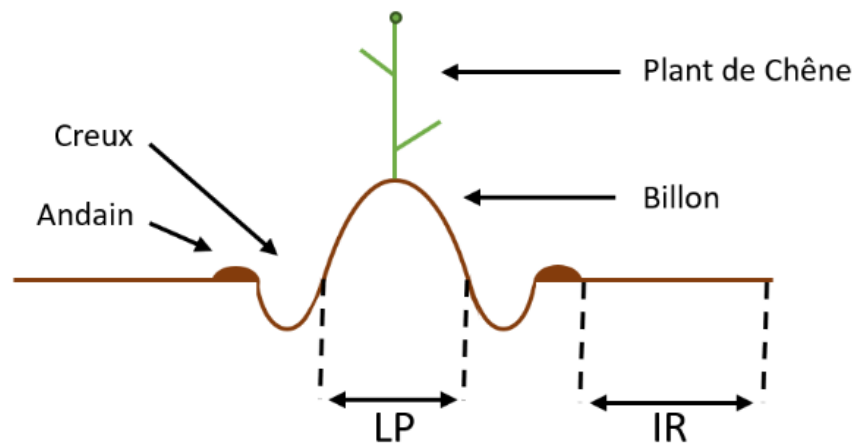
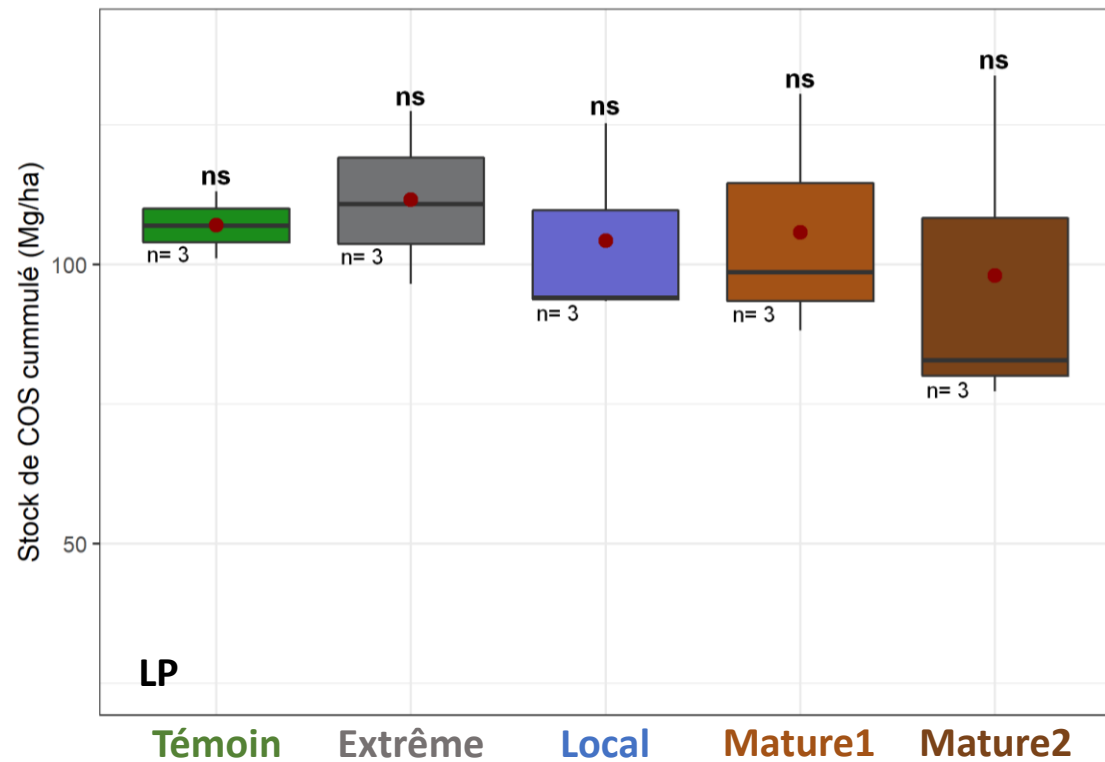


Schéma de la modalité « Local »

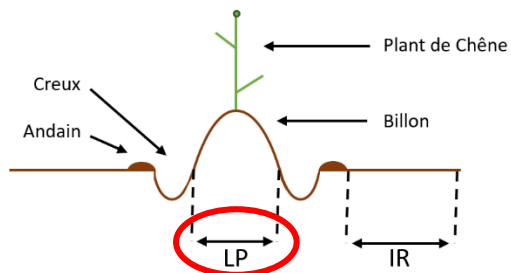


Parcelle 212 forêt de Chaux, 2019

(1) Le stock de carbone du sol : Stock de COS sur le profil entier (LP)

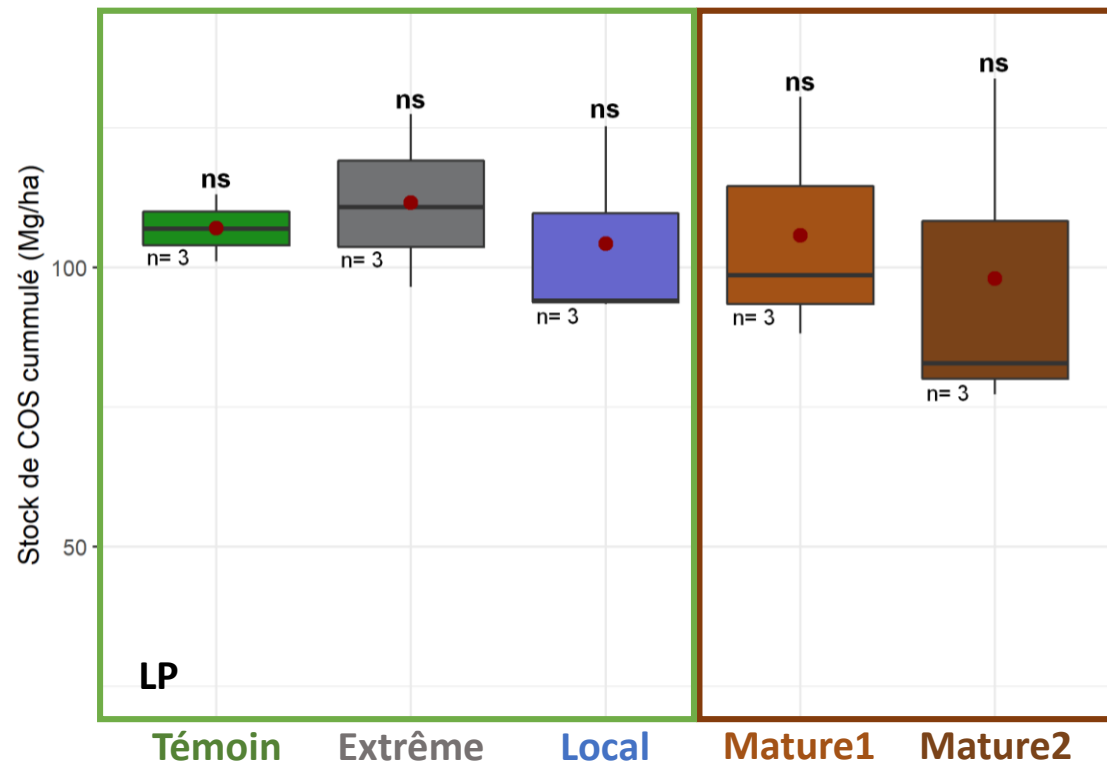


Différences au niveau du stock de Carbone organique du sol cumulé sur OL-60cm (Mg/ha) en LP, à l'échelle du profil, pour chaque modalité (Kruskal-Wallis, p -value < 0.05). Points rouges = Moyennes.

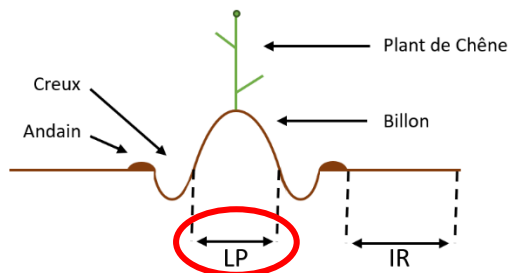


- **Ligne de Plantation**
- **Pas de différences** entre **M** (régénérations naturelles) et nos **plantations** (Local, Témoin, Extrême)
 - Désaccord avec la littérature.
 - Une perte de COS en plantations (Augusto, Bureau, et Derrien, 2019)
- **Pas de différences** entre **Local, Témoin et Extrême**
 - Accord avec la littérature
 - Impact sur le COS dépendant du site étudié et de la méthode de préparation utilisée (Fonseca, Figueiredo, et Martins, 2014 ; Jandl et al., 2007)

(1) Le stock de carbone du sol : Stock de COS sur le profil entier (LP)

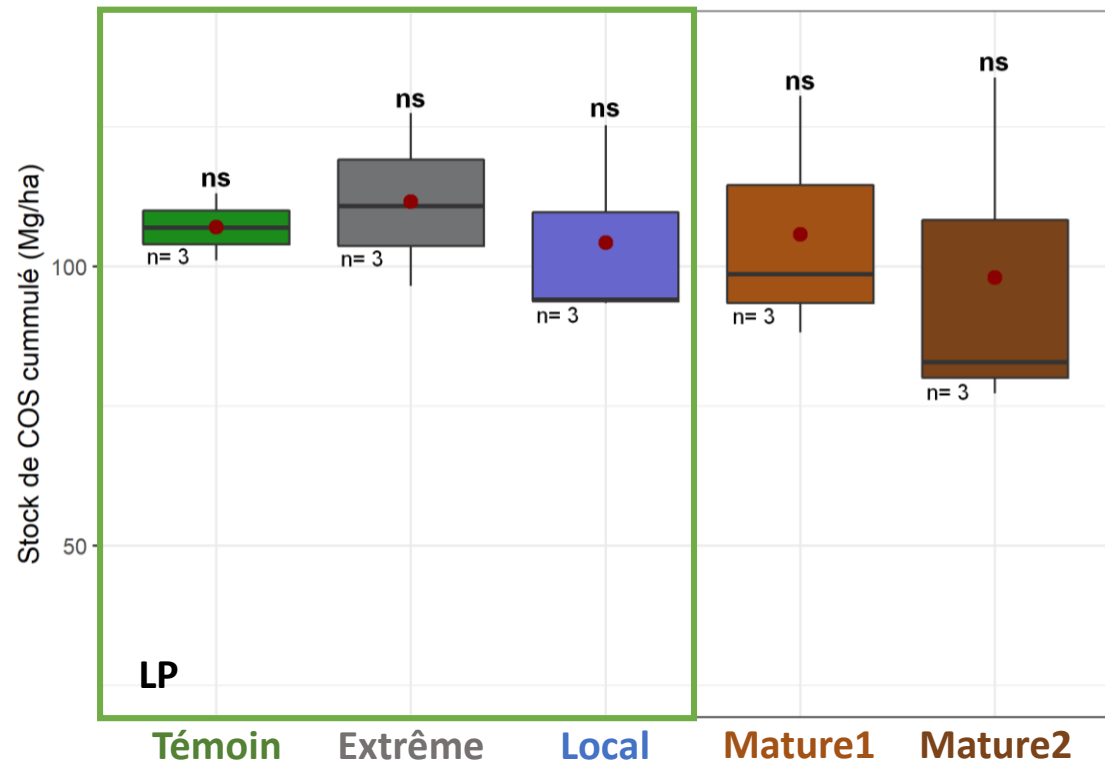


Différences au niveau du stock de Carbone organique du sol cumulé sur OL-60cm (Mg/ha) en LP, à l'échelle du profil, pour chaque modalité (Kruskal-Wallis, p -value < 0.05). Points rouges = Moyennes.

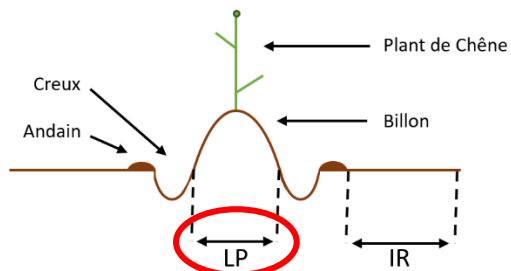


- **Ligne de Plantation**
- **Pas de différences** entre **M** (régénérations naturelles) et nos **plantations** (Local, Témoin, Extrême)
 - Désaccord avec la littérature.
 - Une perte de Carbone du sol en plantations (Augusto, Bureau, et Derrien, 2019)
- **Pas de différences** entre **Local, Témoin et Extrême**
 - Accord avec la littérature
 - Impact sur le Carbone du sol dépendant du site étudié et de la méthode de préparation utilisée (Fonseca, Figueiredo, et Martins, 2014 ; Jandl et al., 2007)

(1) Le stock de carbone du sol : Stock de COS sur le profil entier (LP)

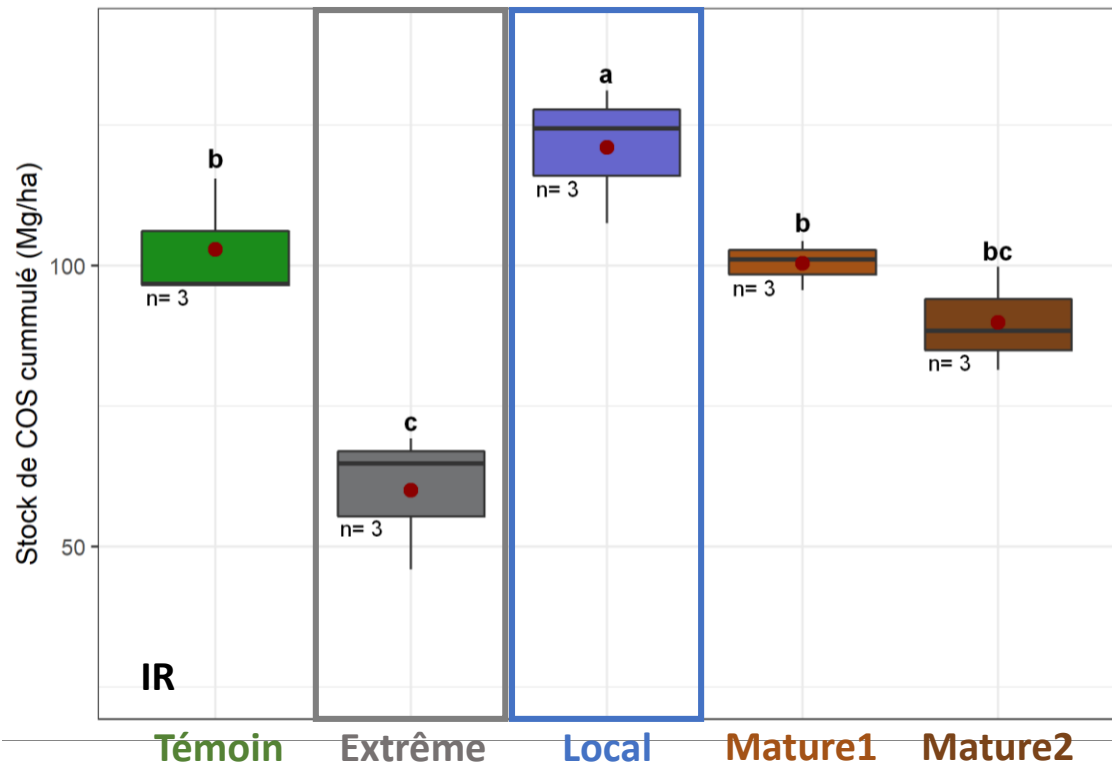


Différences au niveau du stock de Carbone organique du sol cumulé sur OL-60cm (Mg/ha) en LP, à l'échelle du profil, pour chaque modalité (Kruskal-Wallis, p -value < 0.05). Points rouges = Moyennes.

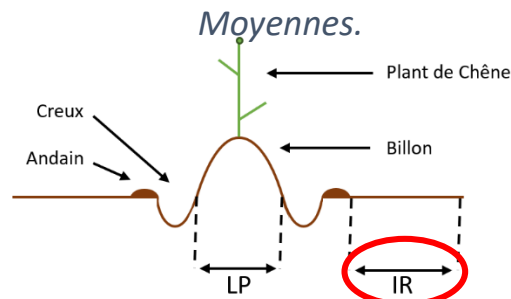


- **Ligne de Plantation**
- **Pas de différences** entre **M** (régénérations naturelles) et nos **plantations** (Local, Témoin, Extrême)
 - Désaccord avec la littérature.
 - Une perte de Carbone du sol en plantations (Augusto, Bureau, et Derrien, 2019)
- **Pas de différences** entre **Local, Témoin et Extrême**
 - Accord avec la littérature
 - Impact sur le Carbone du sol dépendant du site étudié et de la méthode de préparation utilisée (Fonseca, Figueiredo, et Martins, 2014 ; Jandl et al., 2007)

(1) Le stock de carbone du sol : Stock de COS sur le profil entier (IR)



Différences au niveau du stock de Carbone organique du sol cumulé sur OL-60cm (Mg/ha) en IR, à l'échelle du profil, pour chaque modalité (Kruskal-Wallis, p -value < 0.05). Points rouges = Moyennes.



○ Inter-Rang

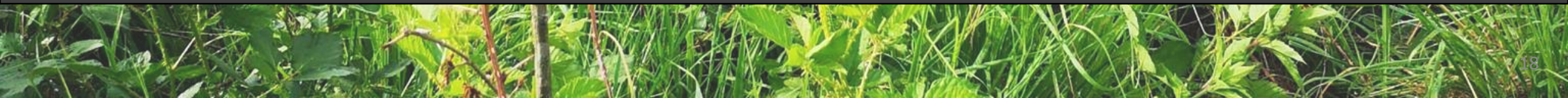
- « Local » plus élevé
- « Extrême » plus bas
- Pas de différences des contrôles

○ COS bas en « Extrême »

- Labour en plein (sur toute la parcelle)
- Perte Carbone du sol (Trichet et al., en 1999)
- Contrairement à la modalité « Local » = travail localisé



(2) Evolution du stade juvénile



(2) Evolution du stade juvénile

- Mesures de hauteurs (Local / Témoin)

→ Effectuées de façon régulière : 2014, 2015, 2016, 2017 et 2019.

→ 36 Arbres numérotés par modalité → Suivis spécifique
(mesure hauteur avec perche graduée)

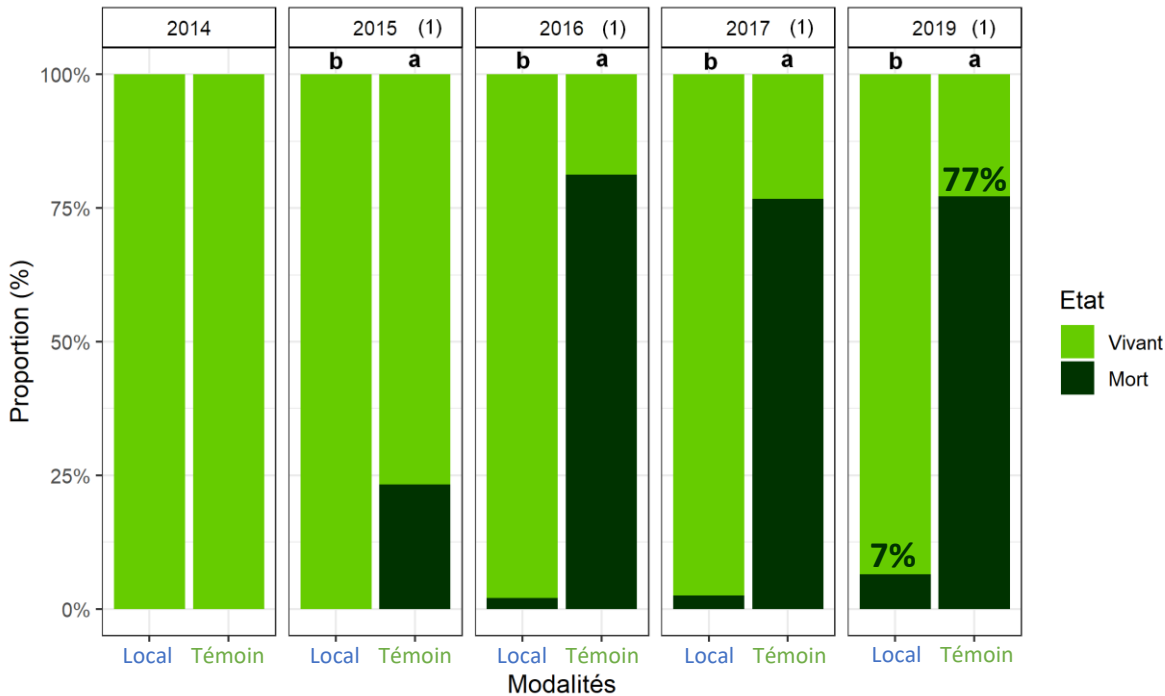
→ **Croissance juvénile**

→ **Modéliser** la croissance du peuplement sur une **révolution forestière entière**



Mesure des plants

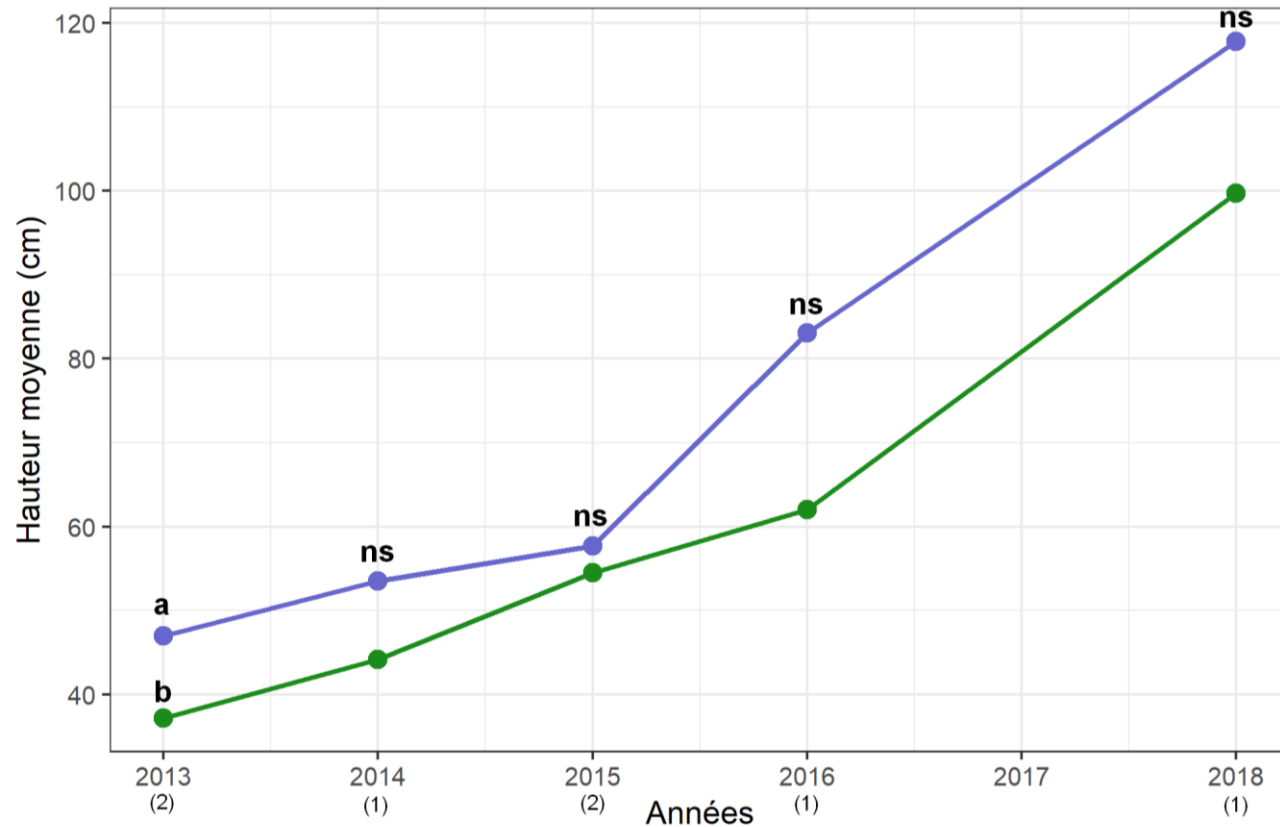
(2) Evolution du stade juvénile: Mortalité



Différences au niveau de la mortalité totale observée (%) entre nos modalités, pour chaque année.

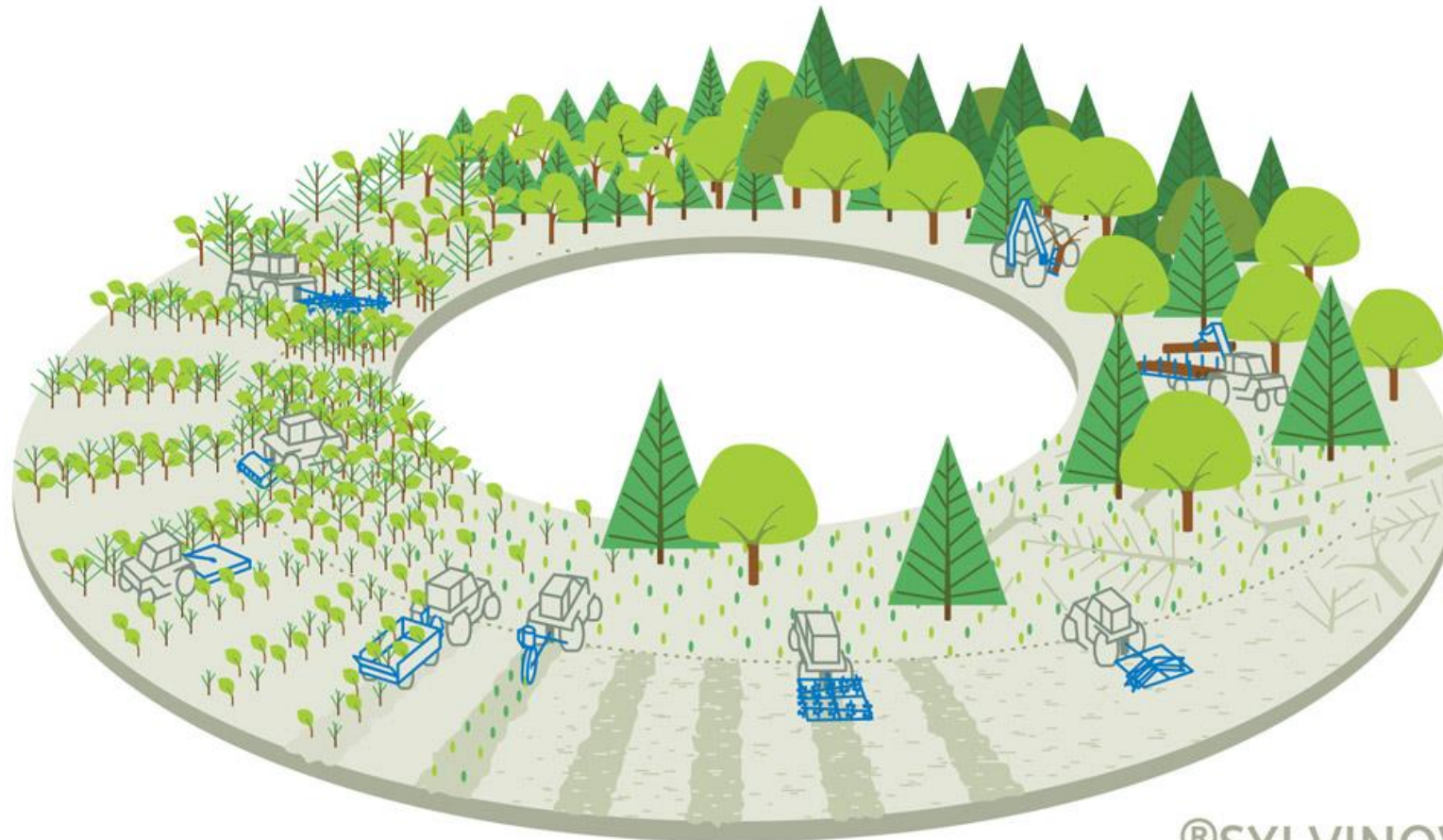
- **Mortalité extrême en Témoin (77% à 5 ans)**
 - **Désaccord** autres dispositifs similaires (22% en moyenne, à 4 ou 5 ans)
 - Ainsi qu'avec la littérature (42% de mortalité pour du *Quercus robur* à 3 ans, Löf, Rydberg, et Bolte en 2006)
 - Des **conditions contraignantes** (concurrence, engorgement...)
- **Survie améliorée en « Local » (7% à 5 ans)**
 - Diminution du **stress** lors de l'implantation (moins d'eau, sol moins tassé)
 - Diminution de la **compétition** par la molinie (3 ans) (Sanchez-Andrés et al., 2006)

(2) Evolution du stade juvénile: Evolution de la hauteur moyenne



Evolution des hauteurs moyennes (cm) selon nos modalités, pour chaque saison de croissance.

- **Pas de différences significatives**
 - Désaccord avec la littérature
 - Préparation du sol améliore la croissance chez les Chênes (Sanchez-Andrés et al., 2006 ; Projet Alter, 2012, Löf, Rydberg, et Bolte en 2006)
- **Ralentissement de la croissance en Témoin**
- **Forte mortalité en Témoin**
 - = Très peu d'individus mesurés
 - Arbres plus vigoureux (et donc ayant une meilleure croissance) ?



(3) Séquestration du carbone aérien dans les peuplements

(3) Séquestration du carbone aérien dans les peuplements : CAPSIS (Sydy)

- **Faire une simulation d'un cycle sylvicole complet (Témoin / Local)**
 - Initier la simulation
 - Besoin de **données réelles** de la croissance juvénile d'un peuplement (**circonférence**, âge, Hdom)

- **Référence (contexte proche)**
 - Parcelle en régénération naturelle à dominance de Chêne sessile (Citeaux) → Circonférence 19 ans

- **Evolution du peuplement**
 - Itinéraire « sylviculture classique » du chêne sessile, du guide du chêne continental
 - Plusieurs cas testés :

	Référence (Citeaux)	Local (Local)	Témoin (TEM)	TEM Références (TEM ref)
Première intervention	Normale (3600 tiges/ha)	1395 tiges (93% de survie)	345 tiges (23%)	1170 tiges (78%)
Itinéraire	Guide Chêne continental	Guide du Chêne continental adapté à une plantation	Guide du Chêne continental adapté à une plantation et à faible densité	Guide du Chêne continental adapté à une plantation

- **Simulation → Biomasse aérienne → Séquestration du carbone aérien du peuplement**
(selon Deleuze et al., 2014 et Landmann et al., 2018)

(3) Séquestration du carbone aérien dans les peuplements : CAPSIS (Sydy)

- **Faire une simulation d'un cycle sylvicole complet (Témoin / Local)**
 - Initier la simulation
 - Besoin de **données réelles** de la croissance juvénile d'un peuplement (**circonférence**, âge, Hdom)

- **Référence (contexte proche)**
 - Parcelle en régénération naturelle à dominance de Chêne sessile (Citeaux) → Circonférence 19 ans

- **Evolution du peuplement**
 - Itinéraire « sylviculture classique » du chêne sessile, du guide du chêne continental
 - Plusieurs cas testés :

	Référence (Citeaux)	Local (Local)	Témoin (TEM)	TEM Références (TEM ref)
Première intervention	Normale (3600 tiges/ha)	1395 tiges (93% de survie)	345 tiges (23%)	1170 tiges (78%)
Itinéraire	Guide Chêne continental	Guide du Chêne continental adapté à une plantation	Guide du Chêne continental adapté à une plantation et à faible densité	Guide du Chêne continental adapté à une plantation

- **Simulation → Biomasse aérienne → Séquestration du carbone aérien** du peuplement (selon Deleuze et al., 2014 et Landmann et al., 2018)

(3) Séquestration du carbone aérien dans les peuplements : CAPSIS (Sydy)

- **Faire une simulation d'un cycle sylvicole complet (Témoin / Local)**
 - Initier la simulation
 - Besoin de **données réelles** de la croissance juvénile d'un peuplement (**circonférence**, âge, Hdom)
- **Référence (contexte proche)**
 - Parcelle en régénération naturelle à dominance de Chêne sessile (Citeaux) → Circonférence 19 ans
- **Evolution du peuplement**
 - Itinéraire « sylviculture classique » du chêne sessile, du guide du chêne continental
 - Plusieurs cas testés :

	Référence (Citeaux)	Local (Local)	Témoin (TEM)	TEM Références (TEM ref)
Première intervention	Normale (3600 tiges/ha)	1395 tiges (93% de survie)	345 tiges (23%)	1170 tiges (78%)
Itinéraire	Guide Chêne continental	Guide du Chêne continental adapté à une plantation	Guide du Chêne continental adapté à une plantation et à faible densité	Guide du Chêne continental adapté à une plantation

- **Simulation → Biomasse aérienne → Séquestration du carbone aérien** du peuplement (selon Deleuze et al., 2014 et Landmann et al., 2018)

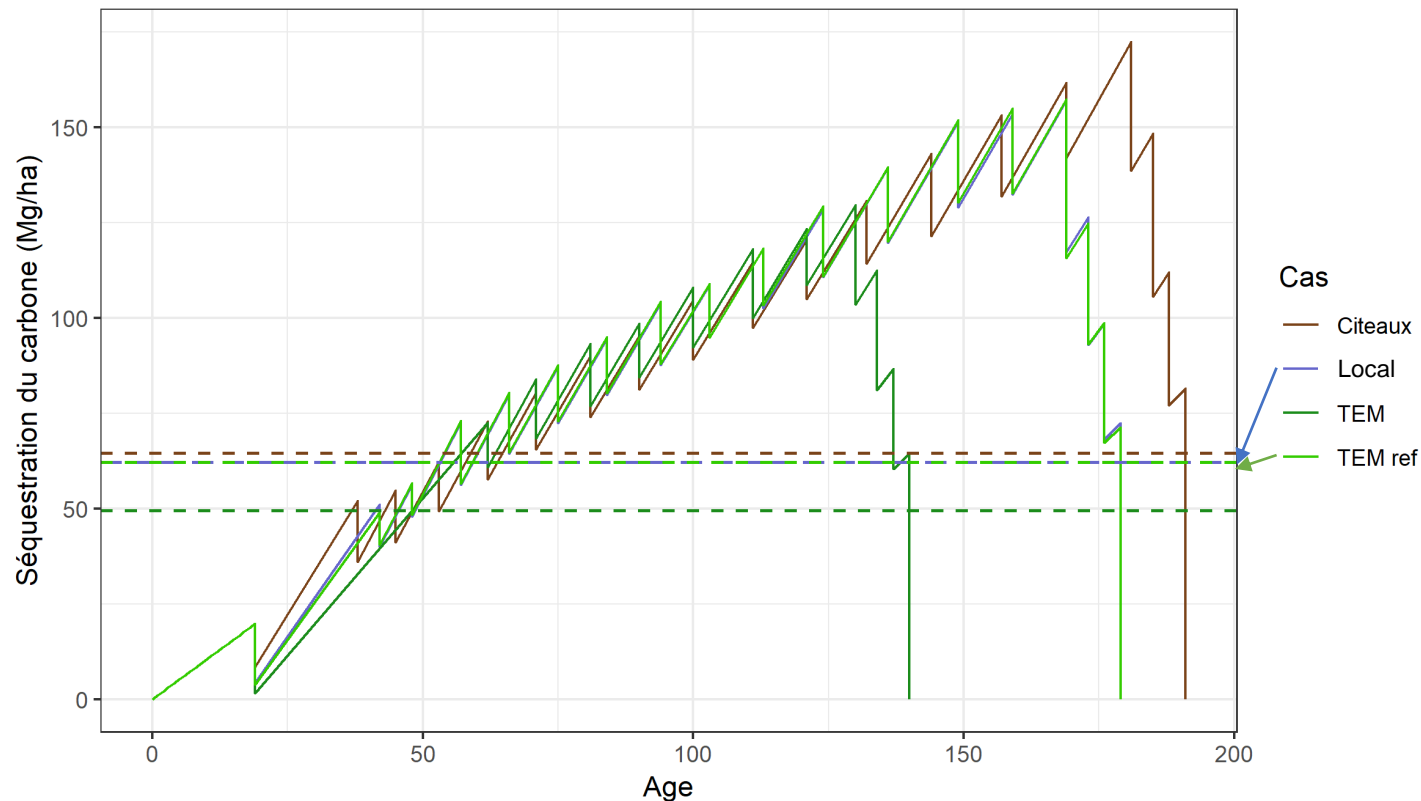
(3) Séquestration du carbone aérien dans les peuplements : CAPSIS (Sydy)

- **Faire une simulation d'un cycle sylvicole complet (Témoin / Local)**
 - Initier la simulation
 - Besoin de **données réelles** de la croissance juvénile d'un peuplement (**circonférence**, âge, Hdom)
- **Référence (contexte proche)**
 - Parcelle en régénération naturelle à dominance de Chêne sessile (Citeaux) → Circonférence 19 ans
- **Evolution du peuplement**
 - Itinéraire « sylviculture classique » du chêne sessile, du guide du chêne continental
 - Plusieurs cas testés :

	Référence (Citeaux)	Local (Local)	Témoin (TEM)	TEM Références (TEM ref)
Première intervention	Normale (3600 tiges/ha)	1395 tiges (93% de survie)	345 tiges (23%)	1170 tiges (78%)
Itinéraire	Guide Chêne continental	Guide du Chêne continental adapté à une plantation	Guide du Chêne continental adapté à une plantation et à faible densité	Guide du Chêne continental adapté à une plantation

- **Simulation → Biomasse aérienne → Séquestration du carbone aérien** du peuplement (selon Deleuze et al., 2014 et Landmann et al., 2018)

(3) Séquestration du carbone aérien dans les peuplements



Séquestration du carbone (Mg/ha), sur une révolution forestière complète, pour chaque cas testé

Lignes pointillés = Séquestration moyenne du carbone

- **Interventions diffèrent selon cas étudié**

- **Durée du cycle**

- Plus longue régénération naturelle (Citeaux)
- Plus courte pour notre TEM (qualité médiocre)

	Citeaux	Local	TEM	TEM ref
Durée Cycle (ans)	191	179	140	179

- **Carbone moyen séquestré**

- Plus important Régénération naturelle // Plantations

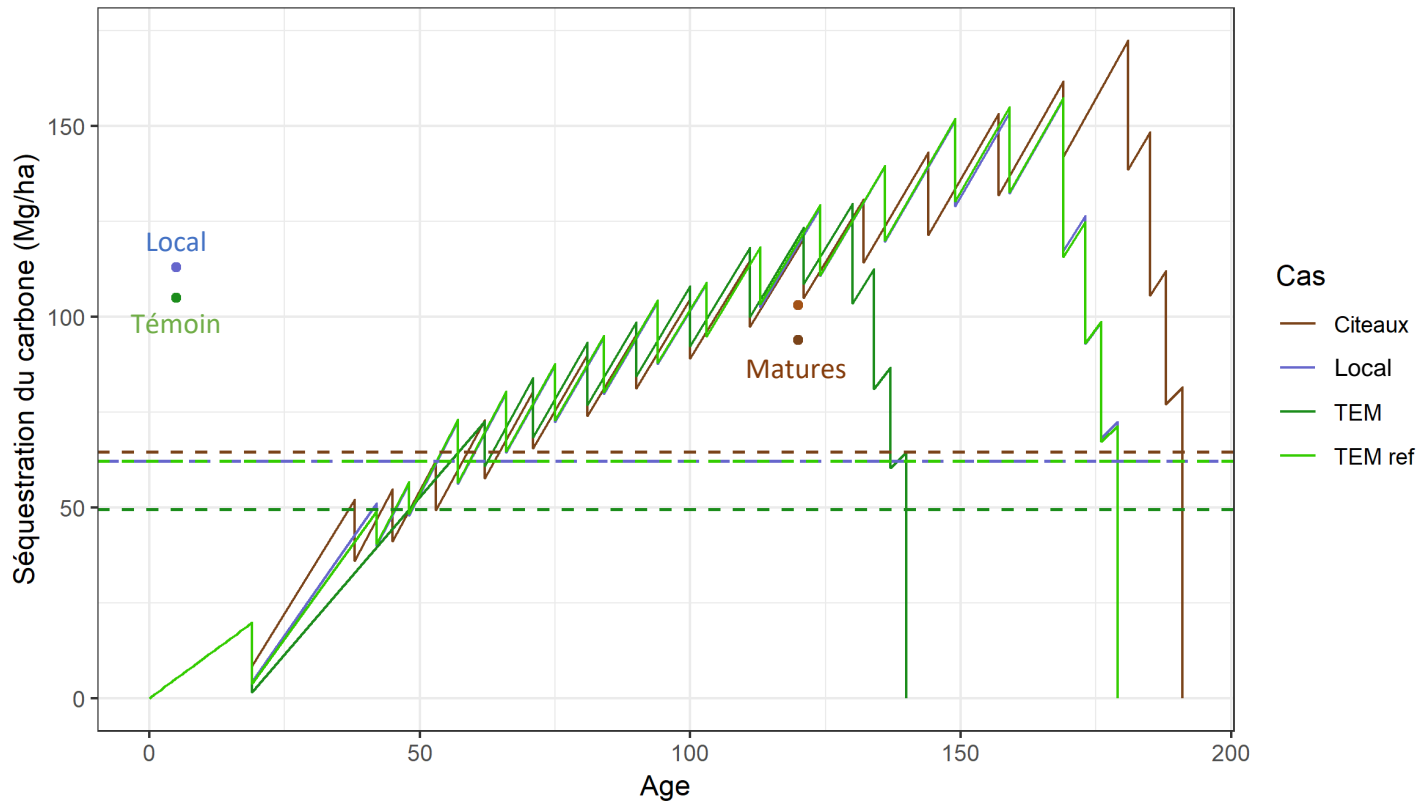
	Citeaux	Local	TEM	TEM ref
C Séquestré (Mg/ha)	64,6	62,2	49,5	62,2

→ Production primaire nette plus faible en plantation (perte de 11%),

→ Rotation plus courte en plantation (Liao et al., 2010)

- Moins important pour notre TEM (idem?)
- Similaire entre Local et TEM ref

(3) Séquestration du carbone aérien dans les peuplements



Séquestration du carbone (Mg/ha), sur une révolution forestière complète, pour chaque cas testé

Lignes pointillés = Séquestration moyenne du carbone

Points = Valeur de COS moyen général

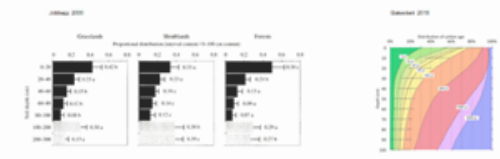
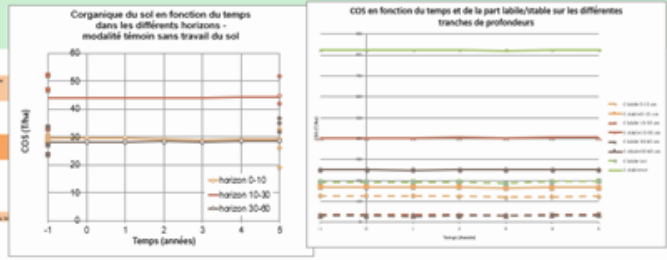
- **Limites de la modélisation**
 - Non adapté aux plantations (densité faible)
- Ne prend pas en compte **les recrues ligneux** (les ligneux arrivant sans être plantés → C)
- On part **d'une régénération naturelle**
 - Ramenée à une densité de **plantation**
 - Pas **données réelles** (autre dispositif)
 - Adaptée à nos **mortalités observées**
- **Comparaison avec le COS**
 - COS peu variable

Hypothèses de fondement

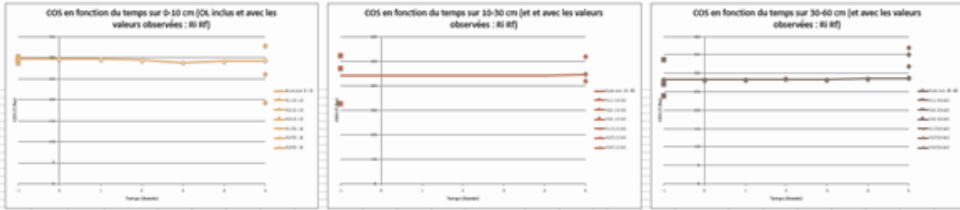
en 2010, 2 types de C pour l'échelle tempore du préfonction : C labile (0-10) et C stable (10-30) sur 10,00 0-10% et 30,00 0-10% → Échelle de la graph de base pour les 5 ans
 on effectue une conversion de décomposition pour le C labile et une pour le C stable → Plus des conditions à sur les horizons de préfonction (épave forestière)
 la décomposition est effectuée avec le préfonction sur la conversion de décomposition obtenue en 2010 pour l'échelle de préfonction
 on applique du C en surface par les 10000 années des arbres (décomposition) et par la végétation concurrente annuelle
 on applique du C en préfonction par les 10000 années des arbres et de la végétation concurrente
 les apports forestiers décomposent avec à 2010 (2000) et les effets autres

le travail du sol n'a un effet "normalisateur" uniquement en raison de la redistribution de C labile (stable) sur le profil de sol
 le travail du sol a un effet sur les apports de labile - voir l'onglet végétation

Horizon	0-10	10-30	30-60	60-100	100-200
Labile	100%	0%	0%	0%	0%
Stable	0%	100%	100%	100%	100%



Horizon	0-10	10-30	30-60	60-100	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600	600-700	700-800	800-900	900-1000
Labile	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Stable	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%



(4) Modélisation du Carbone organique du sol sur 5 ans

Modélisation du Carbone organique du sol sur 5 ans

- **Modèle de la dynamique du carbone au stade juvénile (sur 5 ans)**

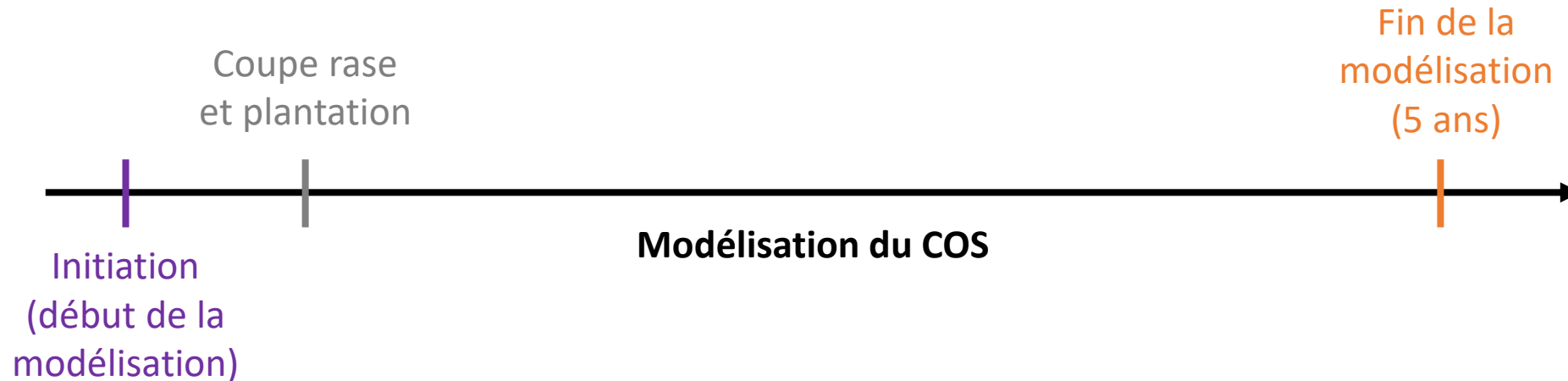
- Delphine Derrien (UR BEF, INRA de Nancy)

- **Dynamique du carbone** dans le sol sur 5 ans

- Témoin, Local et Mature

- **Initiation** : Point initial (avant coupe rase et plantation)

- = le Carbone organique du sol de nos forêts mûres



Modélisation du Carbone organique du sol sur 5 ans

- **Modèle de la dynamique du carbone au stade juvénile (sur 5 ans)**

Structure du modèle (D. Derrien)

- **Initiation** : Point initial (avant coupe et plantation)
= le Carbone organique du sol de nos forêts mûres

- **Evolution du Carbone organique du sol**

- Différentes **profondeurs**

- Deux **compartiments (TMR)**

TMR : Temps moyen de résidence (du C)

Valeurs d'après Balesdent et al., 2018

Couche organique et
horizon 0-10 cm

Labile 0-10 cm
TMR : 6 ans

Stable 0-10 cm
TMR : 152 ans

Horizon 10-30 cm

Labile 10-30 cm
TMR : 5 ans

Stable 10-30 cm
TMR : 212 ans

Horizon 30-60 cm

Labile 30-60 cm
TMR : 5 ans

Stable 30-60 cm
TMR : 404 ans

Modélisation du Carbone organique du sol sur 5 ans

- **Modèle de la dynamique du carbone au stade juvénile (sur 5 ans)**

- **Initiation** : Point initial (avant coupe et plantation)
= le Carbone organique du sol de nos forêts mûres

- **Evolution du Carbone organique du sol**

- **Entrées de C** : litières aériennes et souterraines

- Chênes et Végétation concurrente

- Equations + distribution ≠ selon profondeur

- Données propres à chaque modalité

- **Sorties de C** : minéralisation du COS

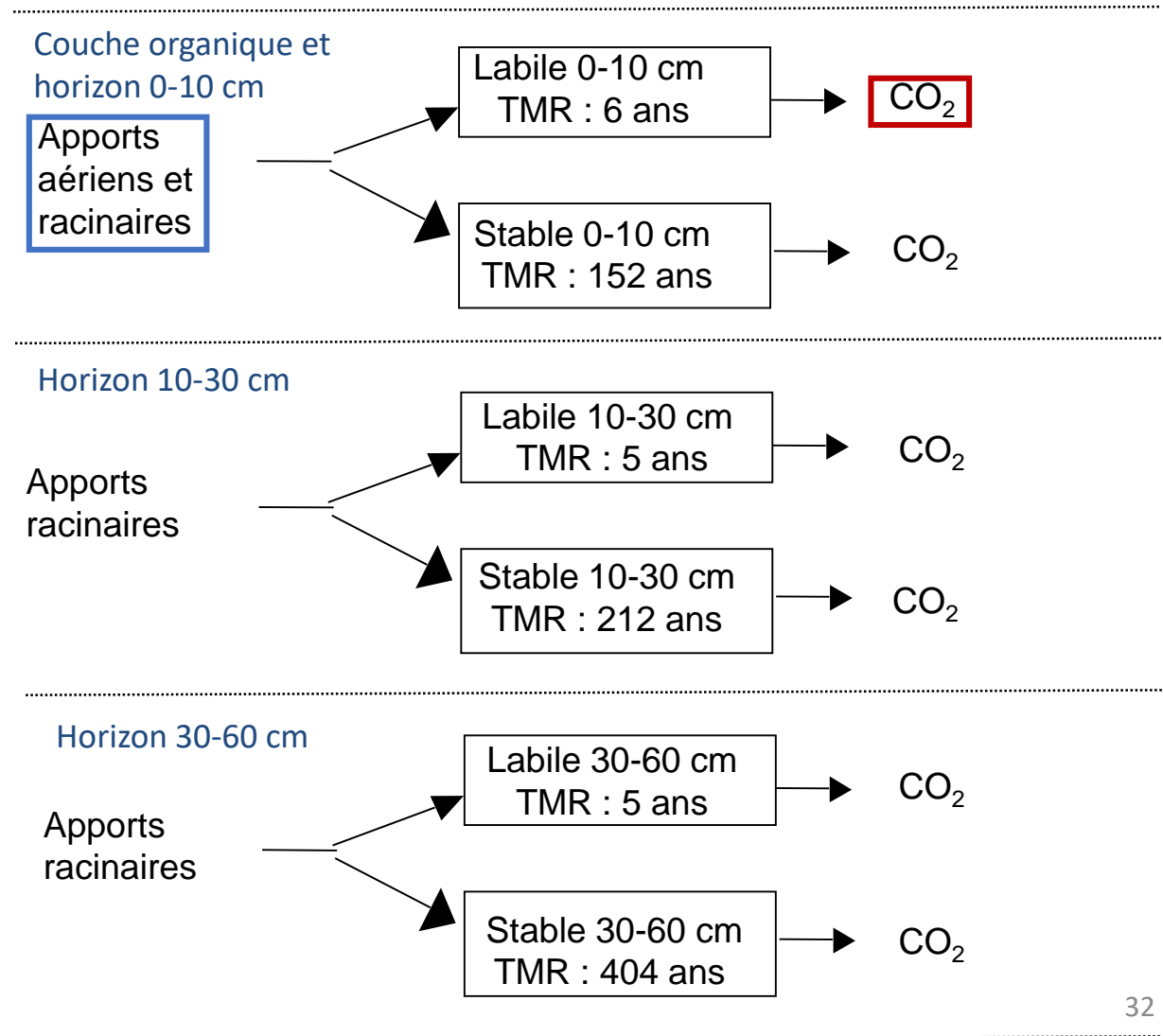
- Pas d'échange entre compartiment,

- Pas de minéralisation différentes entre nos modalités

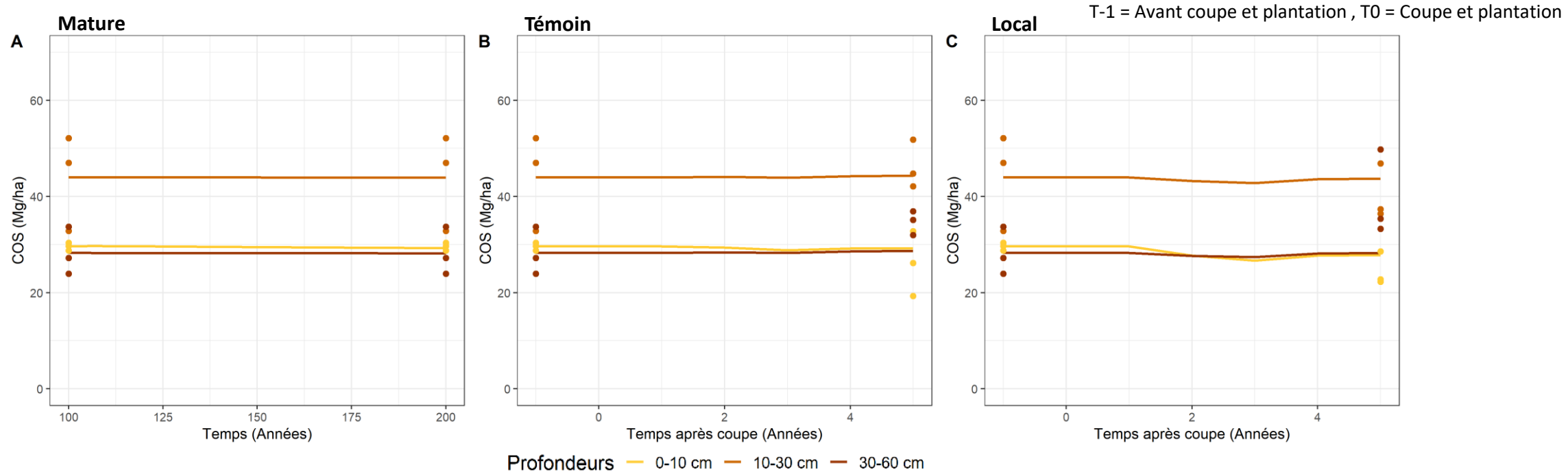
/!\ Impact du travail du sol → Entrées (litières)

- **Calibration du modèle selon stabilité en Mature (100 ans)**

Structure du modèle (D. Derrien)



Modélisation du Carbone organique du sol sur 5 ans



Simulations du COS (Mg/ha) réalisées par le modèle, pour (A) le stade mature stationnaire (sur 100ans), (B) la modalité Témoin (sur 5 ans) et (C) la modalité Local (sur 5 ans). Les points représentant nos données réelles en LP au stade mature (y=100 ou -1) ou au stade juvénile (à 5 ans) pour les modalités Témoin et Local

○ **Mature**

- Etat stationnaire sur 100 ans

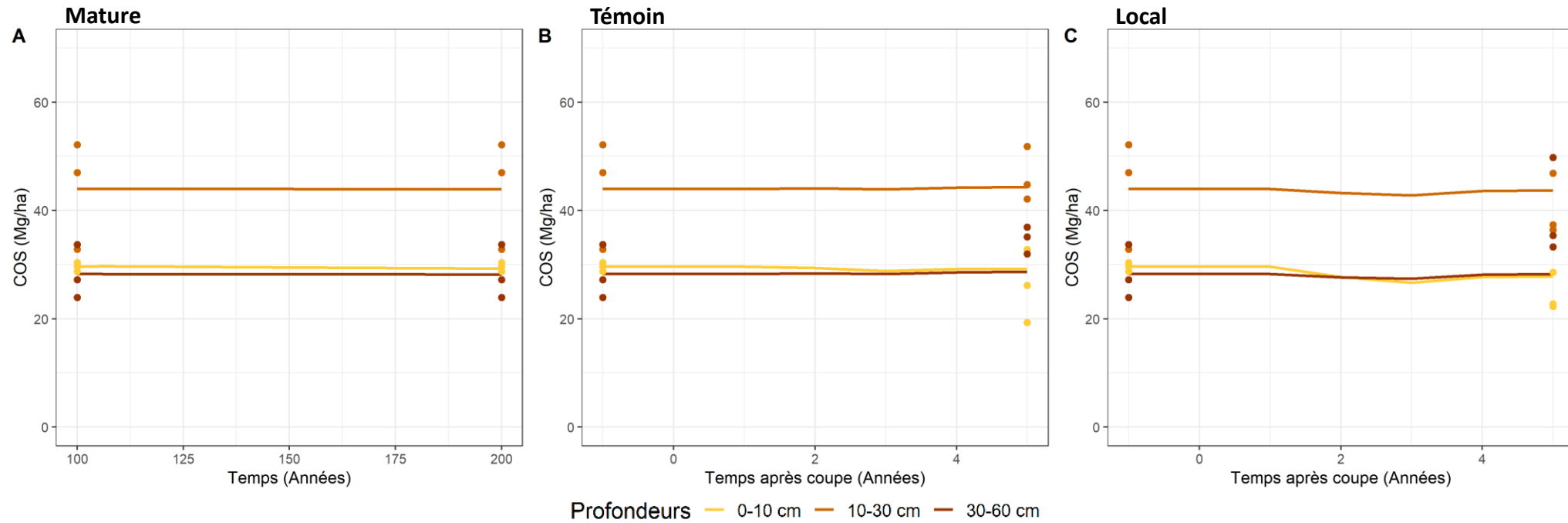
○ **Témoin**

- Légère diminution du COS entre 2 et 4 ans
- Surtout en 0-10cm
- -0,8% // M

○ **Local**

- Diminution du COS entre 2 et 4 ans
- Surtout en 0-10cm et 10-30cm
- -5% // M

Modélisation du Carbone organique du sol sur 5 ans



Simulations du COS (Mg/ha) réalisées par le modèle, pour (A) le stade mature stationnaire (sur 100ans), (B) la modalité Témoin (sur 5 ans) et (C) la modalité Local (sur 5 ans). Les points représentant nos données réelles en LP au stade mature (y=100 ou -1) ou au stade juvénile (à 5 ans) pour les modalités Témoin et Local

○ Limites du modèle

- Informations négligées par manque de connaissance (redistribution du carbone sur le profil, minéralisation différenciée)
- Différents coefficients adaptés : distribution COS vers stable/labile (d'après Balesdent et al. 2018), distribution des apports selon profondeur (d'après Jobbagy et Jackson, 2000)



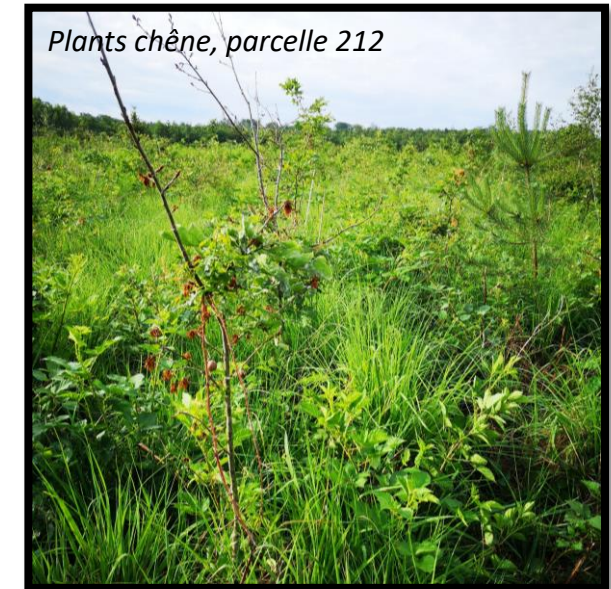
Conclusion



En Conclusion... et Perspectives

La préparation mécanisée su sol induit...	Résultats...
(1) Perte du Carbone Organique du Sol (COS), au moins au niveau de la ligne de plantation	- Un travail localisé n'entraîne pas une perte de stock de Carbone du sol ❌ - Un travail extrême (généralisé) entraîne une diminution du stock de Carbone du sol au niveau de l'inter-rang ❌
(2) Amélioration de la survie ainsi que de la croissances des plants de chênes sessiles	- Un travail localisé améliore la survie ✔️ - Un travail localisé améliore la croissance (non significatif) ✔️
(3) Meilleure séquestration du carbone dans la biomasse aérienne sur une révolution forestière complète	- Un travail localisé entraîne une meilleure séquestration du carbone sur une révolution forestière complète (TEM) ✔️ - Ou du moins pas de différence (TEM ref) ❌
(4) Modélisation du Carbone organique du sol sur 5 ans	- Incomplet (impact du travail sur redistribution / minéralisation...)

Perspective → Amélioration du modèle du Carbone organique du sol pour pouvoir simuler sur un cycle sylvicole complet



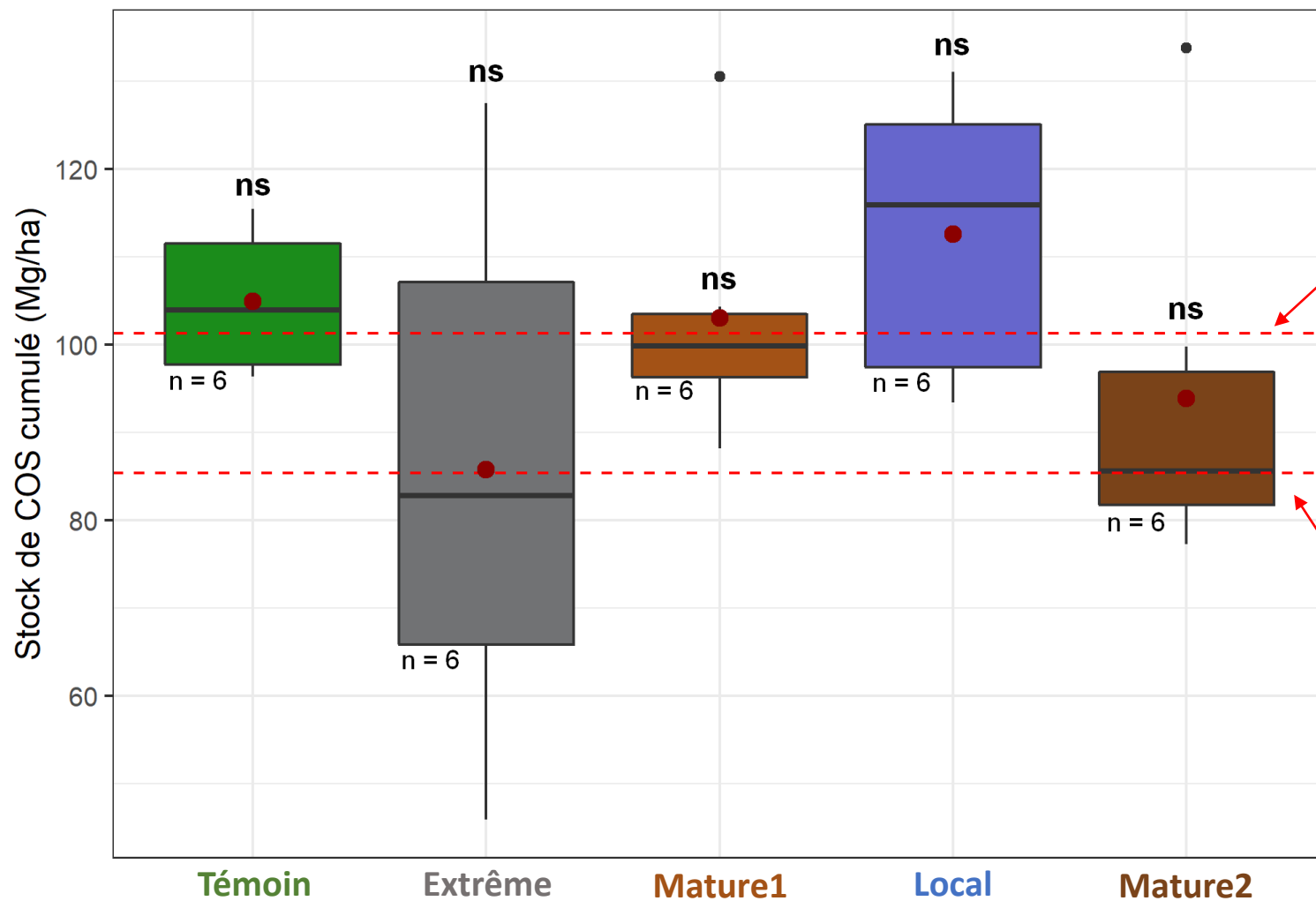
Merci pour votre attention



Bibliographie

- ADEME. « Carbone organique des sols : L'énergie de l'agro-écologie, une solution pour le climat ». 2014.
- Augusto P. L., Bureau F., Derrien D. « Séquestration de carbone organique dans les sols forestiers : impacts de la gestion sylvicole ». *Forêt-Entreprise*. 2019. Vol. 245, p. 62-66.
- Balesdent J., Basile-doelsch I., Chadoeuf J., Cornu S., Derrien D., Fekiacova Z., Hatté C. « Atmosphere–soil carbon transfer as a function of soil depth ». *Nature* [En ligne]. 2018.
Disponible sur : < <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0328-3> >
- Deleuze C., Morneau F., Renaud J.-P., Vivien Y., Rivoire M., Santenoise P., Longuetaud F., Mothe F., Hervé J.-C., Vallet P. « Estimer le volume total d'un arbre , quelles que soient l'essence, la taille , la sylviculture , la station ». *RDV Tech*. 2014. Vol. 44, p. 22-32.
- Fonseca F., Figueiredo T. De, Martins A. « Carbon storage as affected by different site preparation techniques two years after mixed forest stand installation ». *For. Syst*. 2014. Vol. 23, n°1, p. 84-92.
- Jandl R., Lindner M., Vesterdal L., Bauwens B., Baritz R., Hagedorn F., Johnson D. W., Minkinen K., Byrne K. A. « How strongly can forest management influence soil carbon sequestration ? ». *Geoderma* [En ligne]. 2007. Vol. 137, p. 253-268. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.09.003> >
- Jobbagy E. G., Jackson R. B. « THE VERTICAL DISTRIBUTION OF SOIL ORGANIC CARBON AND ITS RELATION TO CLIMATE AND VEGETATION ». *Ecol. Appl*. 2000. Vol. 10, n°April, p. 423-436.
- Jonard M., Nicolas M., Coomes D. A., Caignet I., Saenger A., Ponette Q. « Science of the Total Environment Forest soils in France are sequestering substantial amounts of carbon ». *Sci. Total Environ*. [En ligne]. 2017. Vol. 574, p. 616-628. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.028> >
- Liao C., Luo Y., Fang C., Li B. « Ecosystem Carbon Stock Influenced by Plantation Practice : Implications for Planting Forests as a Measure of Climate Change Mitigation ». *PLoS One* [En ligne]. 2010. Vol. 5, n°5,. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0010867> >
- Landmann G., Augusto L., Bilger I., Cacot E., Deleuze D., Gosselin M., Pousse N. « GERBOISE : Gestion raisonnée de la récolte de bois-énergie ». *Paris : ECOFOR, Angers : ADEME*. 2018. p. 7.
- Pellerin S., Bamière L., Launey C., Martin R., Schiavo M., Angers D., Augusto L., Balesdent J., Basile-Doelsch I., Ballassen V., Cardinael R., Cécillon L., Ceschia E., Chenu C., Constantin J., Darroussin J., Delacote P., Delame N., Gastal F., Gilbert D., Graux A.-I., Guenet B., Houot S., Klumpp K., Letort E., Litrico I., Martin M., Menasseri S., Mézière D., Morvan T., Mosnier C., Roger-Estrade J., Saint-André L., Sierra J., Théron O., Viaud V., Grateau R., Le Perchec S., Savini I., Réchauchère O. « Stocker du carbone dans les sols français, Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût? Synthèse du rapport d'étude ». INRA. 2019. p. 114.
- Löf M., Rydberg D., Bolte A. « Mounding site preparation for forest restoration : Survival and short term growth response in *Quercus robur* L . seedlings ». *For. Ecol. Manage.* [En ligne]. 2006. Vol. 232, p. 19-25. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.05.003> >
- Projet Alter. « Des alternatives aux herbicides : l'exemple des plantations en station acide ». 2012.
- Sanchez-Andrés R., Sanchez-Carrillo S., Benitez M., Sanchez-Lopez A. « Tillage induced differential morphometric responses and growth patterns in afforestation with *Quercus ilex* ». *Soil Tillage Res.* [En ligne]. 2006. Vol. 90, p. 50-62. Disponible sur : < <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.08.005> >
- Trichet P., Jolivet C., Arrouays D., Loustau D., Bert D., Ranger J. « Le maintien de la fertilité des sols forestiers landais dans le cadre de la sylviculture intensive du pin maritime Revue bibliographique et identification des pistes de recherches ». *Etude Gest. des Sols*. 1999. Vol. 6, n°4, p. 197-214.

Annexe 2 : Le stock de carbone du sol : Général

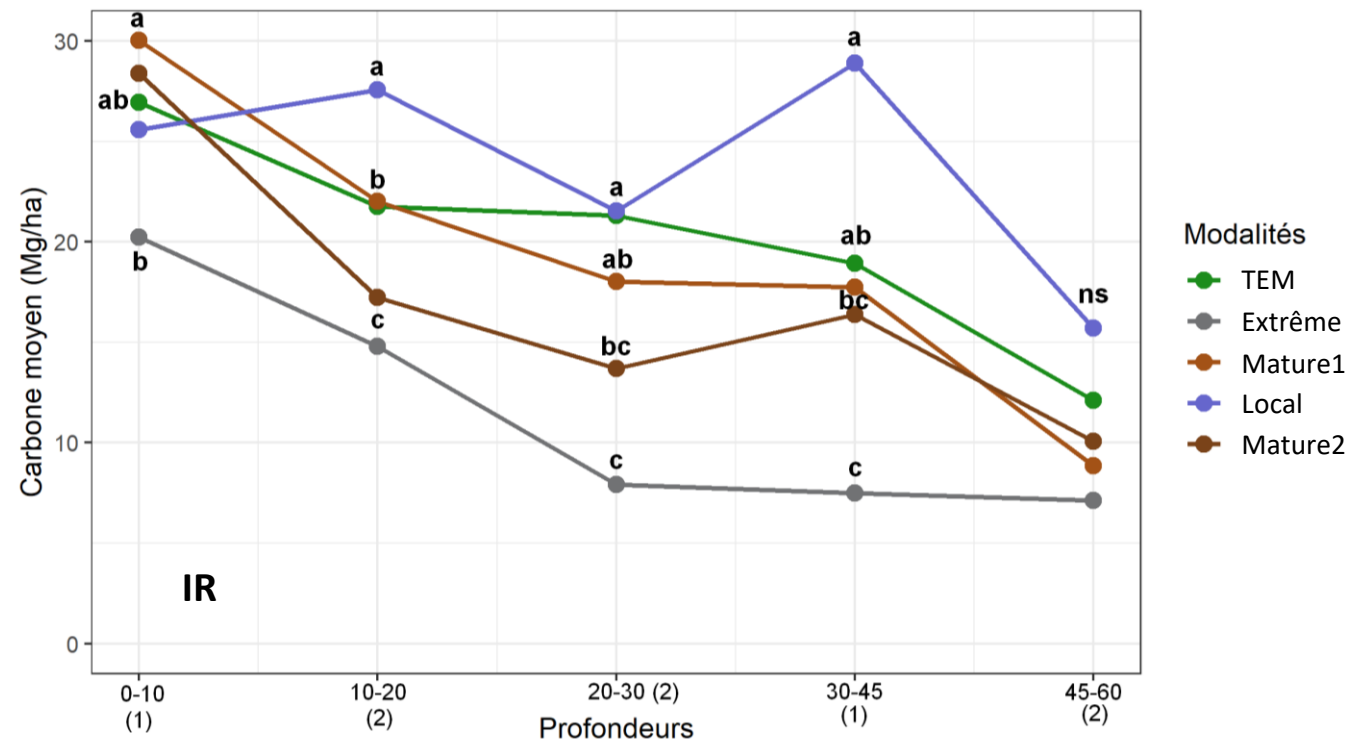
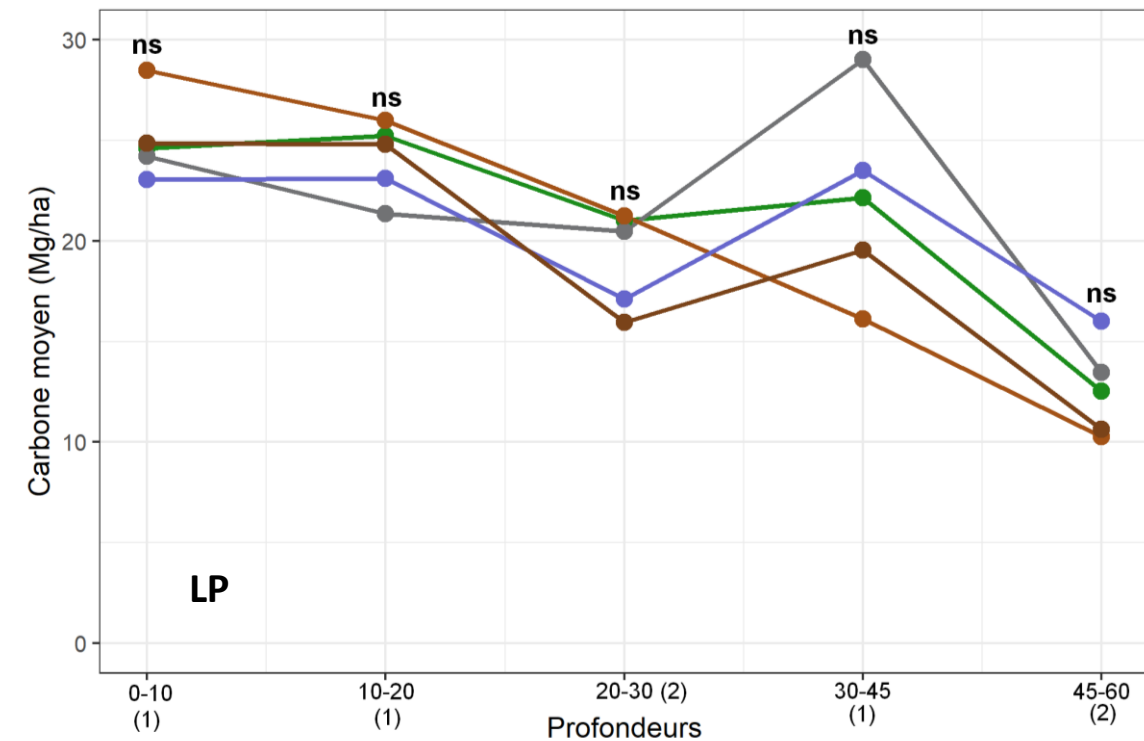


Ranger et Nys, 2003 : Donnée du carbone sur 65cm pour une forêt de Chêne sessile sur Brunisol (101,3 +/- 26,8 Mg/ha)

Donnée moyenne du stock de carbone sur 40 cm d'après 4 sites de RENECOFOR (85,38 Mg/ha)

Différences au niveau du stock de COS cumulé (Mg/ha) sur OL-60cm, sans pondération LP/IR (ANOVA p-value<0.05). Points rouges = Moyennes. Traits pointillés rouges = données bibliographiques.

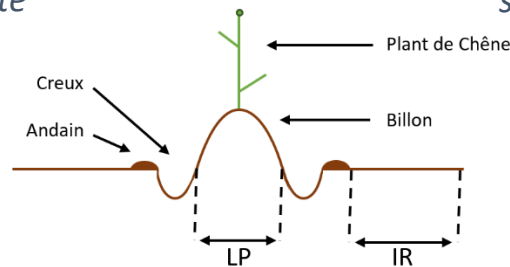
Annexe 3 : Stock de COS selon profondeurs



Différences au niveau du stock de COS moyen (Mg/ha) sur le profil de sol entier (0-60cm) en LP pour chaque modalité

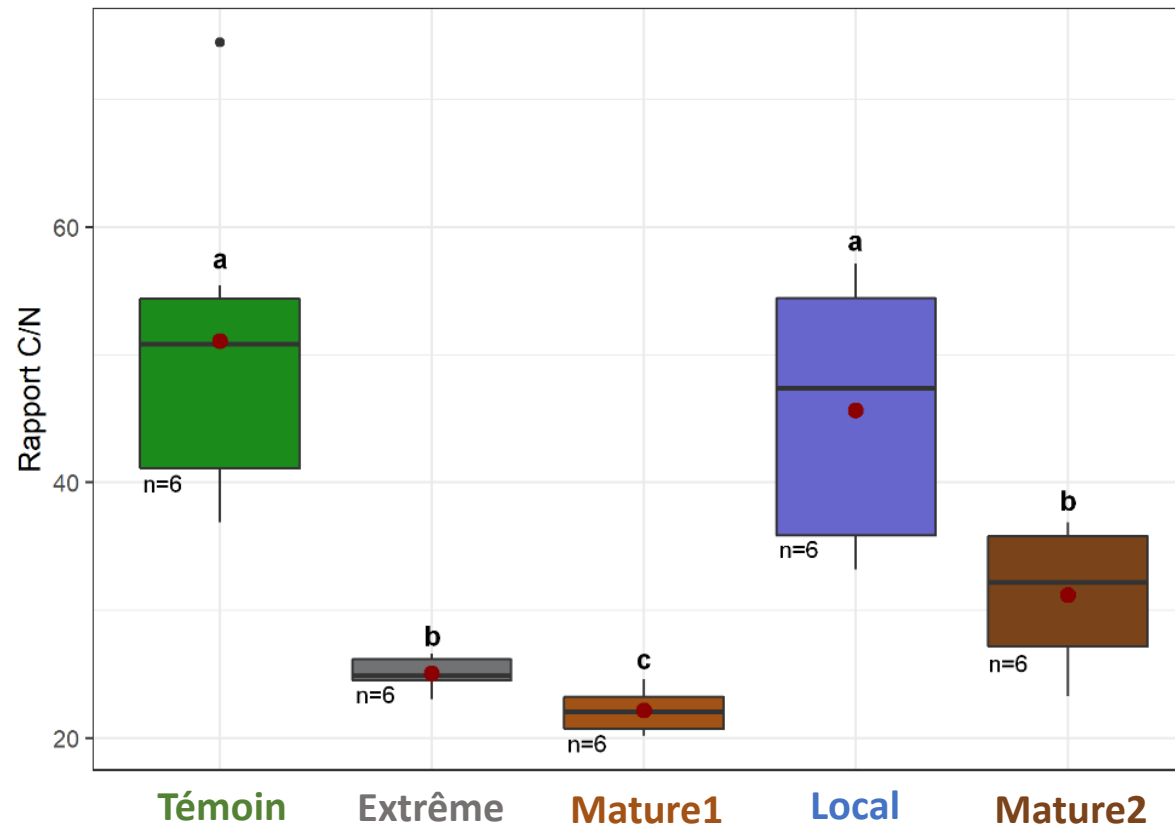
Différences au niveau du stock de COS moyen (Mg/ha) sur le profil de sol entier (0-60cm) en IR pour chaque modalité

- **Ligne de plantation**
- Pas de différences significatives



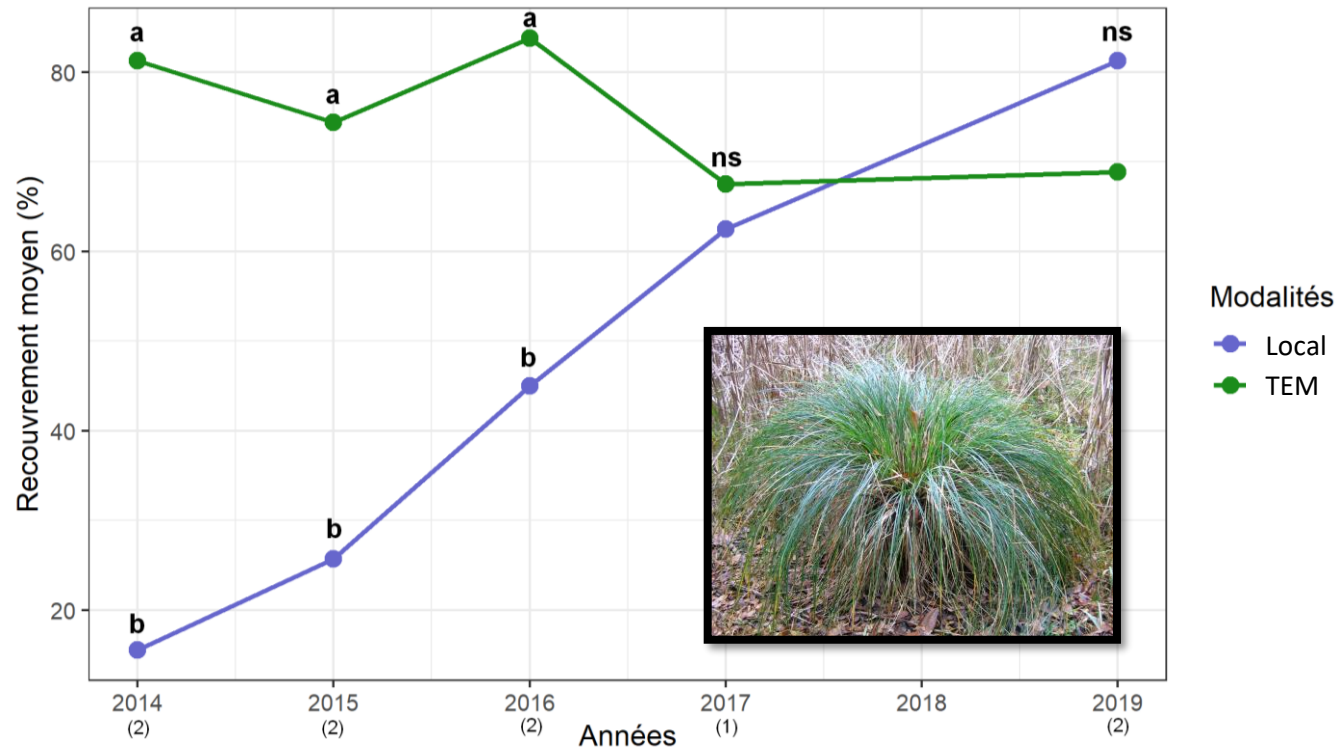
- **Inter-rang**
- « Local » au dessus, « Extrême » en dessous
- Pas de différence en 45-60cm

Annexe 4 : Rapport C/N au niveau de la litière



*Différences au niveau du rapport C/N entre nos différentes modalités
(Kruskal-wallis, p-value<0.05) au niveau de la litière
Points rouges = Moyennes*

Annexe 5 : Evolution du recouvrement de la Molinie



Evolution du recouvrement moyen (%) observé de la molinie, chaque année pour chaque modalité.

- **Couvert observé de la Molinie**
 - Important TEM (70-80%)
 - Plus faible « Local » sur 3 premières années
 - Non différent sur les 3 dernières années

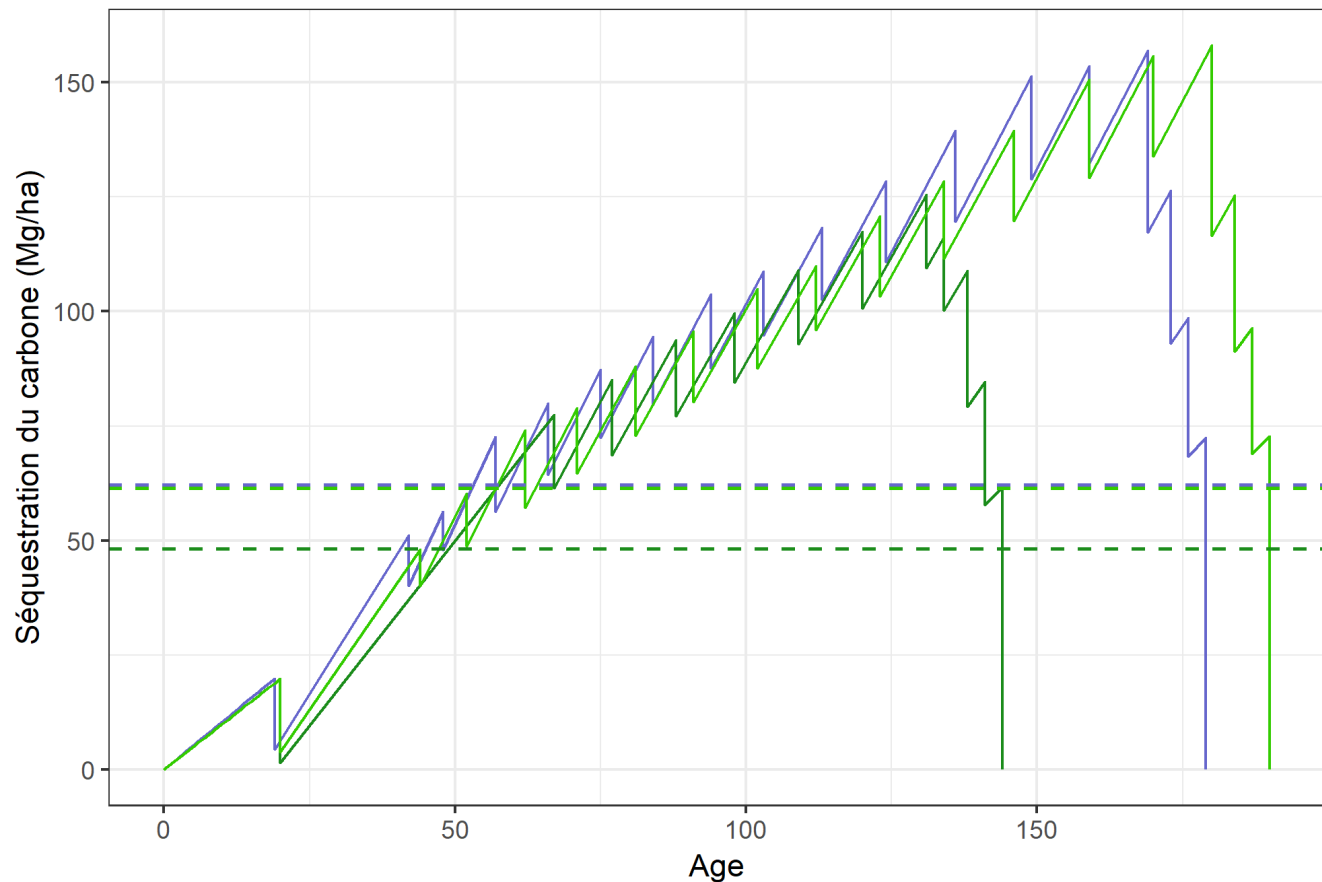
Annexe 6 : Evolution du recouvrement de la végétation



Evolution du recouvrement global moyen (%) et du recouvrement moyen (%) observé pour nos groupes d'espèces, chaque année pour chaque modalité.

Annexe 7 : Séquestration du C dans le peuplement : Changement Fertilité

- Croissance juvénile : 1 an de décalage TEM /LOCAL → TEM débutée à 20 ans à la place de 19 (même hauteur dominante)



*Séquestration du carbone (Mg/ha), sur une révolution forestière complète, avec hypothèse d'une perte de fertilité pour les cas témoins.
Lignes pointillés = Séquestration moyenne du carbone.*

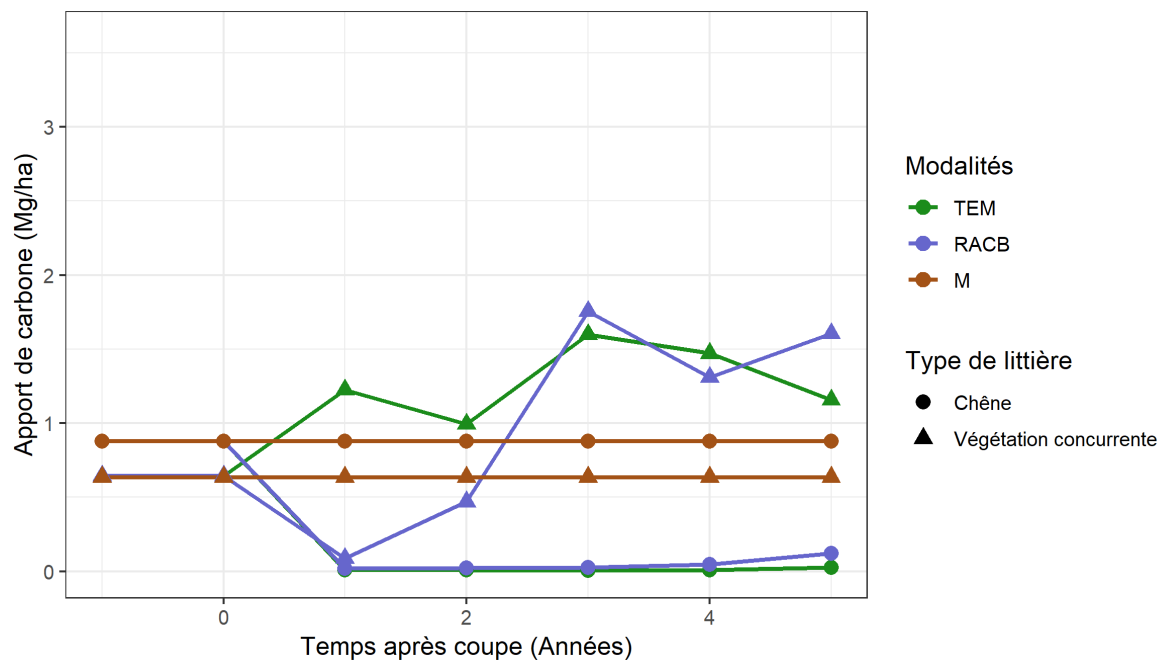
Cas
 — Local
 — TEM +1
 — TEM ref +1

- **Durée du cycle des TEM**
- Augmentée
- **Carbone moyen séquestré**
Equivalent à précédemment

	Arbres départ	Durée cycle (ans)	Carbone moyen (Mg/ha)
Citeaux	16148 (3600)	191	64.6
Citeaux 1500	1500	179	62.0
Local	1395	179	62.2
TEM	345	140	49.5
TEM ref	1170	179	62.2
TEM +1	345	144	48.2
TEM ref +1	1170	190	61.4

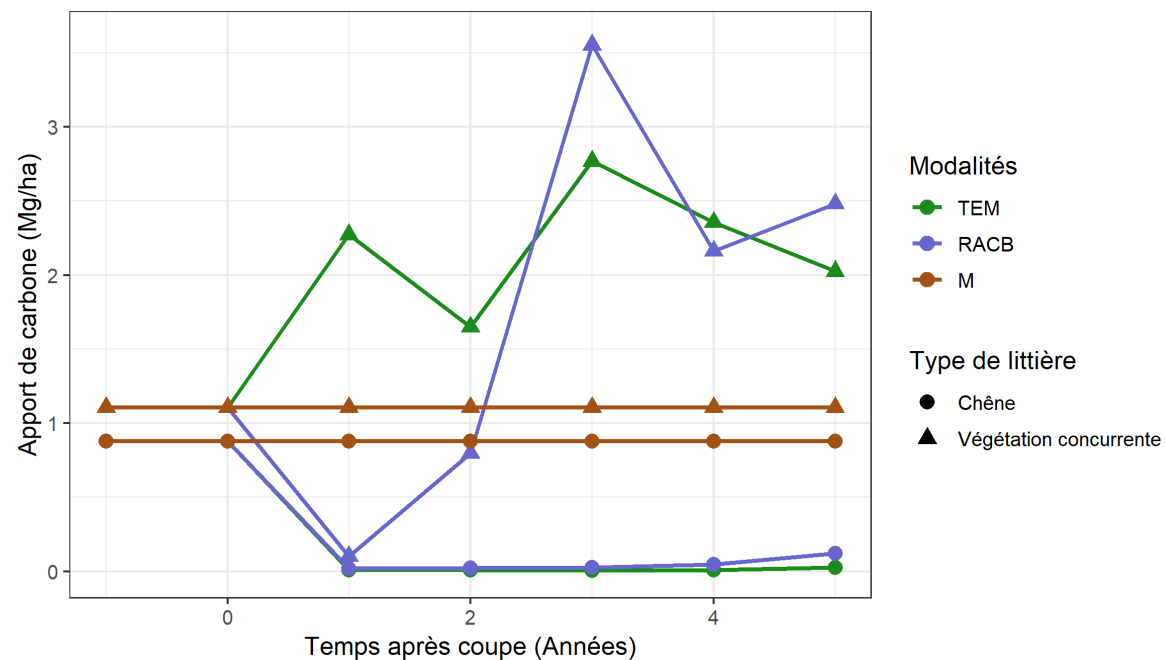
Annexe 8 : Entrées de litières pour modélisation du COS

Apports aériens



Apports de carbone aériens (Mg/ha) de chêne ou de végétation concurrente pour chaque modalité (d'après des équations)

Apports racinaires



Apports de carbone racinaires (Mg/ha) de chêne ou de végétation concurrente pour chaque modalité (d'après des équations)