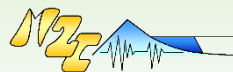


Séminaire de Restitution projet CAPSOL

Préparation mécanique du sol lors de la phase de plantation en forêt et dynamique des stocks de carbone organique du sol

5 & 6 Novembre 2019

Edouard Quibel, Yoann Copard, Lauric Cecillon, Michaël Aubert & Fabrice Bureau



Contexte

- La plantation forestière, voie privilégiée pour des stratégies d'atténuation et d'adaptation aux changements climatiques ([Madignier et al., 2015](#) ; [Rosa et al., 2014](#))
 - Séquestration du C dans la biomasse ligneuse,
 - Implantation d'essences plus adaptées aux conditions futures,
 - Renouvellement des peuplements endommagés



Contexte

- La plantation forestière, voie privilégiée pour des stratégies d'atténuation et d'adaptation aux changements climatiques
- Interdiction des produits phytosanitaires : alternative grâce à la préparation mécanique du sol (PMS)

Contexte

- La plantation forestière, voie privilégiée pour des stratégies d'atténuation et d'adaptation aux changements climatiques
- Interdiction des produits phytosanitaires : alternative grâce à la préparation mécanique du sol (PMS)
- PMS nécessaire à la plantation pour favoriser la croissance des plants mais avec des impacts connus en systèmes cultivés ([Egnell et al., 2014](#) ; [Lal, 2005](#))
 - Stock de C,
 - Propriétés du sol,
 - Biodiversité

Contexte

- La plantation forestière, voie privilégiée pour des stratégies d'atténuation et d'adaptation aux changements climatiques
- Interdiction des produits phytosanitaires : alternative grâce à la préparation mécanique du sol (PMS)
- PMS nécessaire à la plantation pour favoriser la croissance des plants mais avec des impacts connus en systèmes cultivés
- Développement de méthodes innovantes réputées moins impactantes : engins légers ; travail localisé sans retournement d'horizons

Objectif de la tache 1

**Evaluer l'impact des pratiques innovantes de travail mécanisé
du sol dans un contexte de plantation forestière
sur le stock de C du sol**

Questionnement

- **Hypothèse 1** : Les travaux de PMS lors de la plantation, provoquent une modification du stock de COS
 - **Hypothèse 1a** : La PMS entraine un déstockage de C à l'échelle du profil de sol travaillé
 - **Hypothèse 1b** : La PMS induit une hétérogénéité spatiale du stock de C



Questionnement

- **Hypothèse 1** : Les travaux de PMS lors de la plantation, provoquent une modification du stock de COS
 - **Hypothèse 1a** : La PMS entraîne un déstockage de C à l'échelle du profil de sol travaillé
 - **Hypothèse 1b** : La PMS induit une hétérogénéité spatiale du stock de C
- **Hypothèse 2** : La modification locale du stock de C se retrouve à l'échelle du peuplement forestier

Questionnement

- **Hypothèse 1** : Les travaux de PMS lors de la plantation, provoquent une modification du stock de COS
 - **Hypothèse 1a** : La PMS entraîne un déstockage de C à l'échelle du profil de sol travaillé
 - **Hypothèse 1b** : La PMS induit une hétérogénéité spatiale du stock de C
- **Hypothèse 2** : La modification locale du stock de C se retrouve à l'échelle du peuplement forestier
- **Hypothèse 3** : Le déstockage du C du sol à l'échelle du profil de sol touche majoritairement le pool labile (à temps de renouvellement rapide) de la matière organique du sol

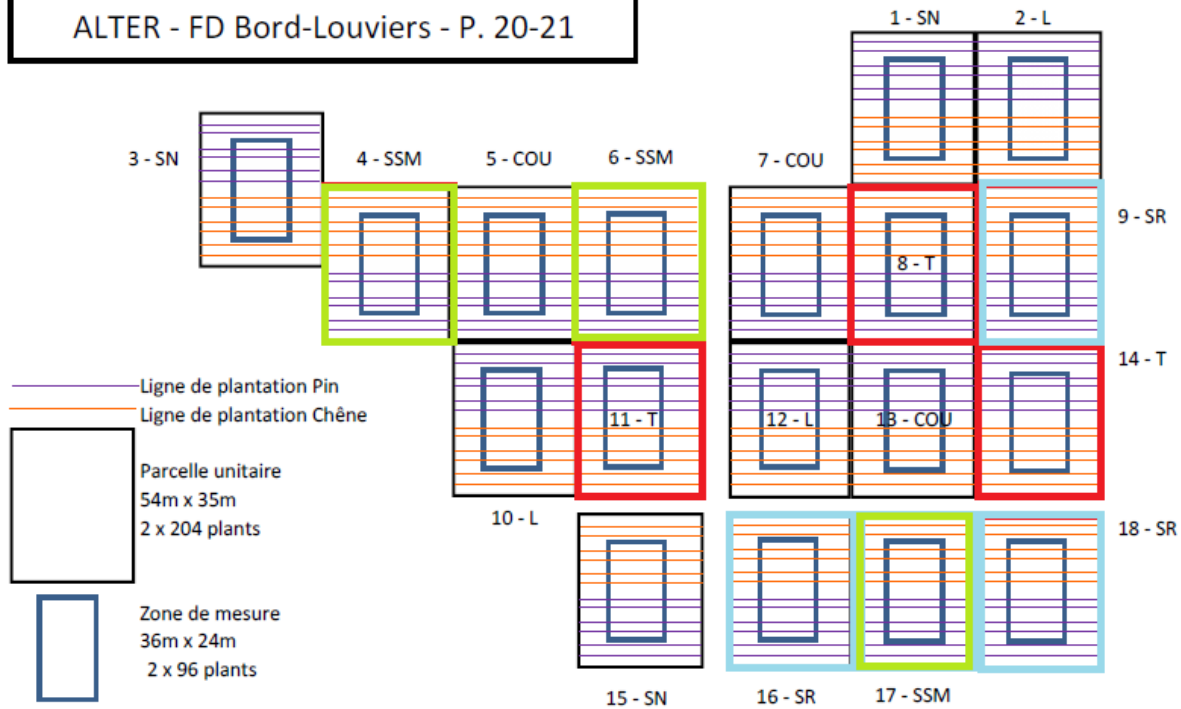


Dispositifs expérimentaux

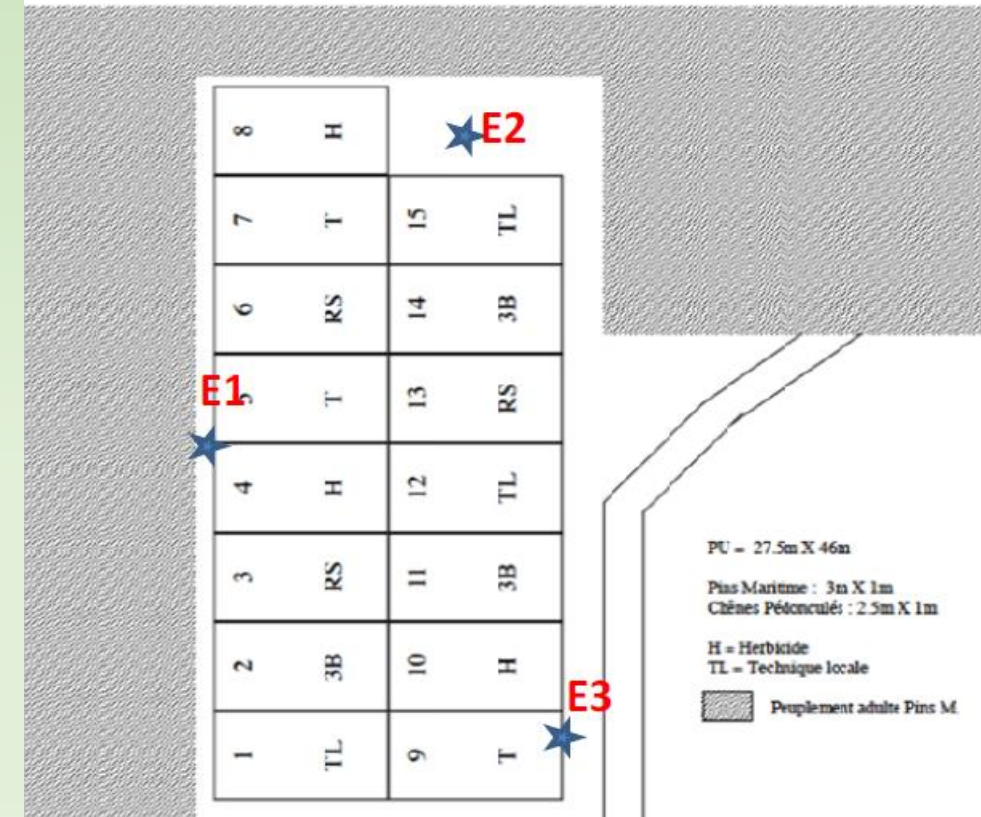
Dispositif ALTER



ALTER - FD Bord-Louvièrs - P. 20-21



PROJET ALTER Landes: Fougère



Dispositif ALTER



Dispositif ALTER

- I : témoin sans aucune intervention



Dispositif ALTER

- T : témoin sans aucune intervention
- SR : extraction des rhizomes de fougère aigle sur une bande de 1,5 m de large à l'aide du scarificateur réversible® (travail à 30 cm de profondeur)



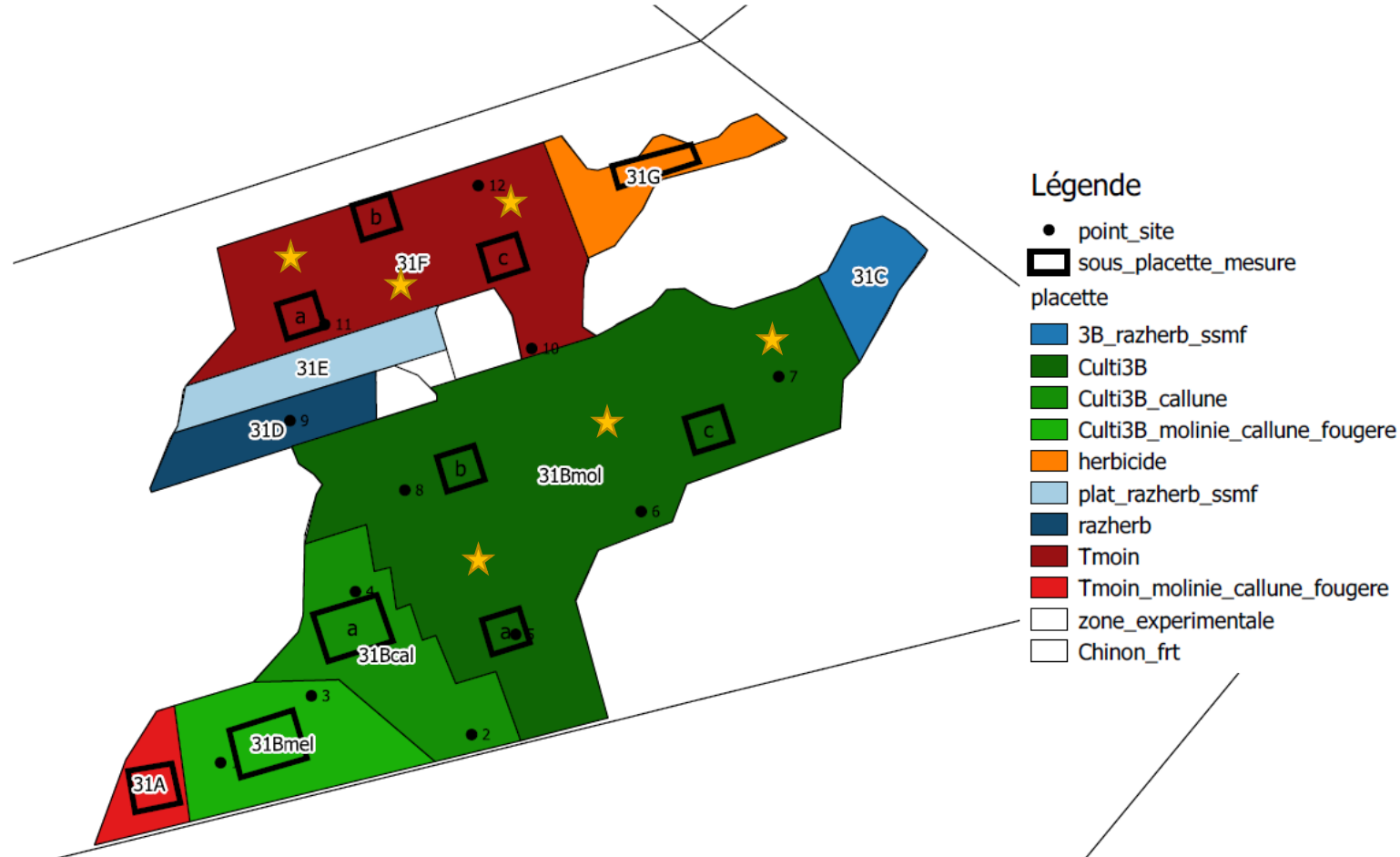
Dispositif ALTER

- T : témoin sans aucune intervention
- SR : extraction des rhizomes de fougère aigle sur une bande de 1,5 m de large à l'aide du scarificateur réversible® (travail à 30 cm de profondeur)
- SR + SSM : idem SR
+ création d'un billon de 30 cm à l'aide du sous-soleur multifonction® (travail à 60 cm de profondeur)



Dispositif Pilote

Dispositif expérimental PILOTE FD Chinon (Parc. 31)



Dispositif Pilote



Dispositif Pilote

- T : témoin sans aucune intervention

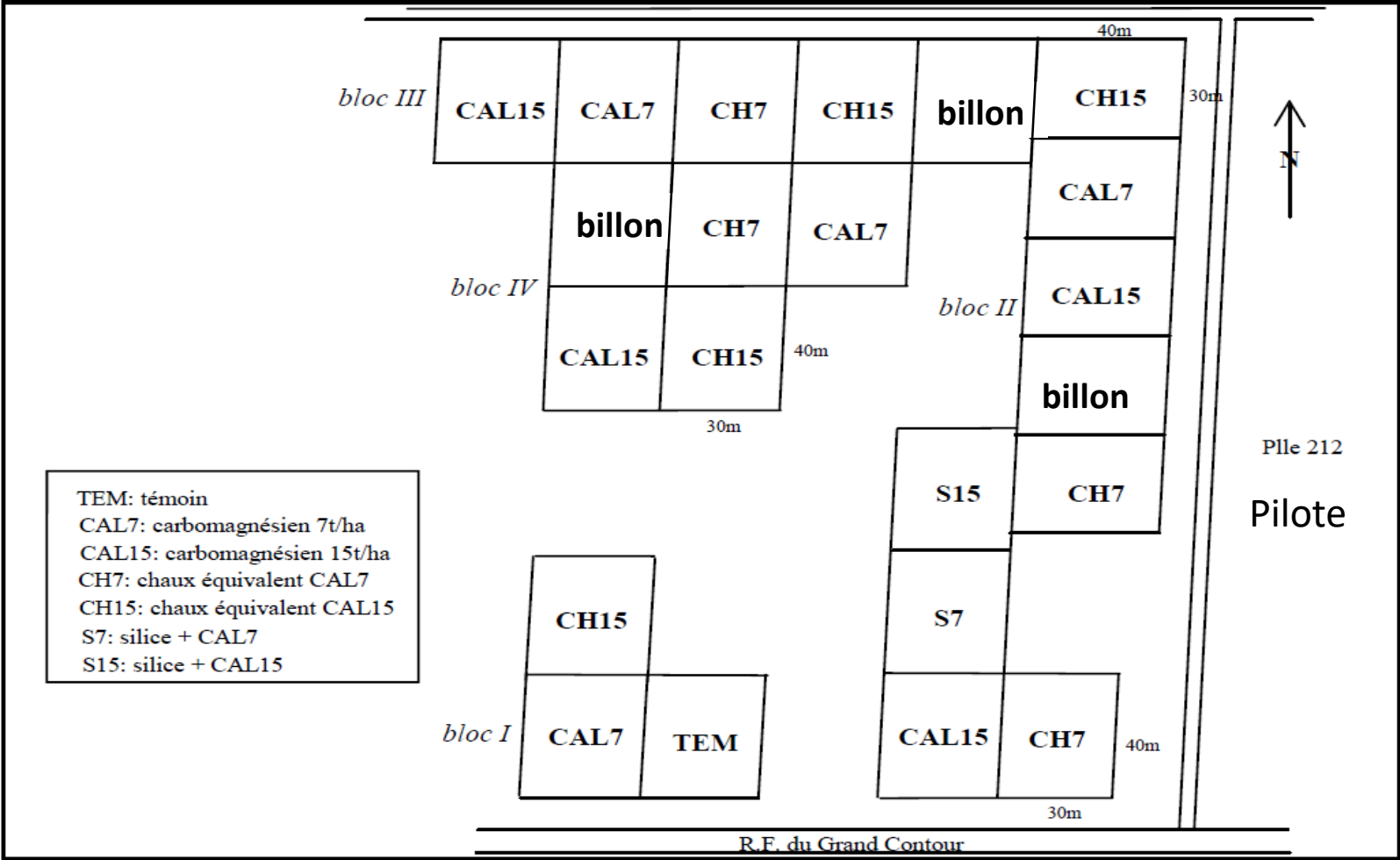


Dispositif Pilote

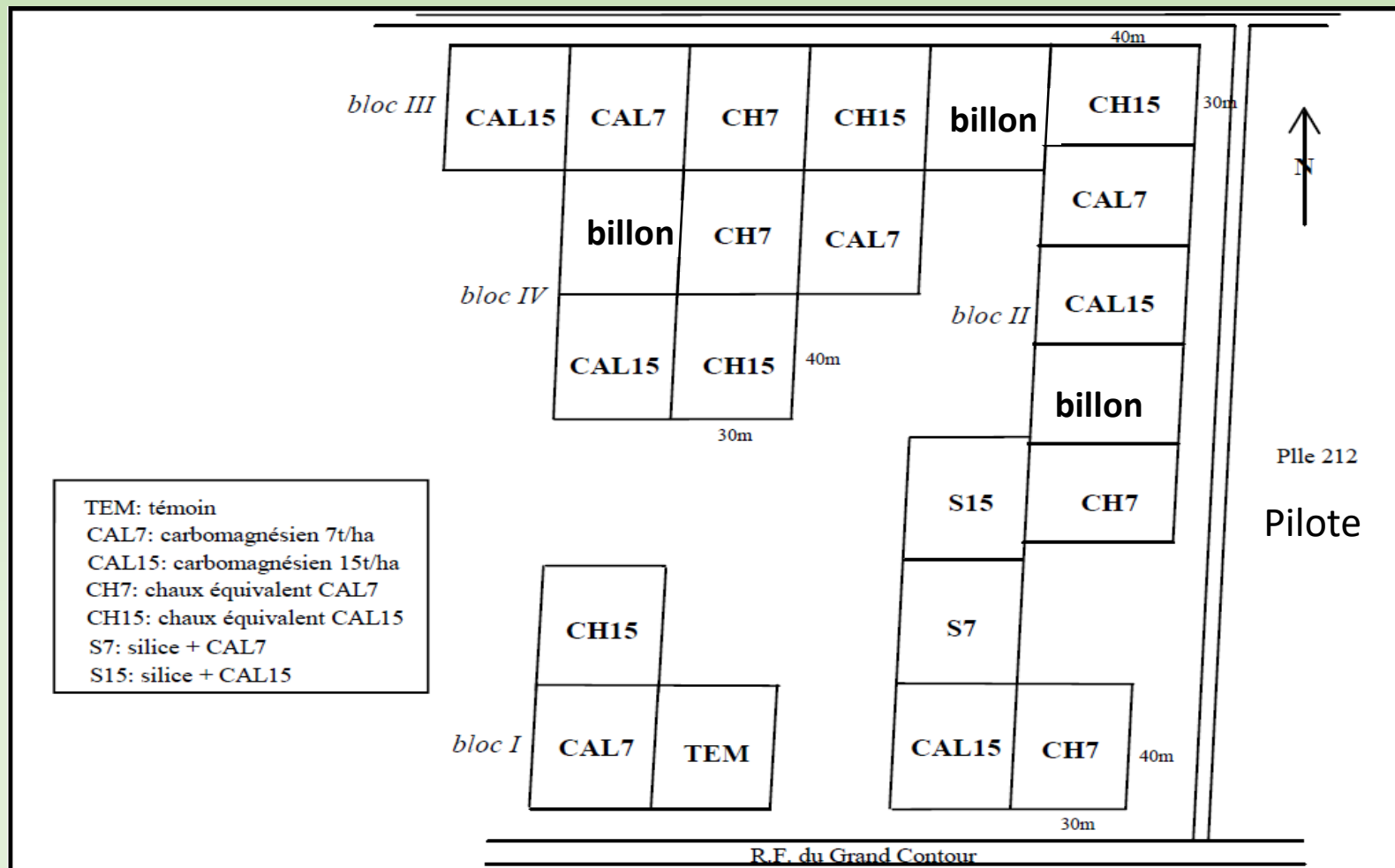
- T : témoin sans aucune intervention
- RAZ + C3B : désherbage mécanique par un Razherb[®] sur 1,6 m de large
+ création d'un billon de 20 à 30 cm à l'aide du culti 3B[®] sur 1,5 m de large
(travail de 40 à 60 cm de profondeur)



Dispositif Chrono

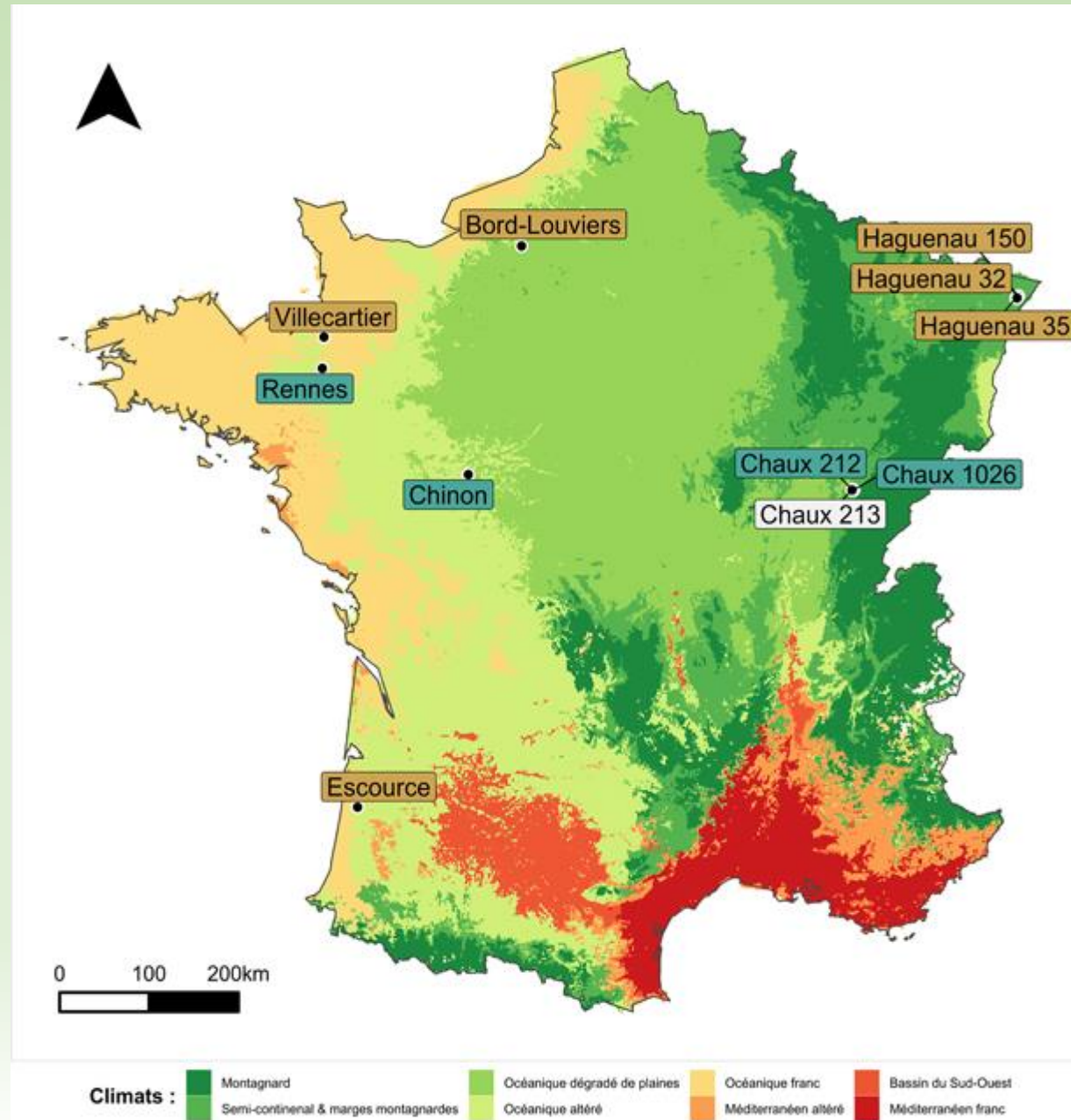


Dispositif Chrono



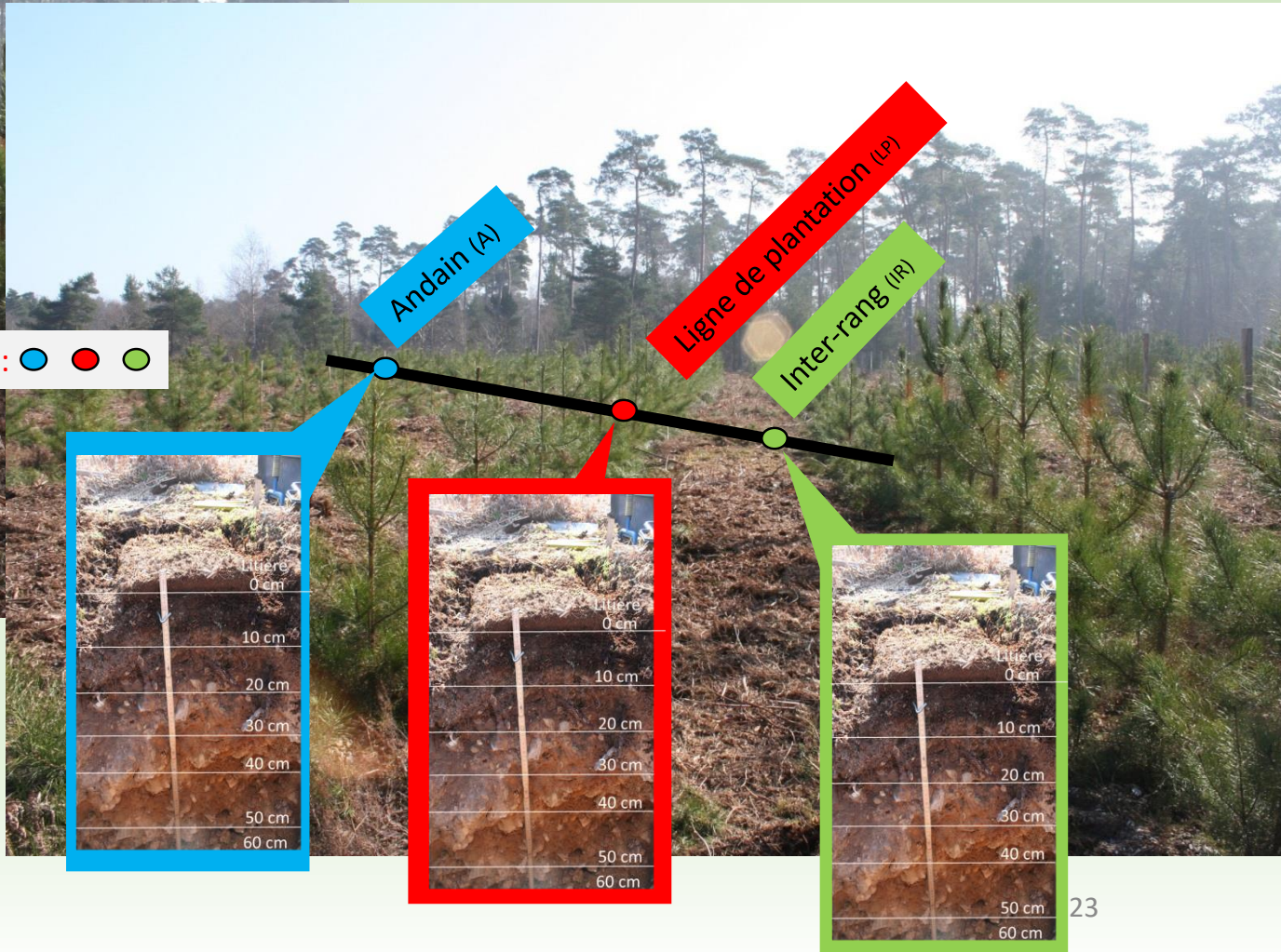
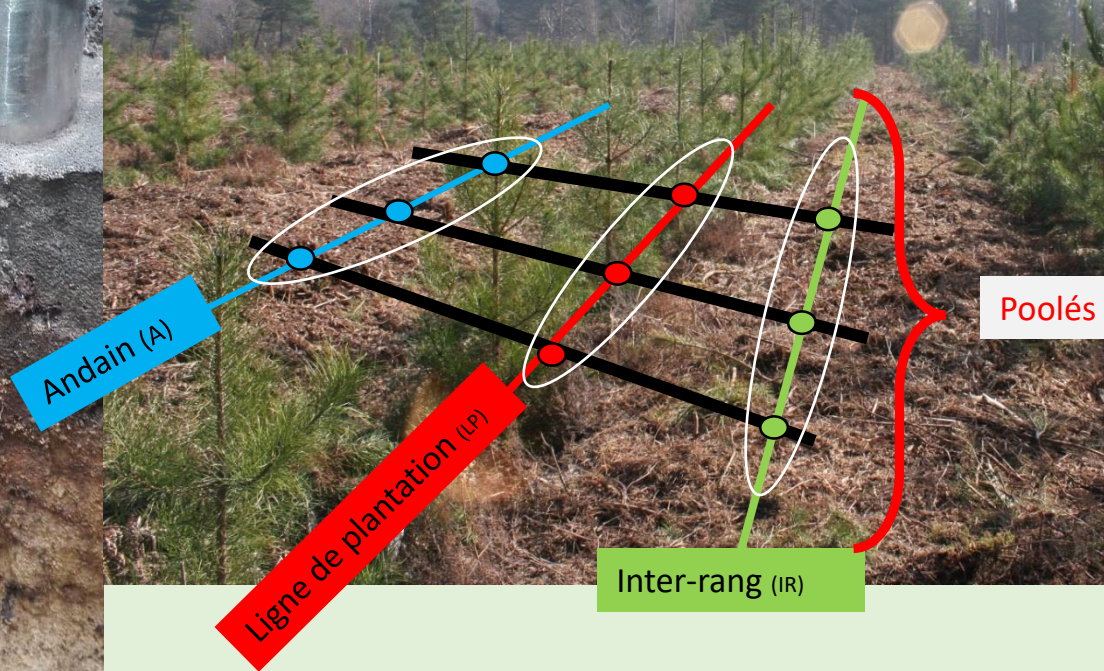
- T : témoin sans aucune intervention (parcelle à proximité)
- Billonnage (P213) : labour en plein puis billonnage


Carte des sites



Stratégie d'échantillonnage

3 transects élémentaires -> 1 transect composite



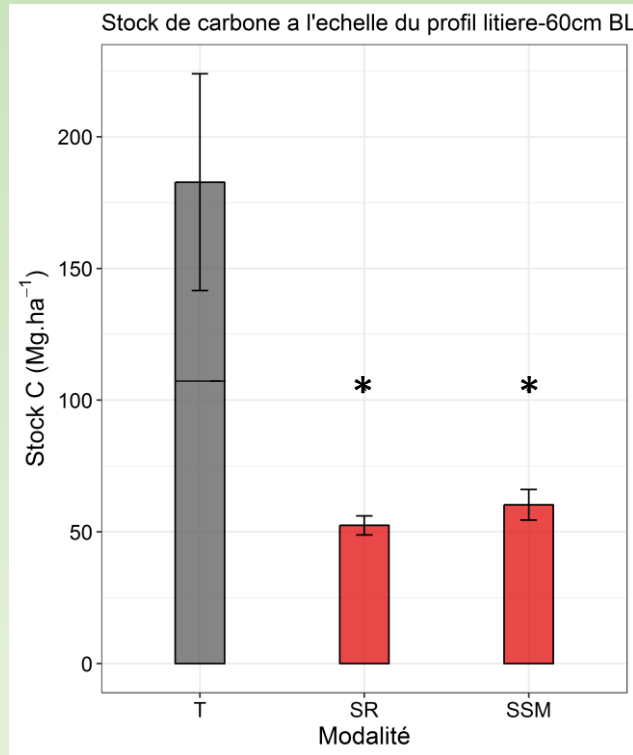


Site Alter de Bord Louviers

Données présentées :

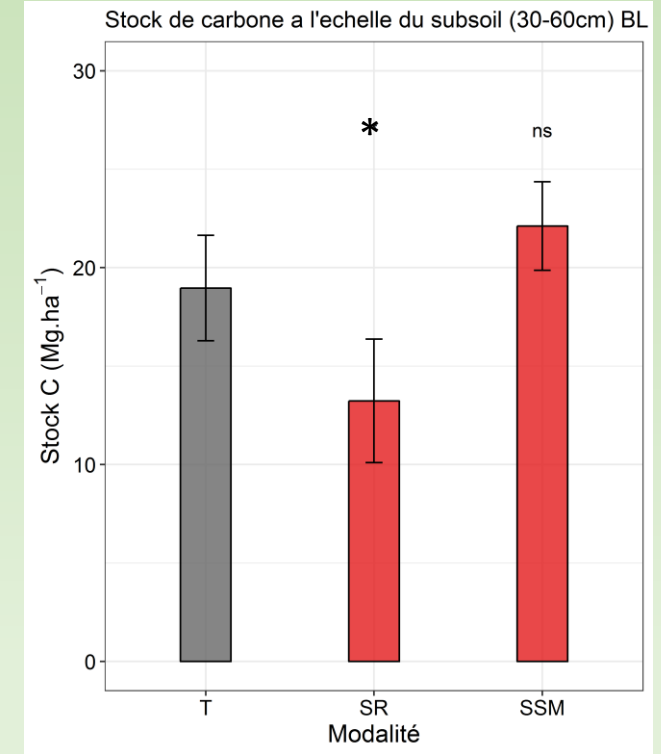
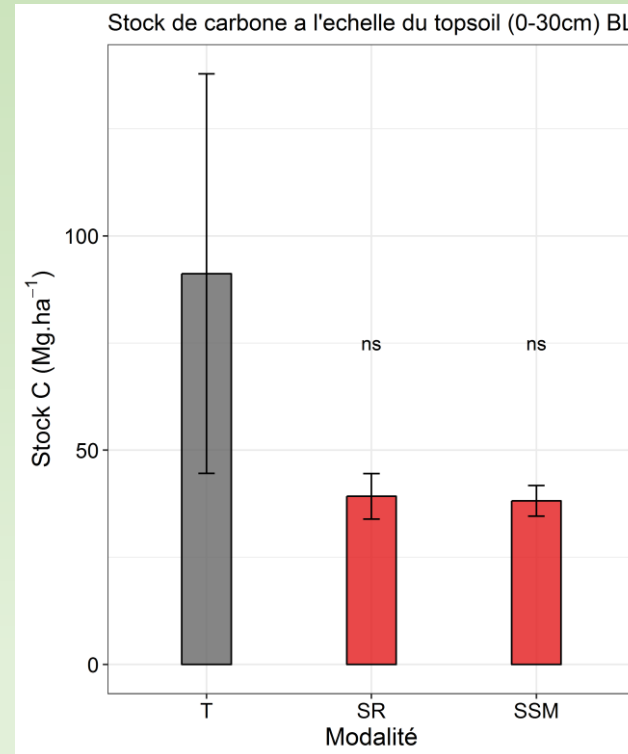
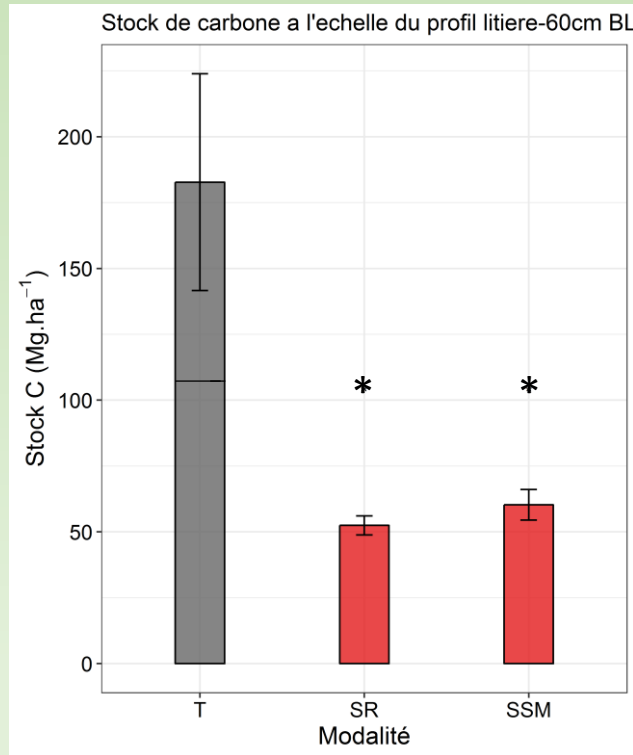
- Stock de C sur la ligne de plant
- Stock de C sur par zone de prélèvement
- Stock de C à l'échelle du peuplement
- Minéralisation
- Carbone microbien
- Pyrolyse Rock Eval
- C extractible à l'eau

Bord Louviers : stocks de C sur la ligne de plants



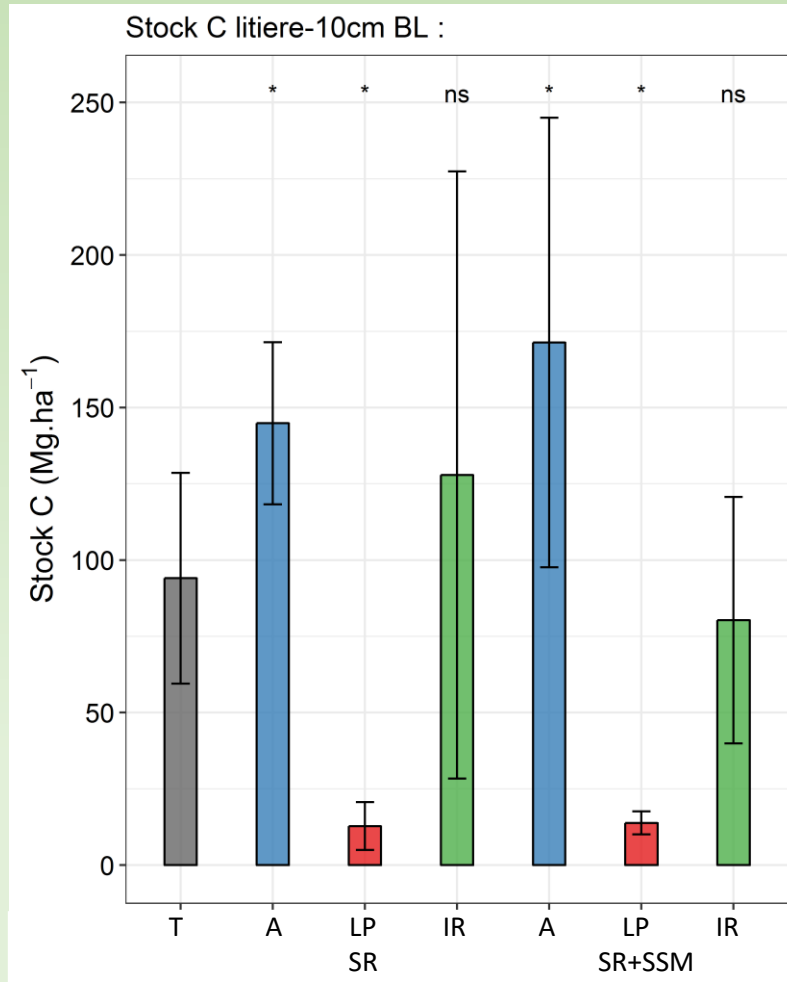
- Part importante de la litière : 40 % du stock litiere-60 cm
- Effet des outils : ↘ significative du stock total

Bord Louviers : stocks de C sur la ligne de plants



- Part importante de la litière : 40 % du stock litiere-60 cm
- Effet des outils : ↘ significative du stock total
 - ↘ du stock sur le topsoil (ns)
 - ↘ du stock dans le subsoil sur SR et redistribution sur SR + SSM (ns)

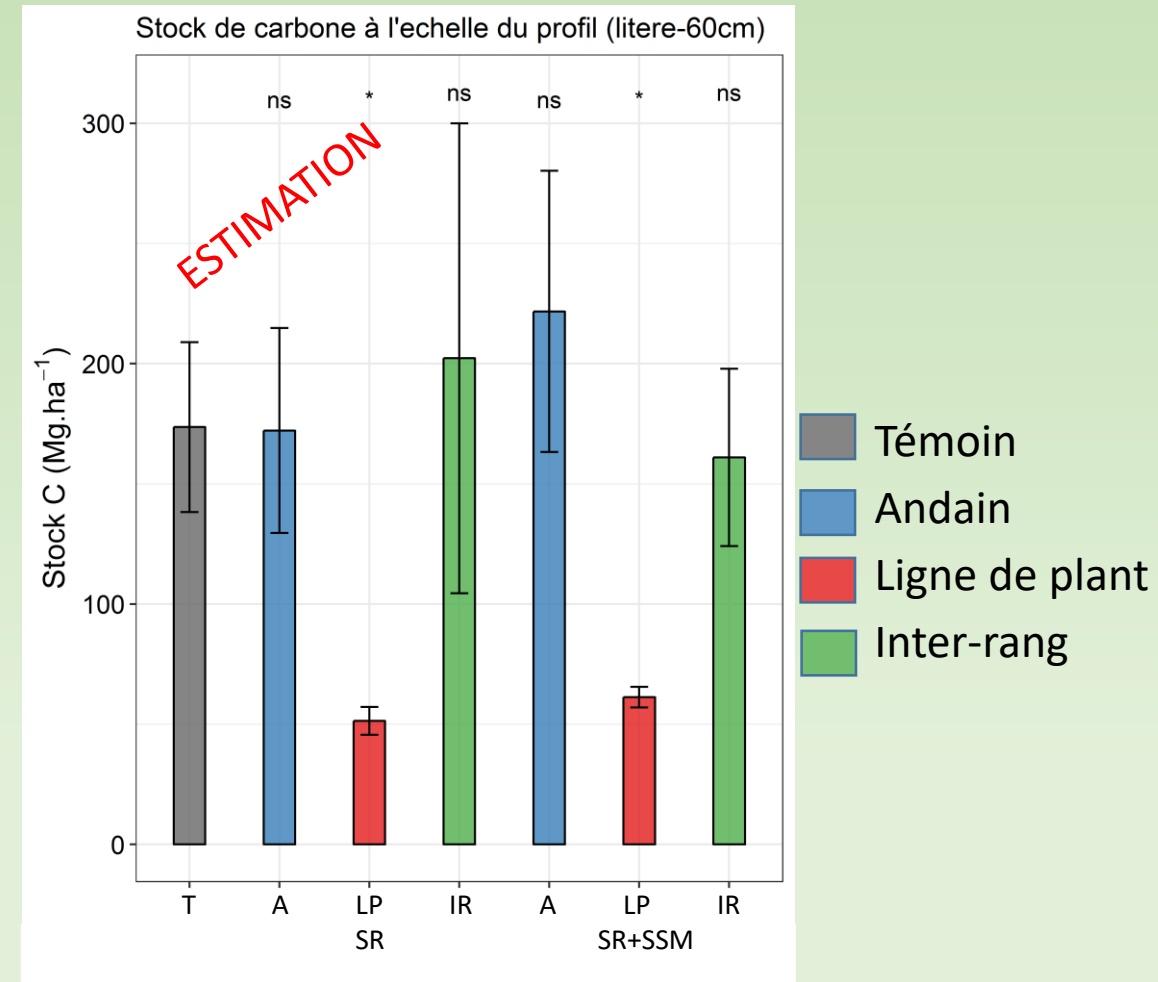
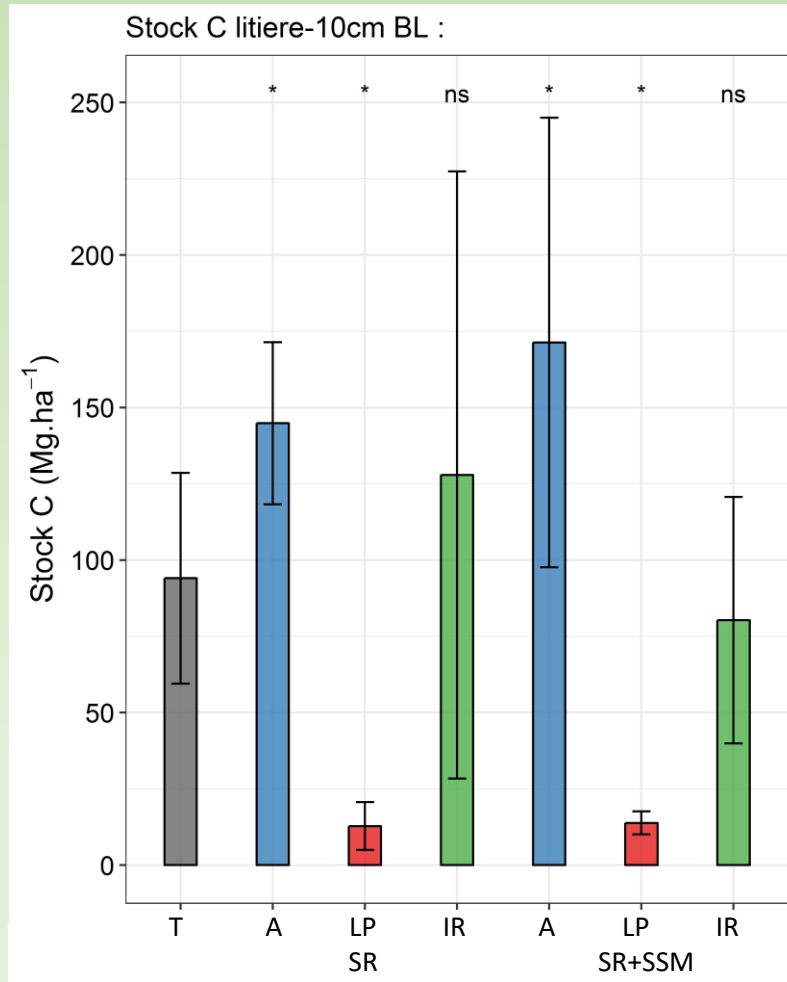
Bord Louviers : stock de C par zone de prélèvement



Les stocks mesurés **sur l'épisolum humifère** :

- ↘ sur la ligne de plant
- ↗ sur la zone d'andainage
- ≈ au témoin sur l'inter-rang

Bord Louviers : stock de C par zone de prélèvement



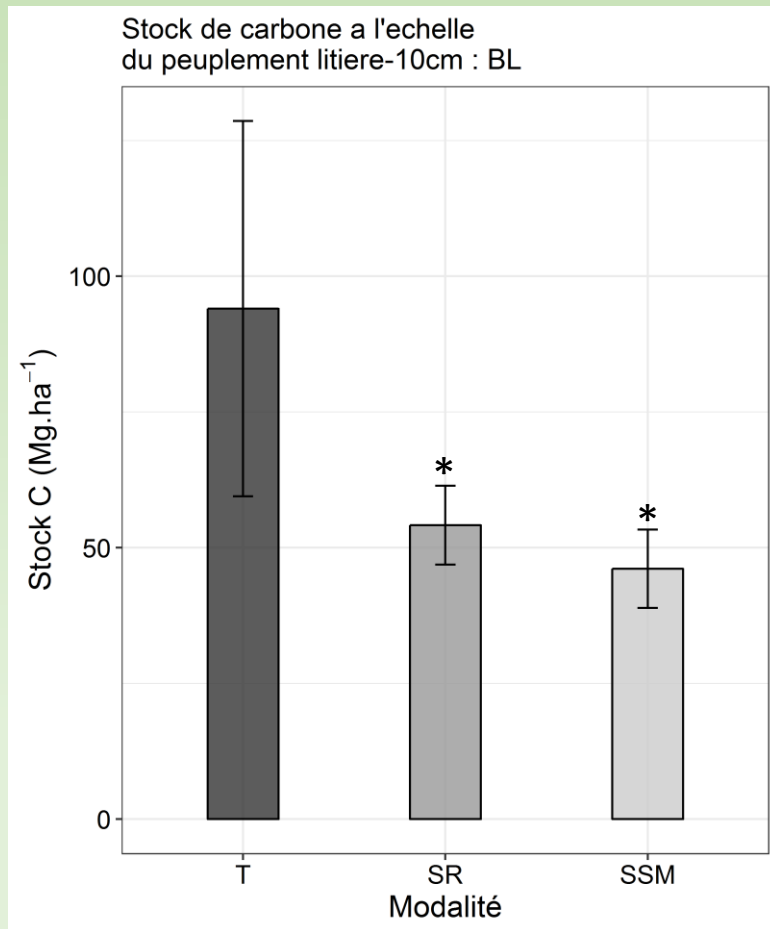
Les stocks mesurés **sur l'épisolum humifère** :

- ↘ sur la ligne de plant
- ↗ sur la zone d'andainage
- ≈ au témoin sur l'inter-rang

Les stocks mesurés **sur l'estimation du profil de sol** :

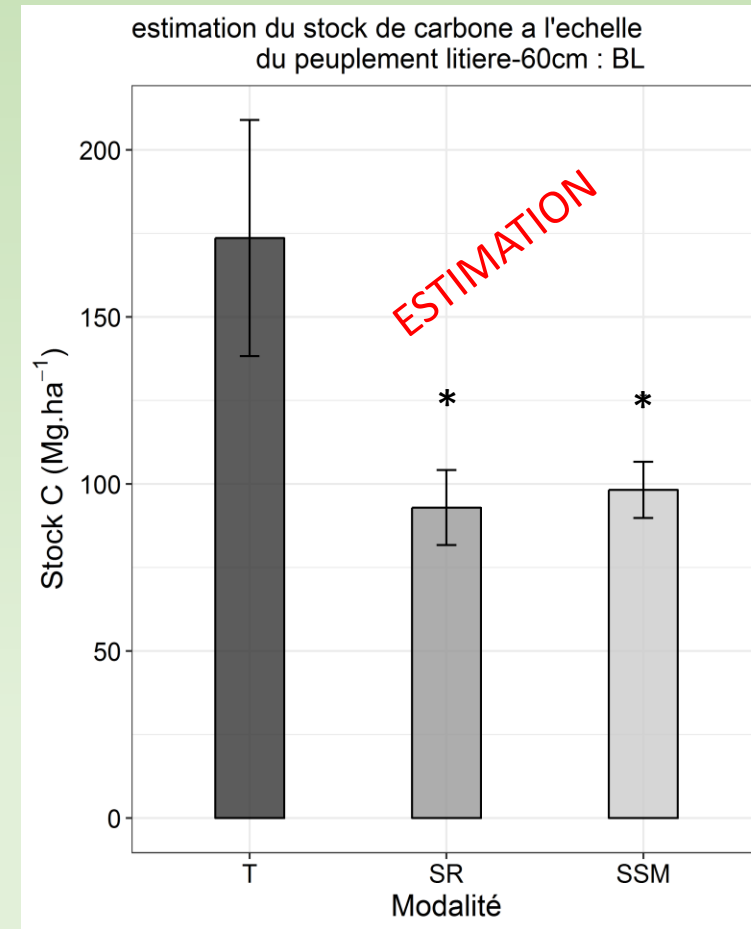
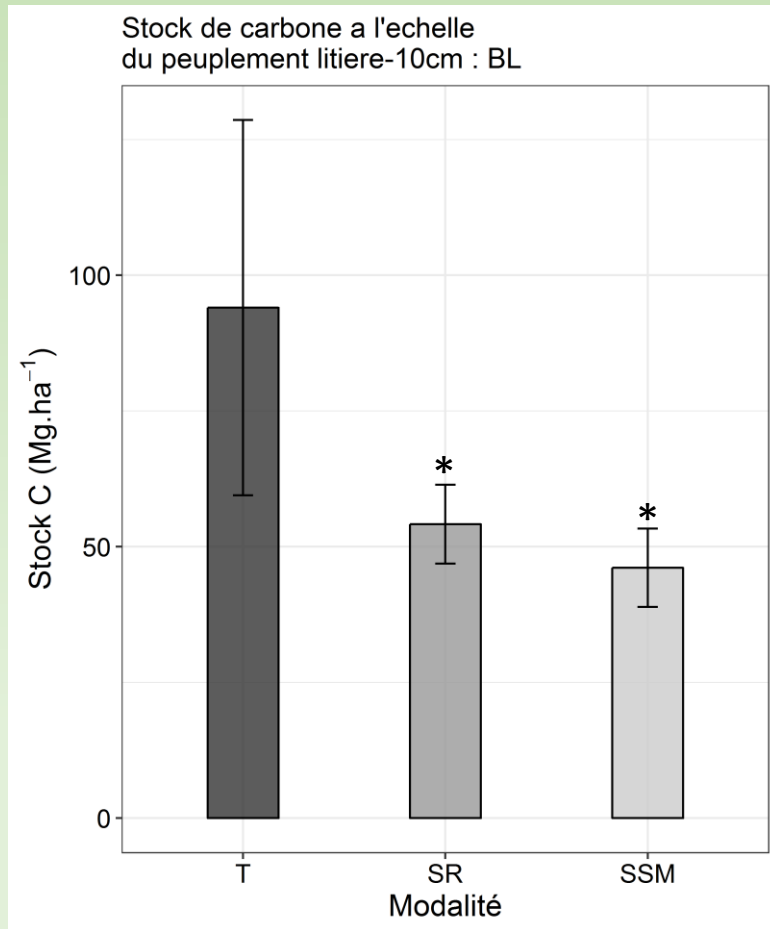
- ↘ sur la ligne de plant
- ≈ au témoin sur la zone d'andainage
- ≈ au témoin sur l'inter-rang

Bord Louviers : stock de C à l'échelle du peuplement



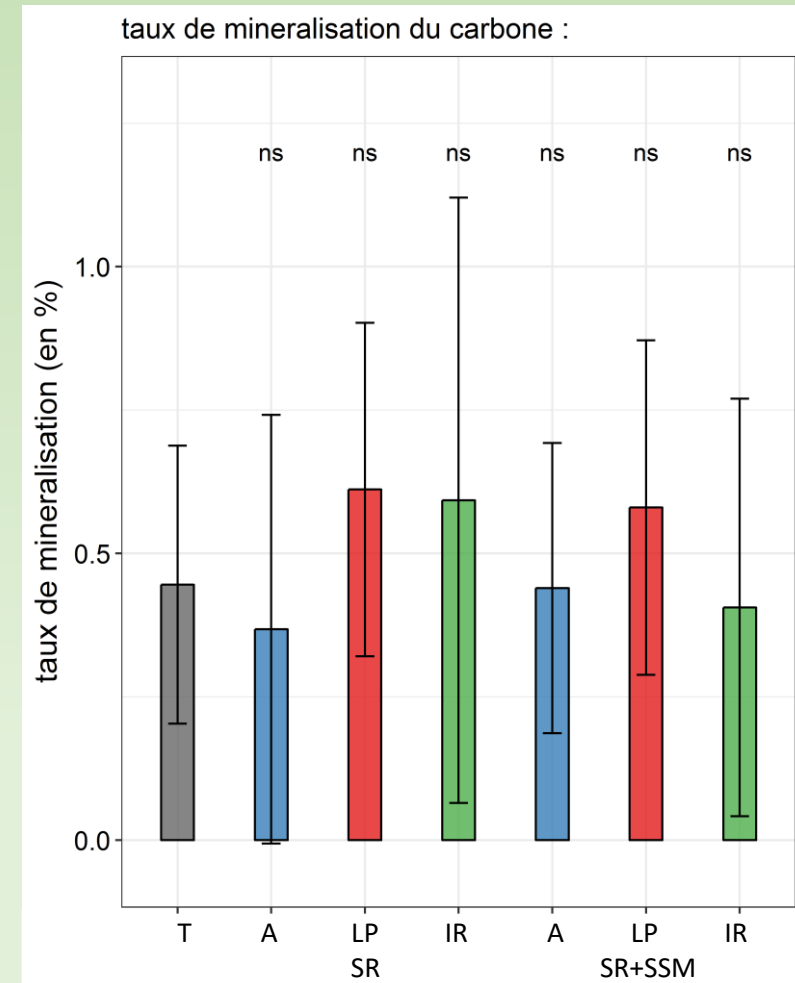
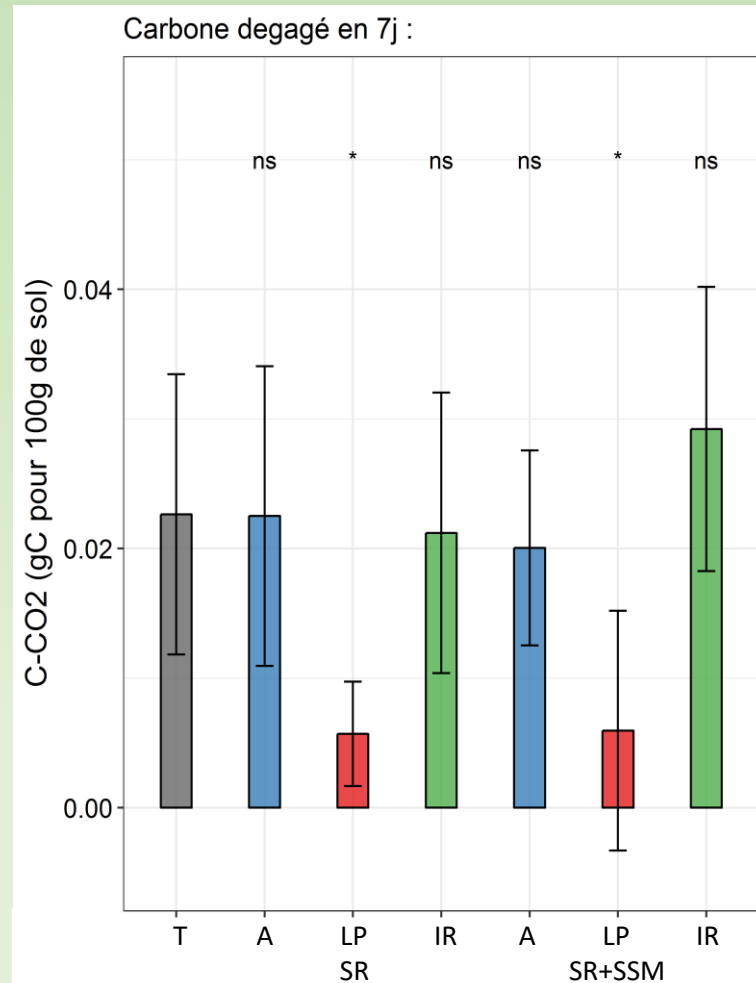
- Les outils provoquent une diminution du stock de C à l'échelle du peuplement forestier
- Cet effet doit être modulé par les surfaces travaillées en fonction des caractéristiques du sol
- La \searrow de stock sur LP n'est pas compensée par \nearrow sur A. Il y a donc bien déstockage

Bord Louviers : stock de C à l'échelle du peuplement



- Les outils provoquent une diminution du stock de C à l'échelle du peuplement forestier
- Cet effet doit être modulé par les surfaces travaillées en fonction des caractéristiques du sol
- La \searrow de stock sur LP n'est pas compensée par \nearrow sur A. Il y a donc bien déstockage

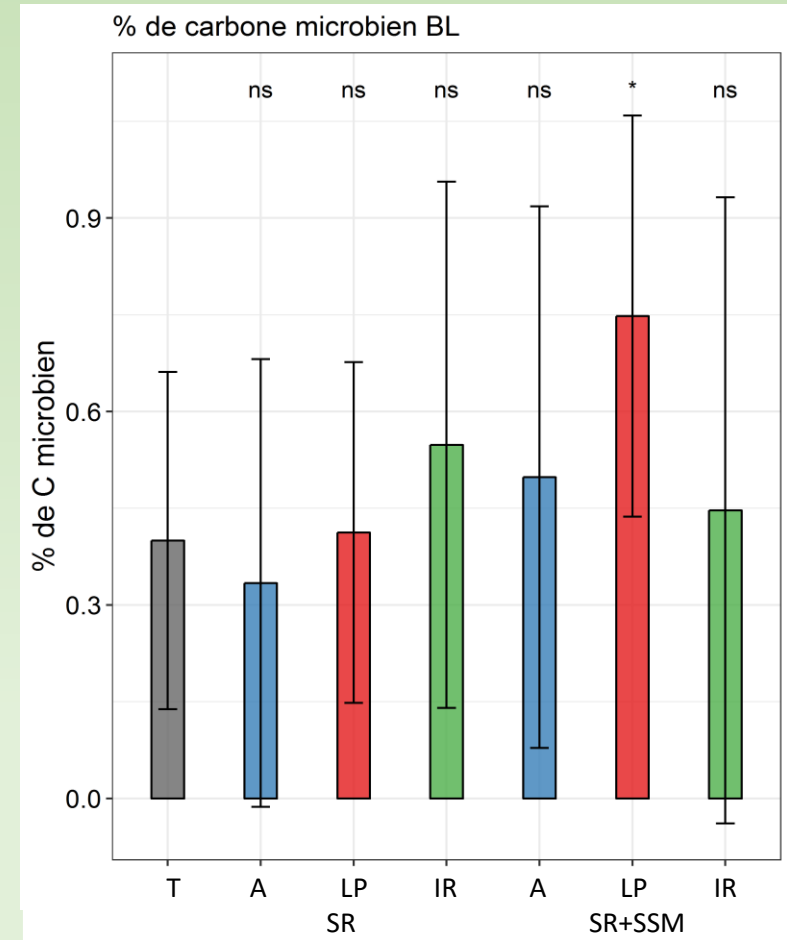
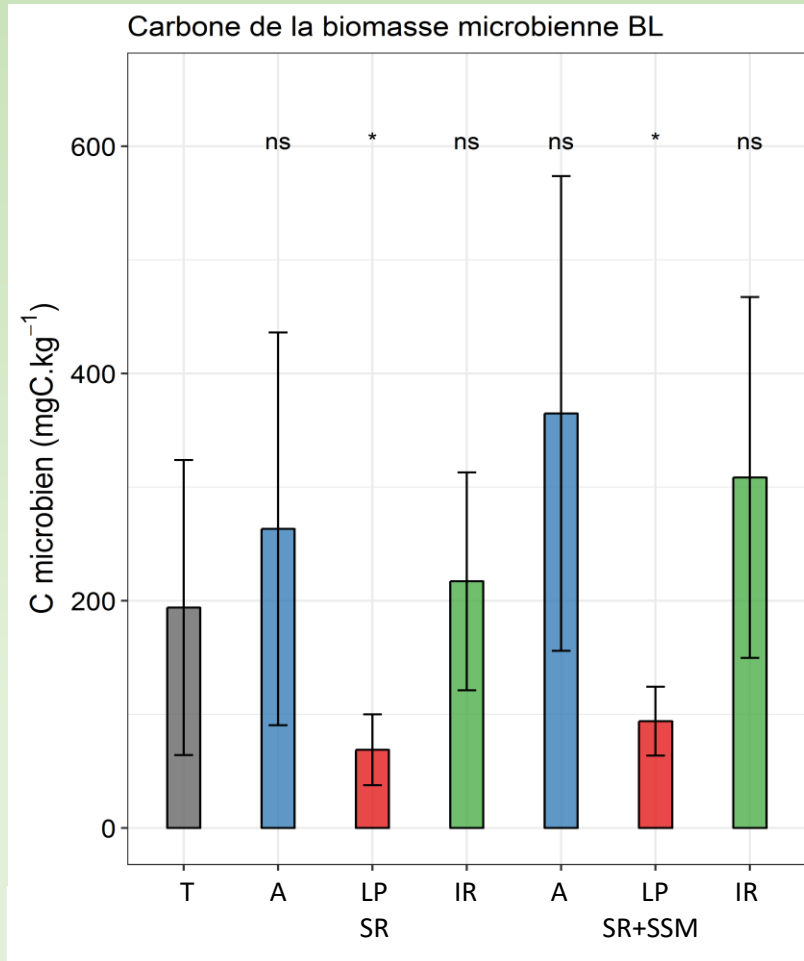
Bord Louviers : Minéralisation



5 ans après la mise en place du site :

- Dégagement de CO₂ même évolution que le stock de C
- Taux de minéralisation : tendance a un taux plus élevé sur LP
- Travail du sol susceptible d'activer la minéralisation

Bord Louviers : C microbien



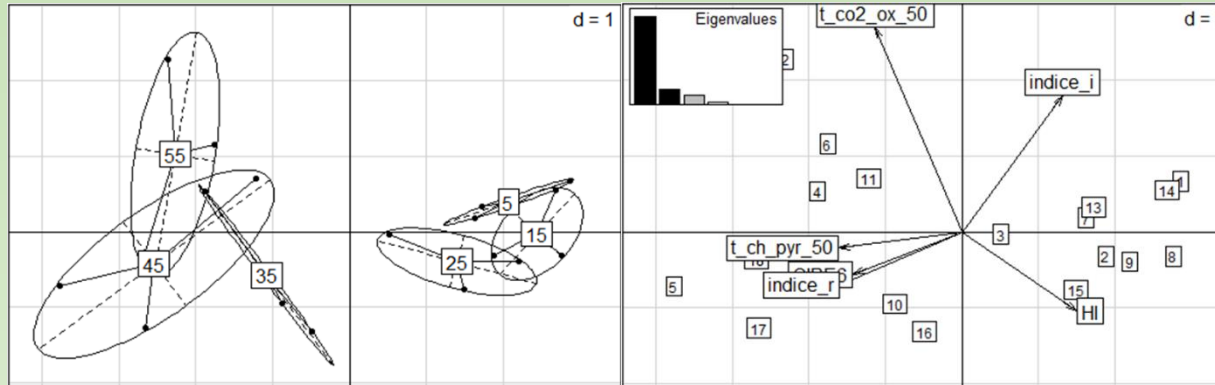
5 ans après la mise en place du site :

- Le C microbien suit lui aussi les mêmes évolutions que le stock de C
- Le % que représente le C_{mic} dans le C_{tot} est faible
- Proportion de C_{mic} plus importante sur la LP de SSM

Bord Louviers : Pyrolyse Rock Eval

Témoin

Axe 1 : 76,27%
Axe 2 : 12,96%



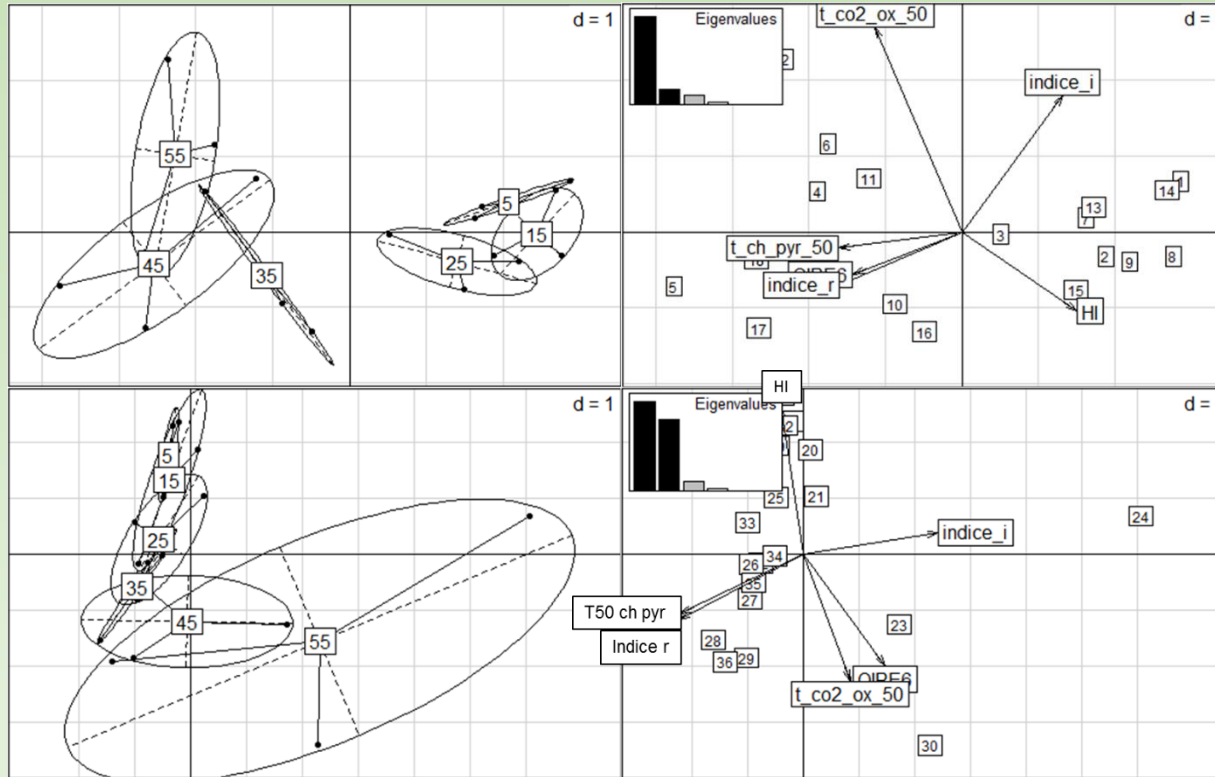
Répartition selon la distinction
topsoil/subsoil sur un axe stable/labile

Bord Louviers : Pyrolyse Rock Eval



Témoin

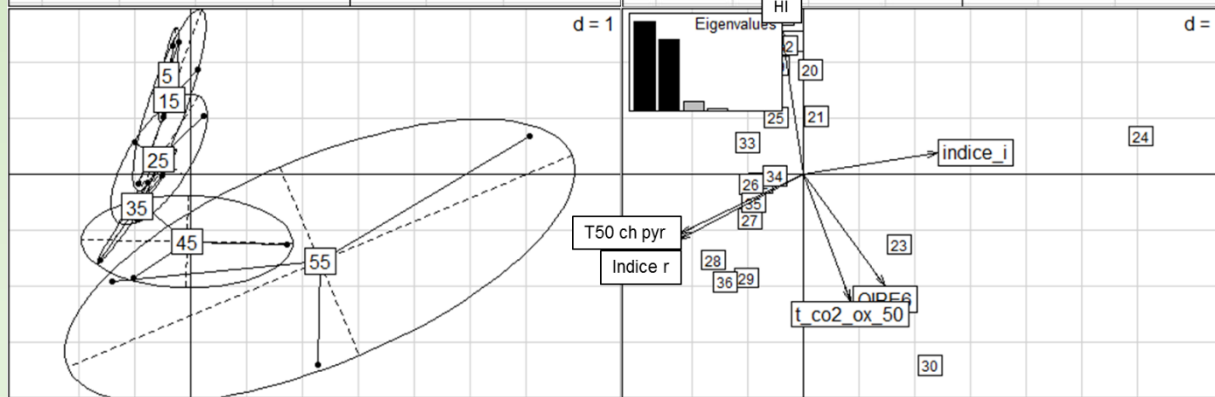
Axe 1 : 76,27%
Axe 2 : 12,96%



Répartition selon la distinction topsoil/subsoil sur un axe stable/labile

SR

Axe 1 : 51,31%
Axe 2 : 41,31%



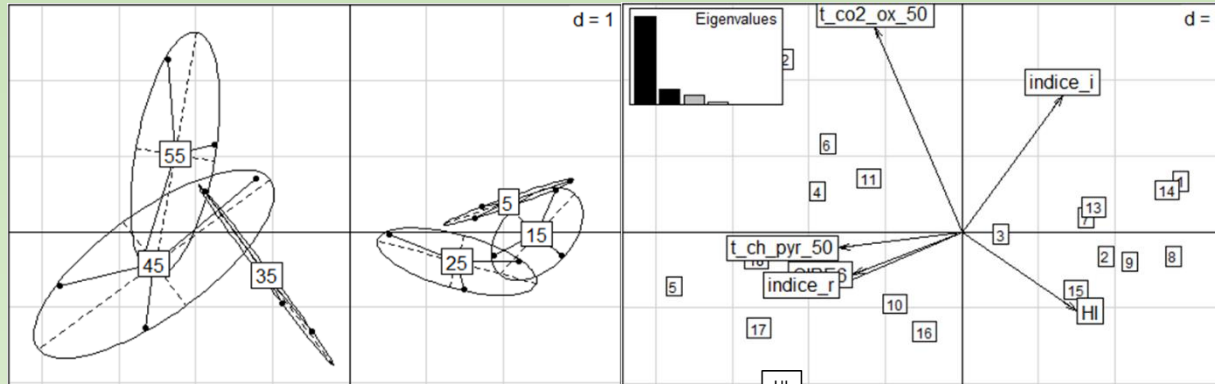
Répartition progressive sur un axe stable/labile

Bord Louviers : Pyrolyse Rock Eval



Témoin

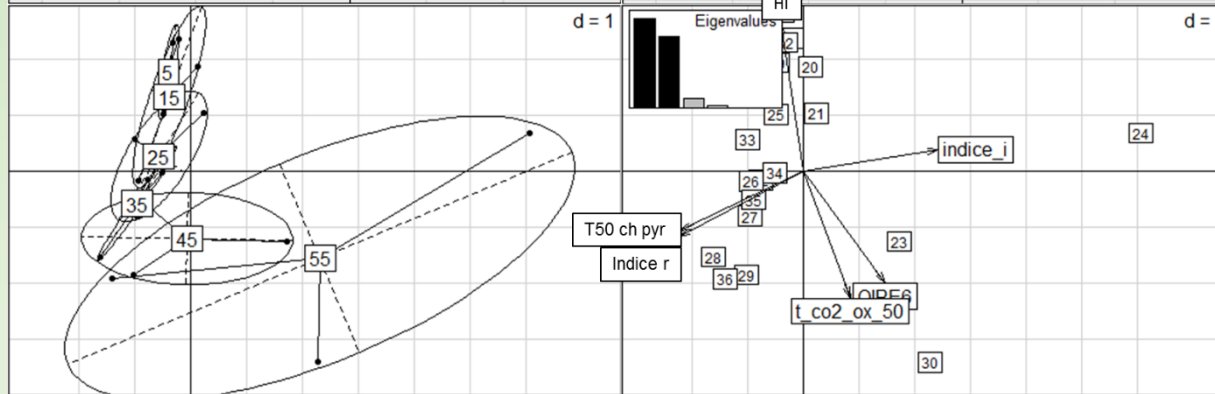
Axe 1 : 76,27%
Axe 2 : 12,96%



Répartition selon la distinction topsoil/subsoil sur un axe stable/labile

SR

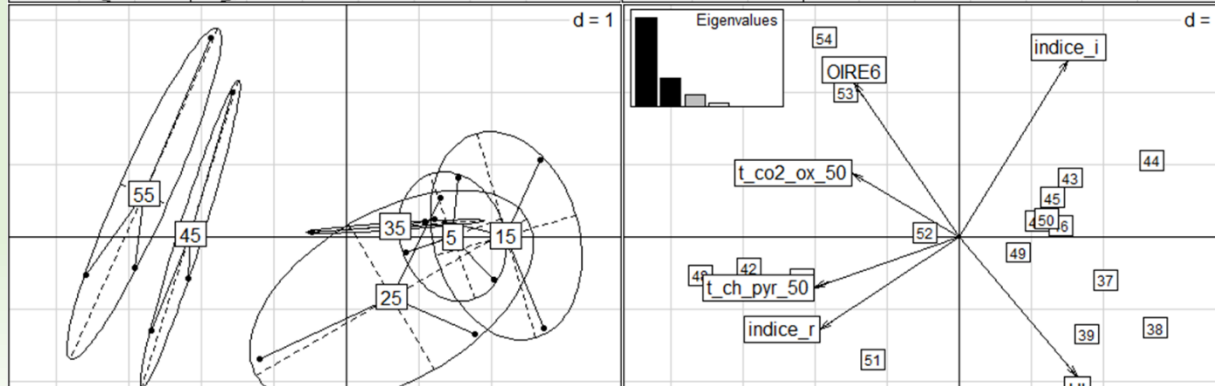
Axe 1 : 51,31%
Axe 2 : 41,31%



Répartition progressive sur un axe stable/labile

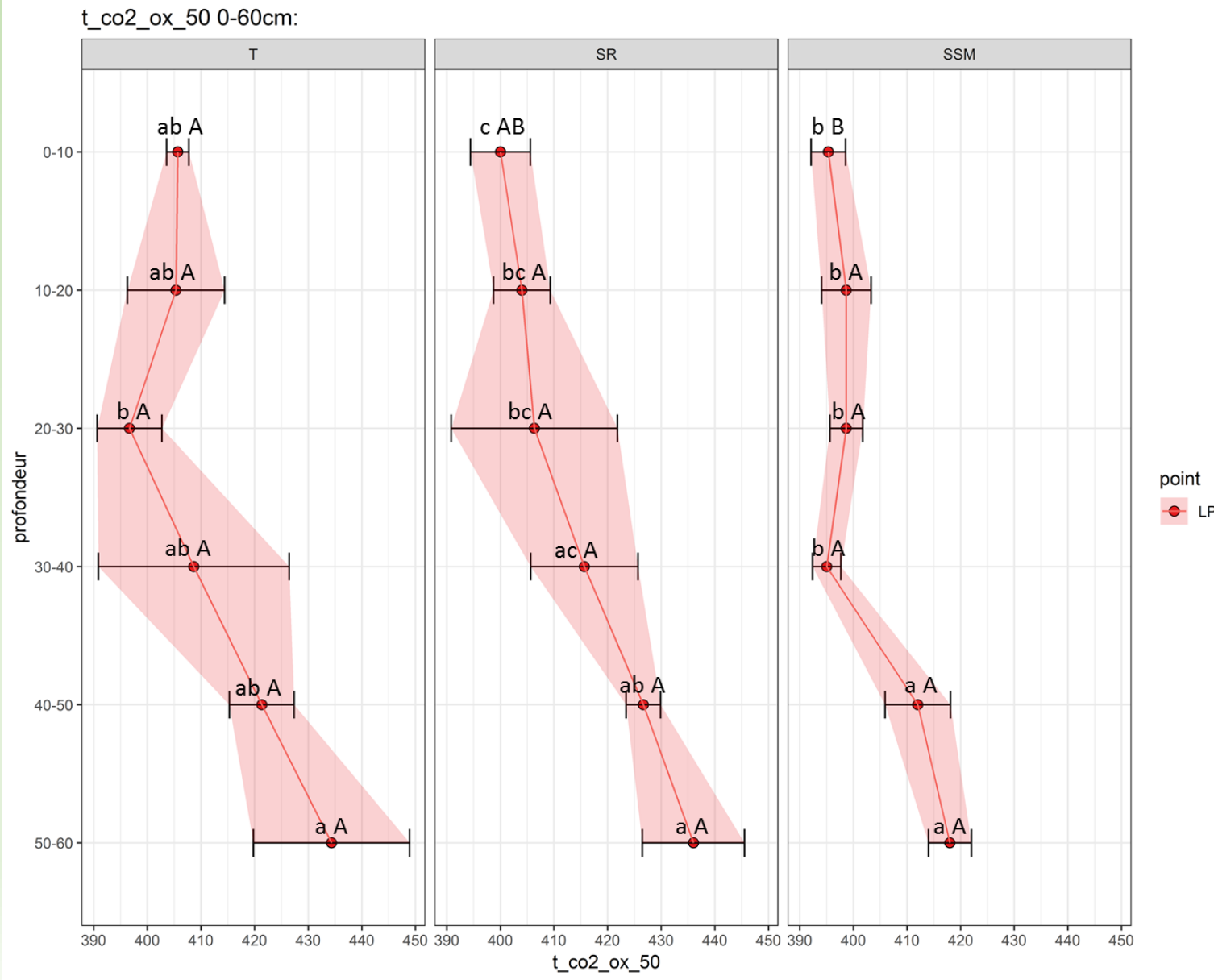
SR+SSM

Axe 1 : 66,58%
Axe 2 : 21,25%



Répartition différenciée selon la profondeur sur un axe stable/labile

Bord Louviers : Pyrolyse Rock Eval



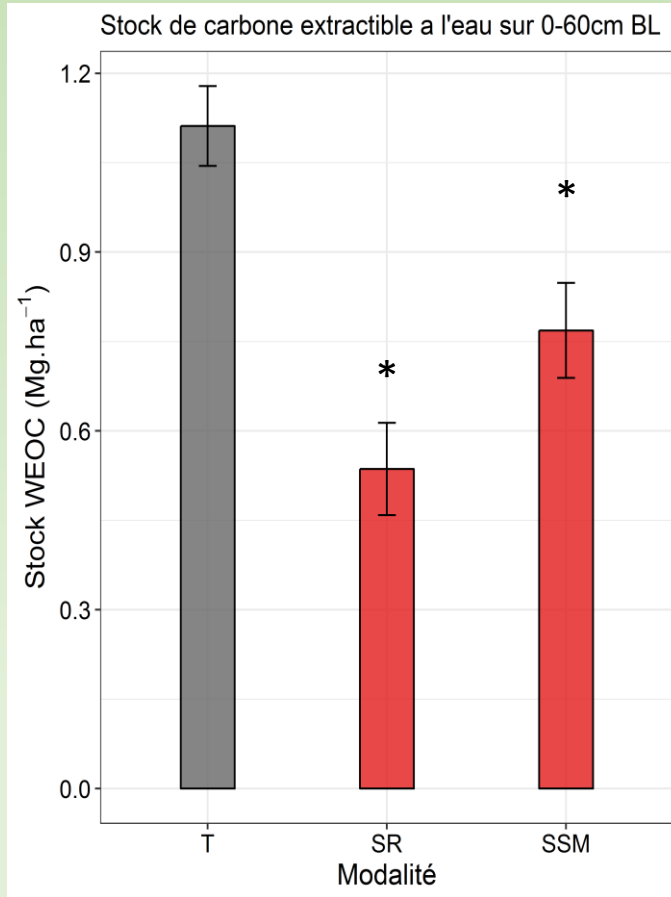
T₅₀_CO₂_ox : indice de stabilité thermique du C

T : plus stable en profondeur qu'en superficie avec une baisse de l'indice au niveau de l'horizon Bp

SR : homogénéisation sur 40 cm et tendance à l'augmentation en profondeur (40-60 cm)

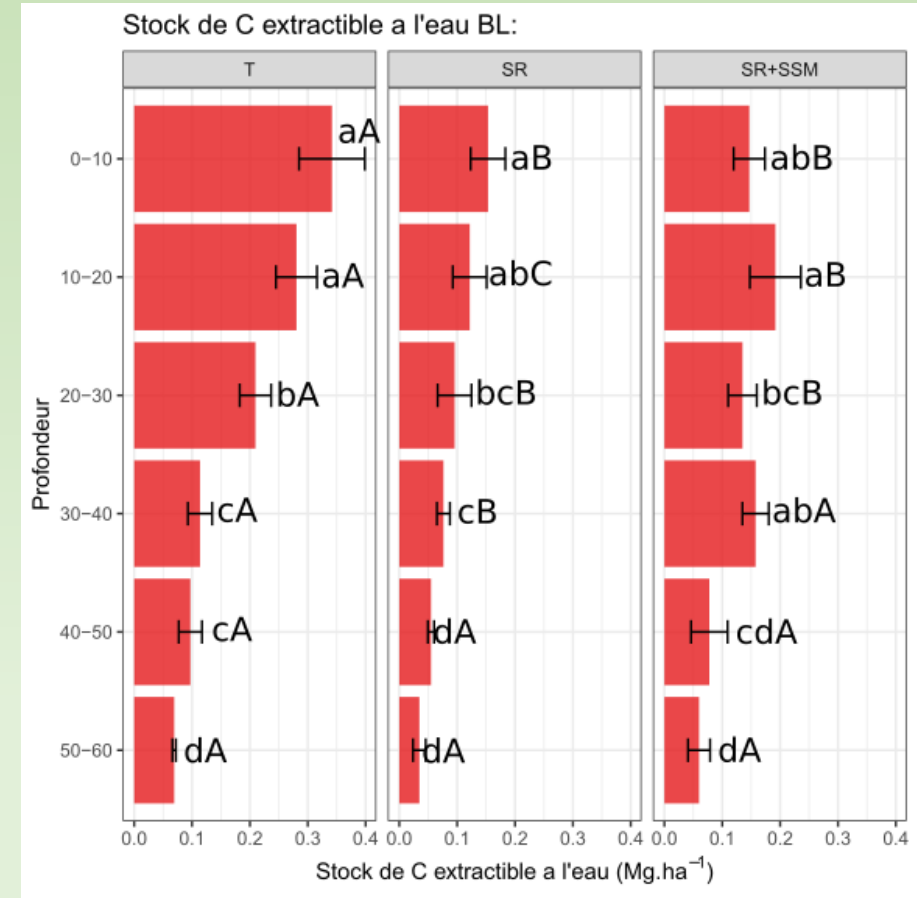
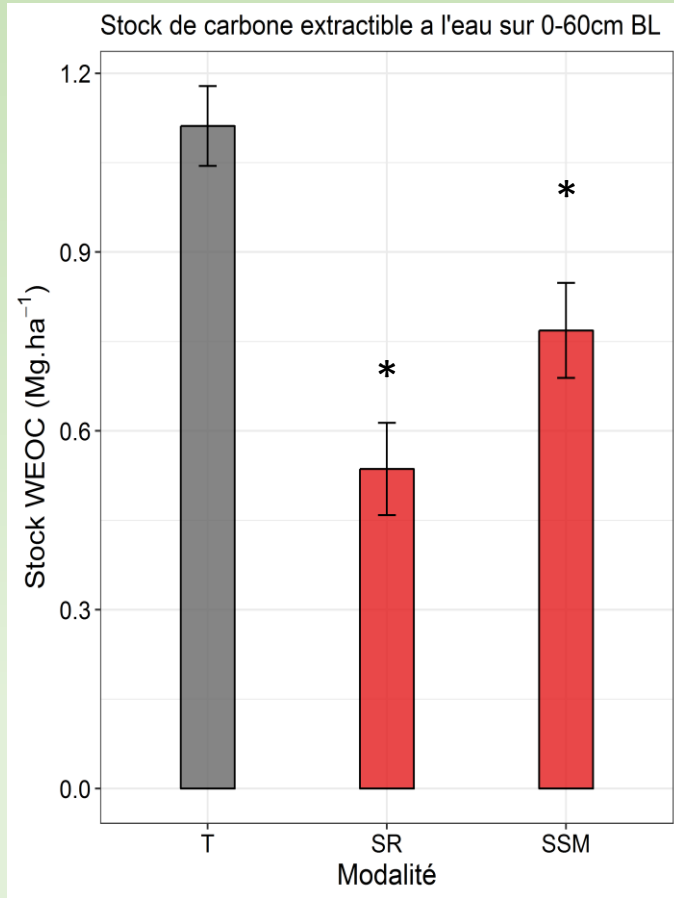
SSM : C moins stable sur le 0-10 comparé au T
homogénéisation nette sur les 40 premiers cm
C plus stable en profondeur

Bord Louviers : C extractible à l'eau



- Carbone dissout donc mobile dans le sol
- Reflète le fonctionnement actuel du sol
- ↘ du stock de C extractible à l'eau (WEOC)

Bord Louviers : C extractible à l'eau



- Carbone dissout donc mobile dans le sol
- Reflète le fonctionnement actuel du sol
- ↘ du stock de C extractible à l'eau (WEOC)
- ↘ du stock par couche sur SR
- Homogénéisation le long du profil sur SSM

Bord Louviers : Bilan

- Importance de la litière (jusqu'à 40 % du stock litière-60 cm)
- Diminution locale du stock de C sur la ligne de plant
- Cette diminution du stock due à un déplacement de MO et un déstockage
- Déstockage à l'échelle de ma parcelle
- L'impact de la minéralisation pourrait être bénéfique pour la croissance du plant par la libération d'éléments minéraux (à court terme) : perspective à suivre

5 autres sites Alter

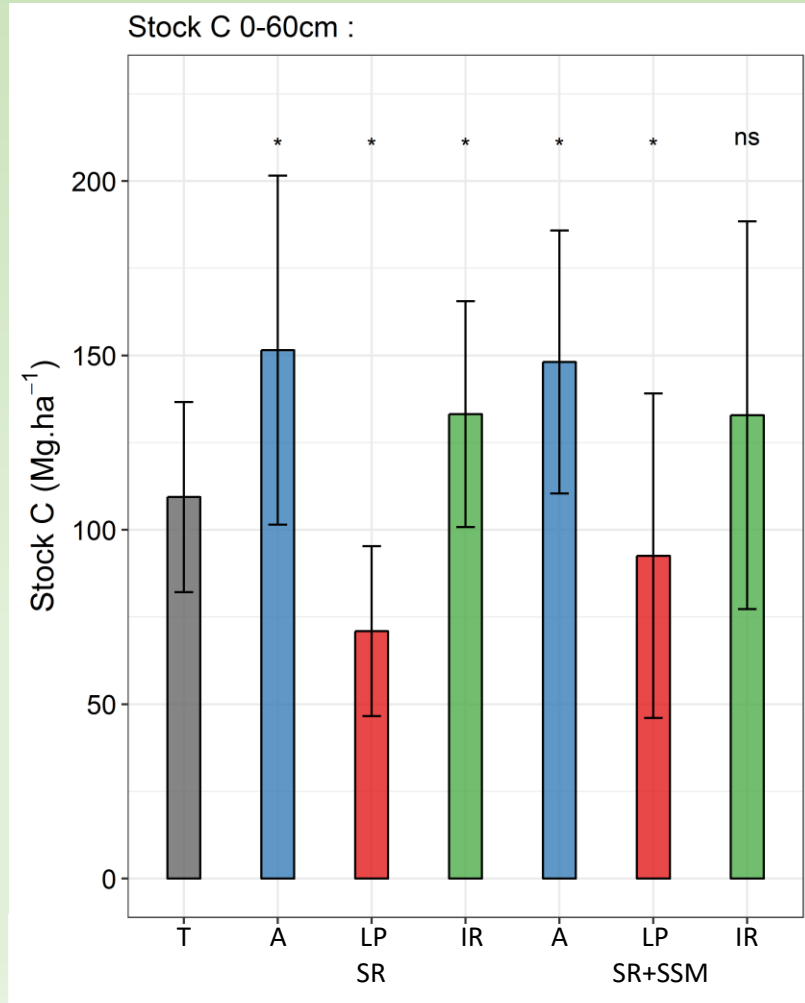
Données présentées :

- Stock de C sur par zone de prélèvement
- Stock de C à l'échelle du peuplement
- Minéralisation
- Minéralisation à l'échelle du peuplement
- Carbone microbien
- C extractible à l'eau

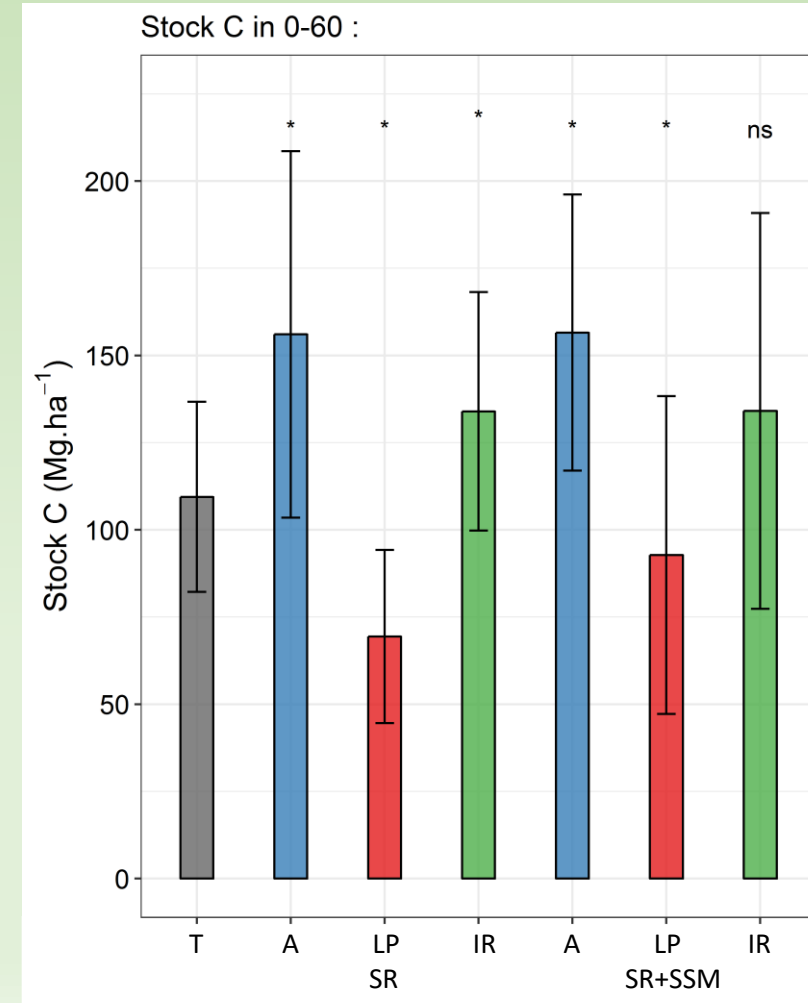
Stock de C : comparaison de méthodes



Profondeur constante



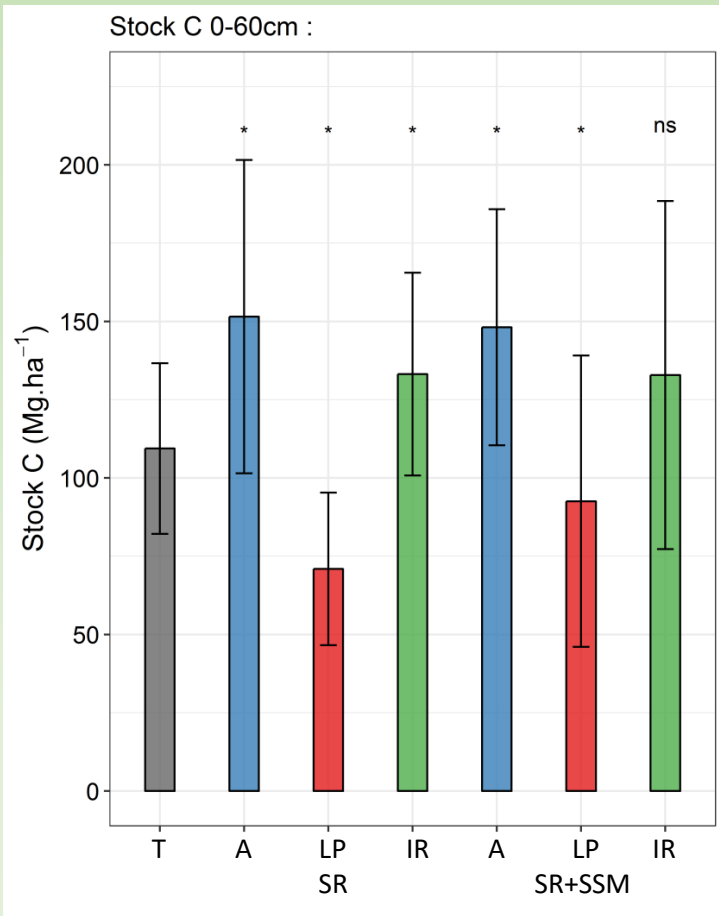
masse constante



- Témoin
- Andain
- Ligne de plant
- Inter-rang

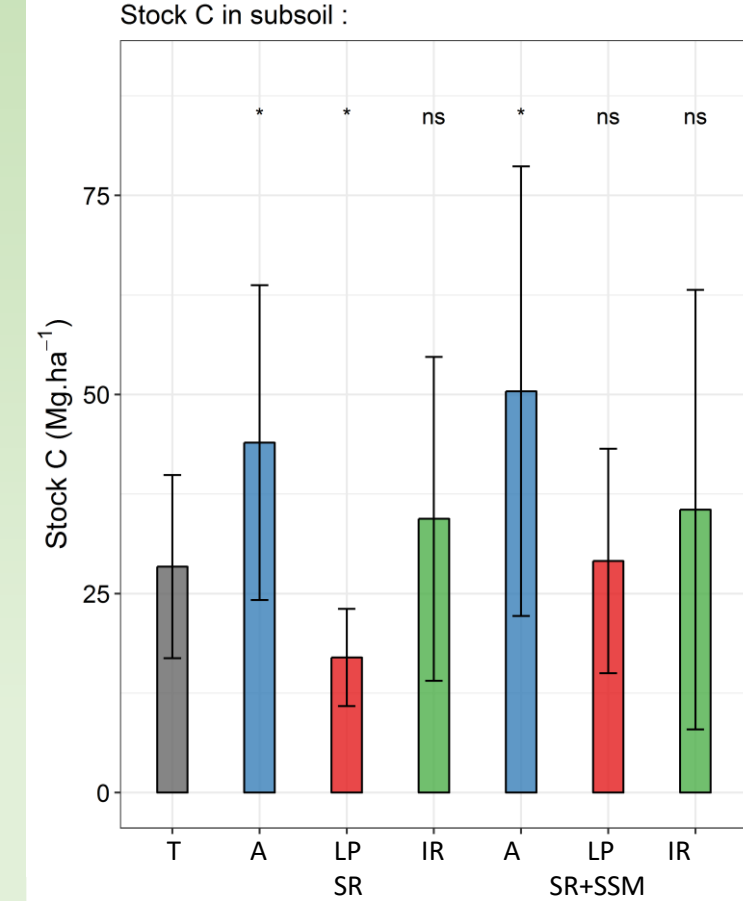
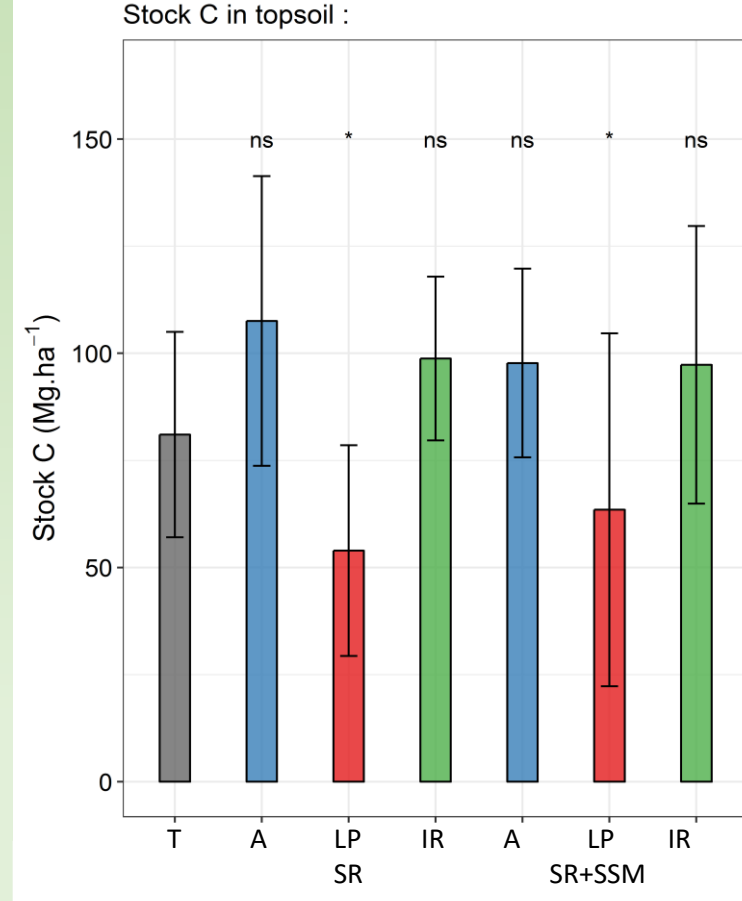
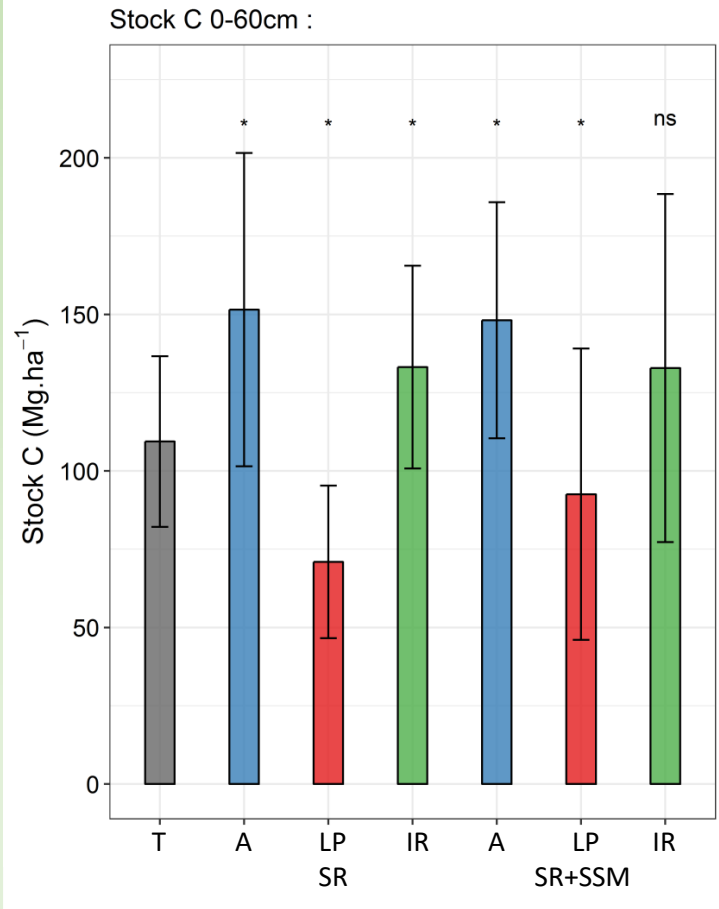
Les résultats de calcul de stock de C à profondeur constante ou à masse constante donnent des résultats très proches (pas de différence significative)

Alter : stock de C par zone de prélèvement



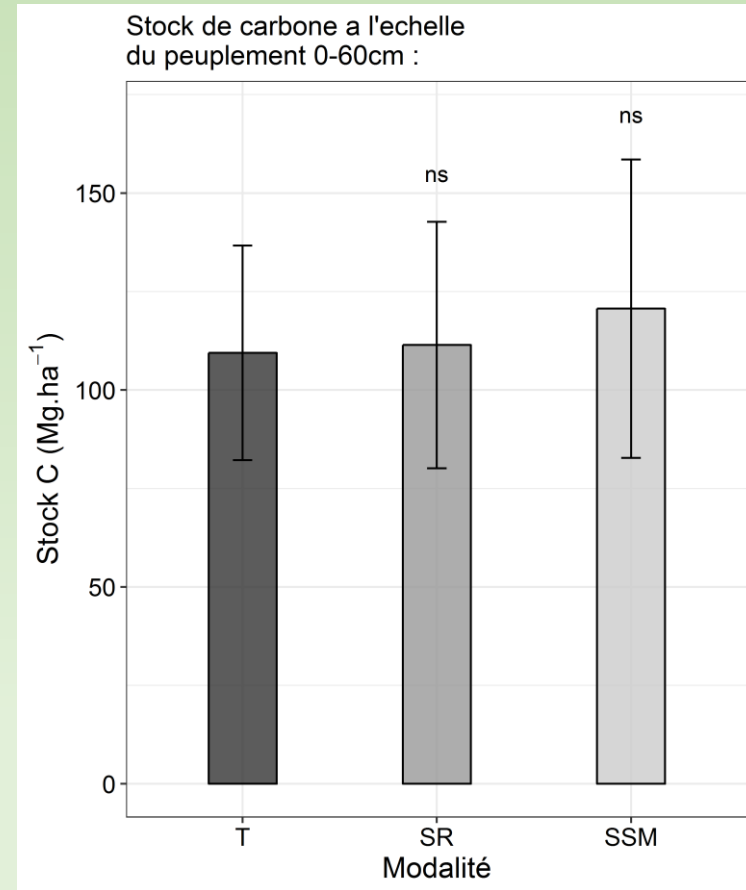
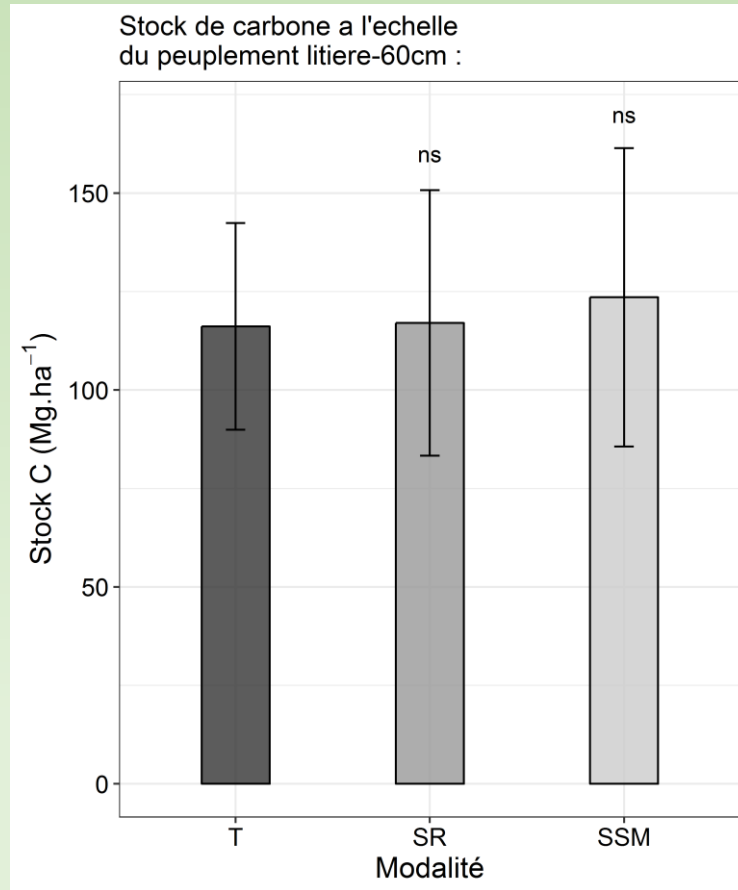
- Sur les 5 sites Alter : même effet que sur Bord-louvières sur le profil complet
- Confirmation de l'estimation des stocks sur 60 cm à BL

Alter : stock de C par zone de prélèvement



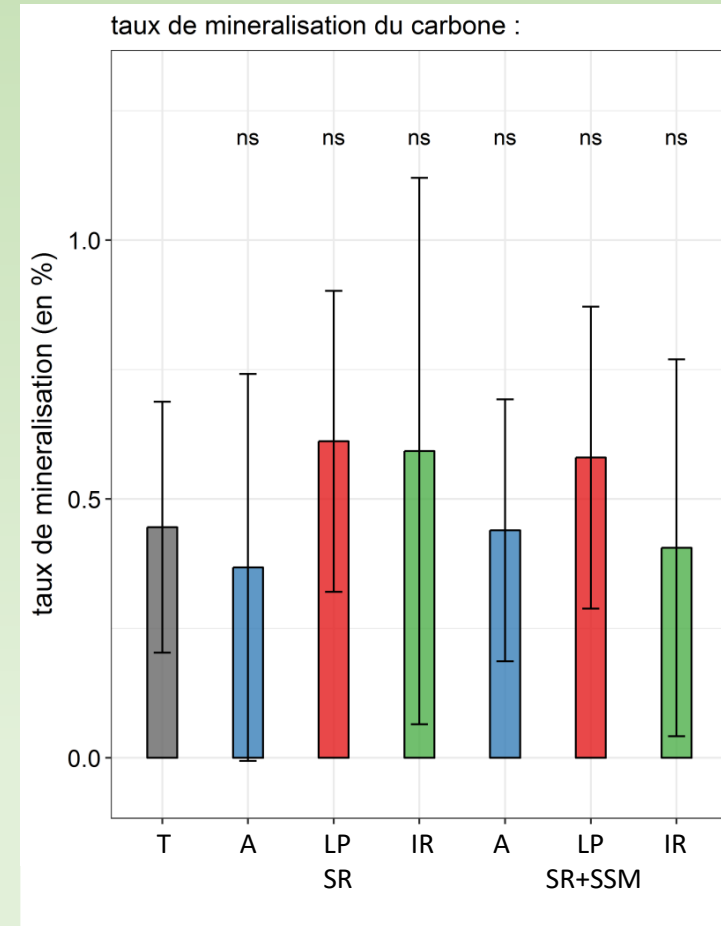
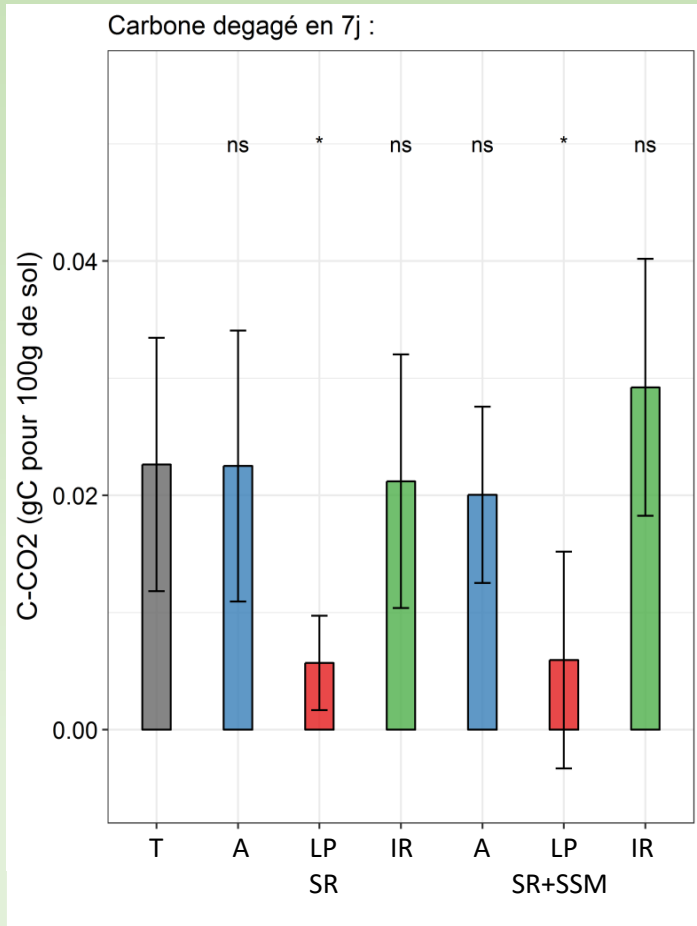
- Sur les 5 sites Alter : même effet que sur Bord-louviers sur le profil complet
- Confirmation de l'estimation des stocks sur 60 cm à BL
- Mais effet différent sur topsoil et subsoil : nouvelle répartition du stock de C au sein du profil

Alter : stock de C à l'échelle du peuplement



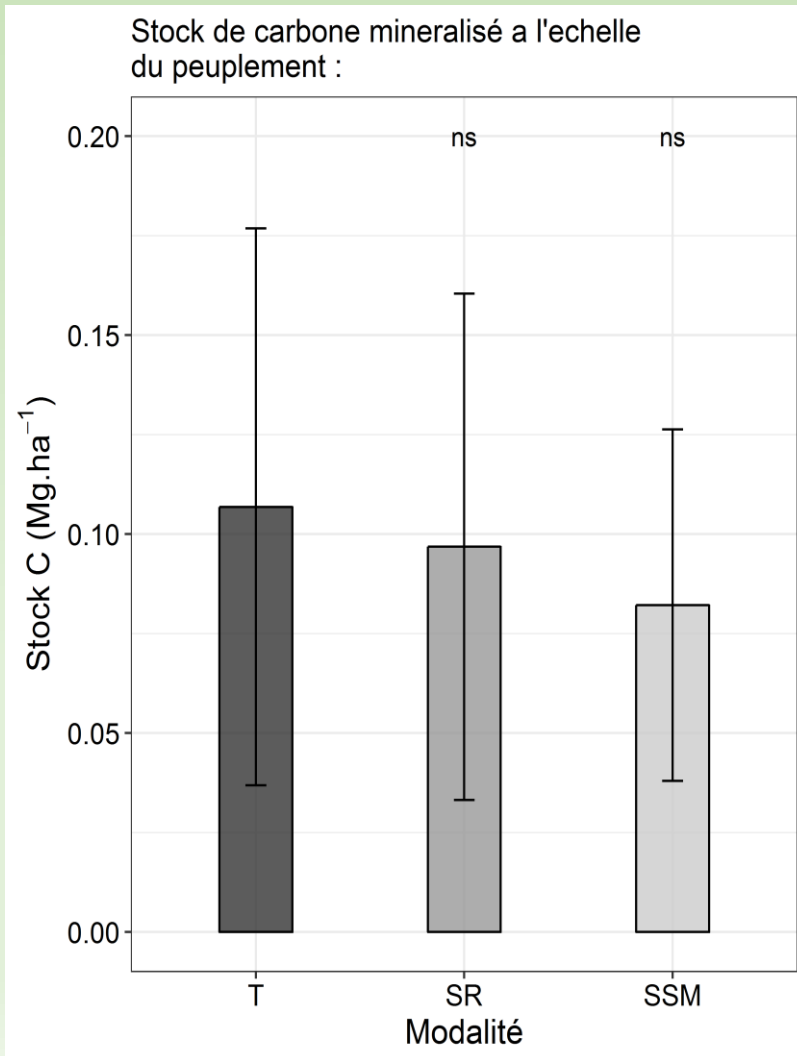
- Pas de différence de stock à l'échelle du peuplement
- Quels effets sur la qualité de la MO et le fonctionnement du sol ?

Alter : Minéralisation



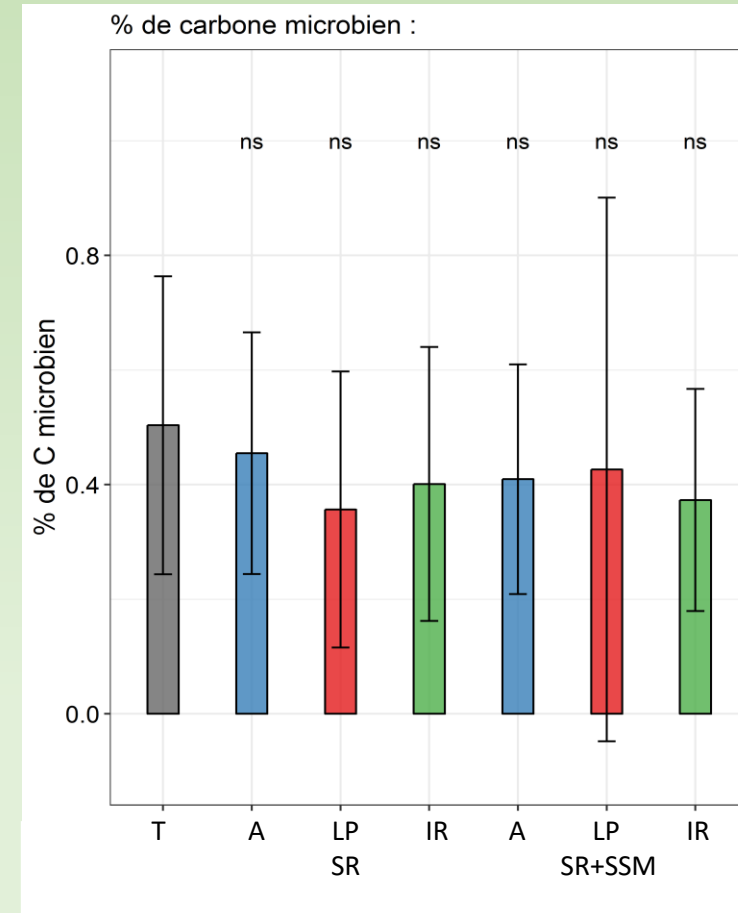
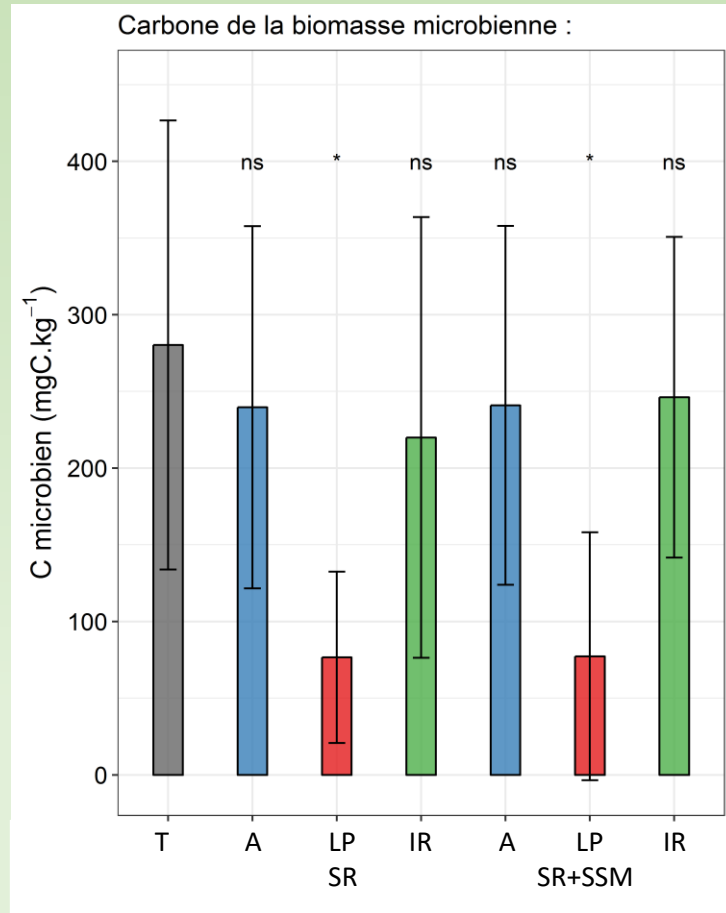
- Le dégagement de CO_2 suit l'évolution du stock de C : moins de C dégagé quand le stock est plus faible
- Le taux de minéralisation tend à être plus élevé sur la ligne de plant (activation potentielle de la minéralisation) 3-4 ans après la mise en place des sites
- La tendance observée est peut être un reliquat de la minéralisation activée après la mise en place

Alter : Minéralisation



- Minéralisation du COS sous forme de CO₂ a l'échelle du peuplement : pas de différence selon la modalité
- Les perturbations provoquées par les outils n'impliquent donc pas de « sur-minéralisation »

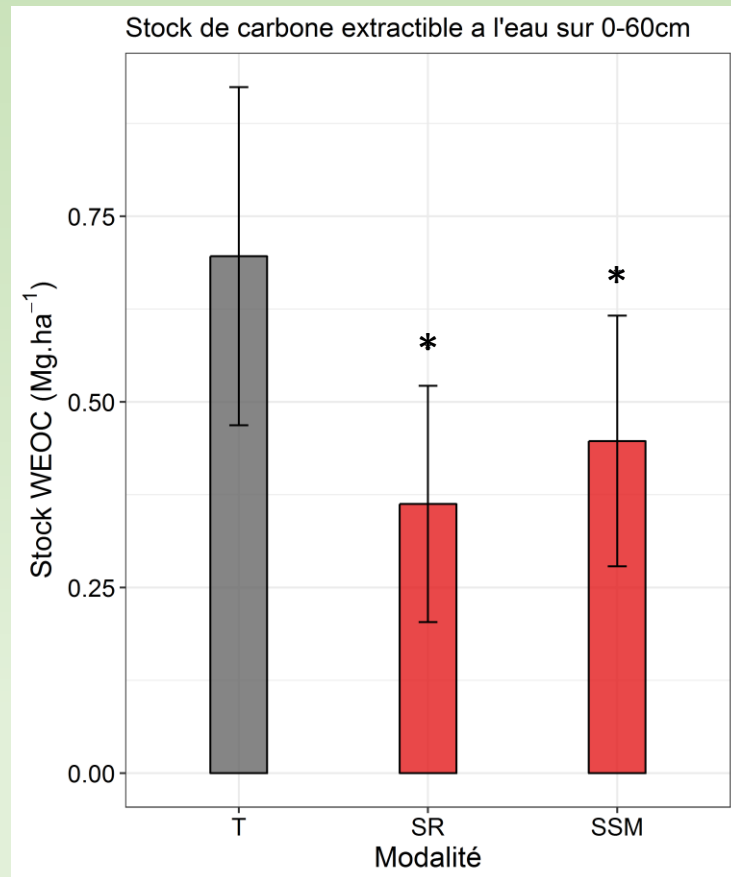
Alter : C microbien



3-4 ans après la mise en place du site :

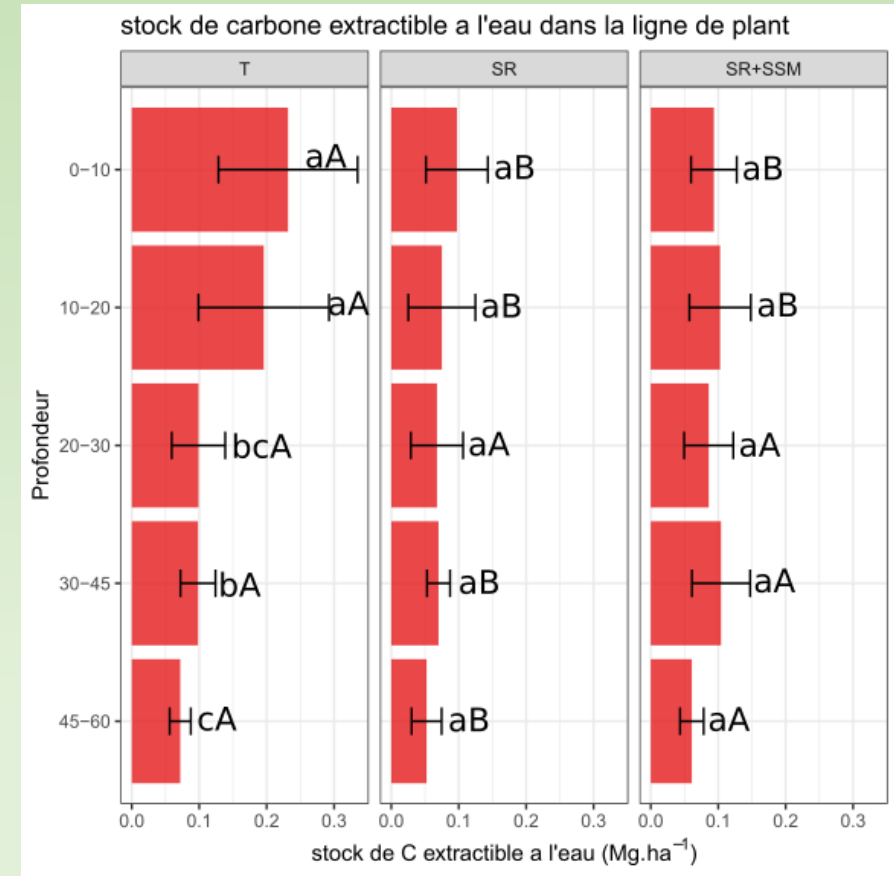
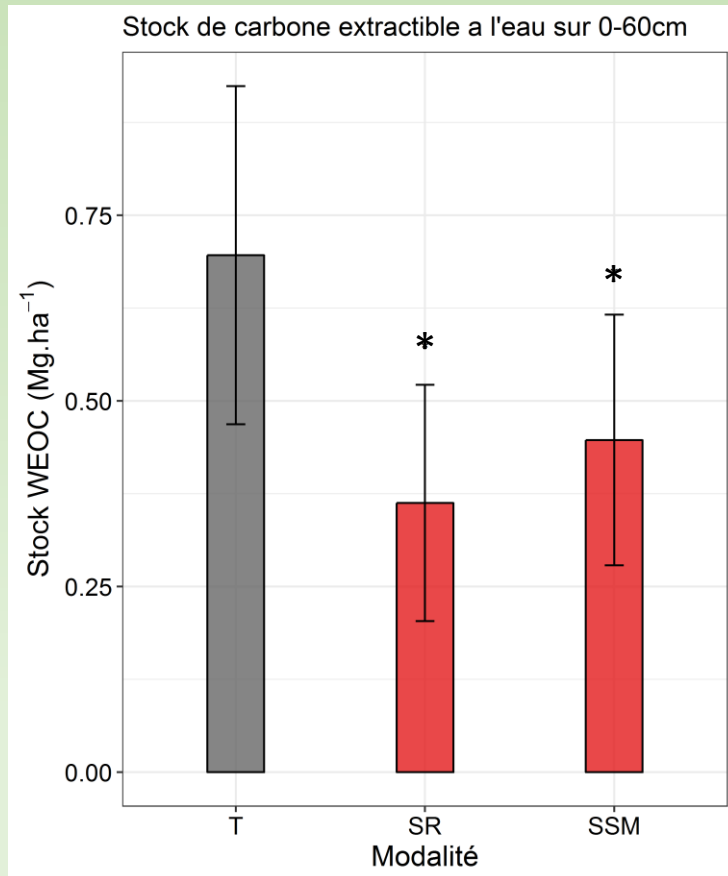
- Le C microbien suit lui aussi les mêmes évolutions que le stock de C
- Le % que représente le C_{mic} dans le C_{tot} est faible

Alter : C extractible à l'eau



- Le stock de C extractible à l'eau (WEOC) est plus faible sur les modalités travaillées

Alter : C extractible à l'eau



- Le stock de C extractible à l'eau (WEOC) est plus faible sur les modalités travaillées
- Diminution du stock surtout dans les horizons superficiels
- Homogénéisation du WEOC dans les profils travaillés

Alter : Discussion-Conclusion

- Diminution locale du stock de C sur la ligne de plant
- Cette diminution n'est pas systématiquement due à un déstockage : déplacement de MO
- L'impact de la minéralisation pourrait être bénéfique pour la croissance du plant par la libération d'éléments minéraux (à court terme) : perspectives
- Impact à long terme difficile à prédire : temps de reformation du stock , bilan C (sol vs biomasse)
- L'analyse RE6 sur Alter permettra de répondre à l'hypothèse 3
- Recommandations:
 - Utilisation du SR à privilégier par rapport à SR+SSM car impacte moins la redistribution
 - Utilisation de SR + SSM avec précaution vis-à-vis de la surface travaillée et la quantité de litière

Sites Pilote et Chrono

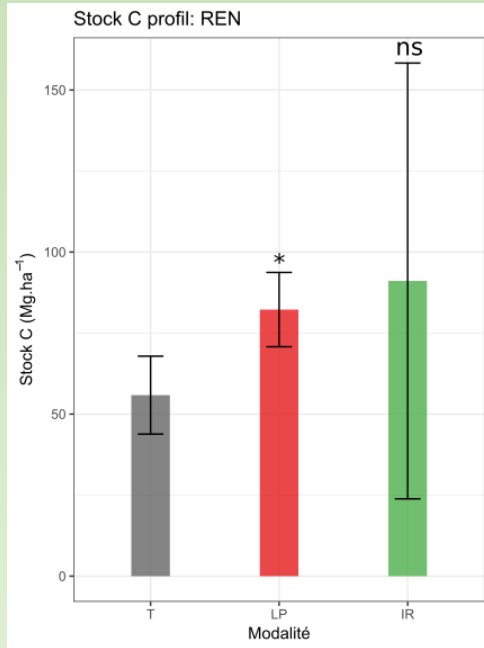
Données présentées :

- Stock de C sur par zone de prélèvement

Pilote et Chrono

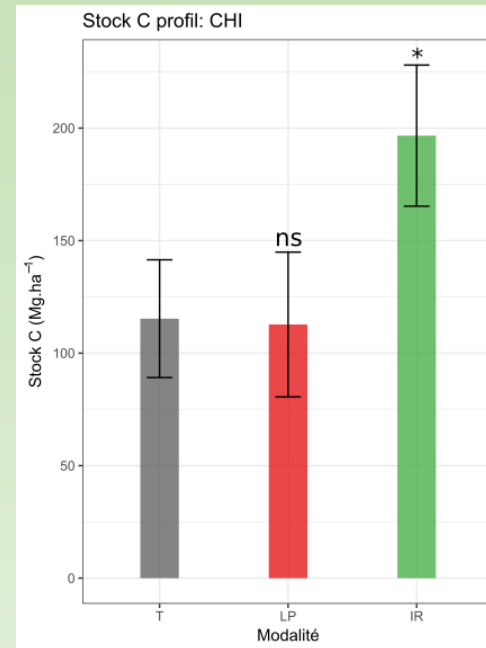
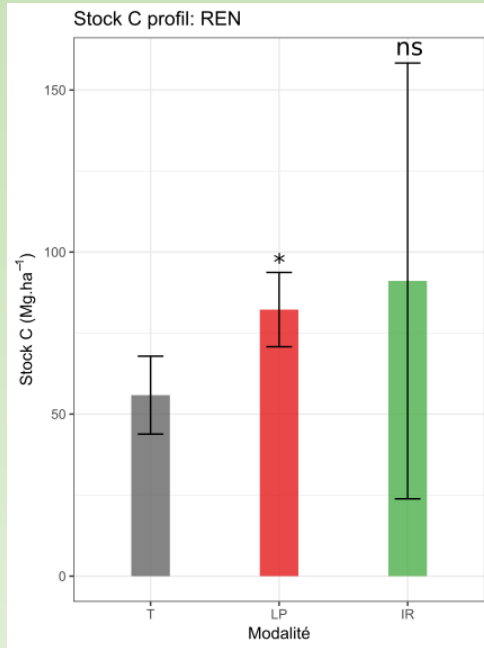
- 3 sites Pilote prospectés et analysés séparément + 1 site Chrono
- Chaux et Chinon prélevés à 60 cm + Rennes prélevé à 30 cm
- Des sites à caractère hydromorphe

Pilote : stock de C par zone de prélèvement



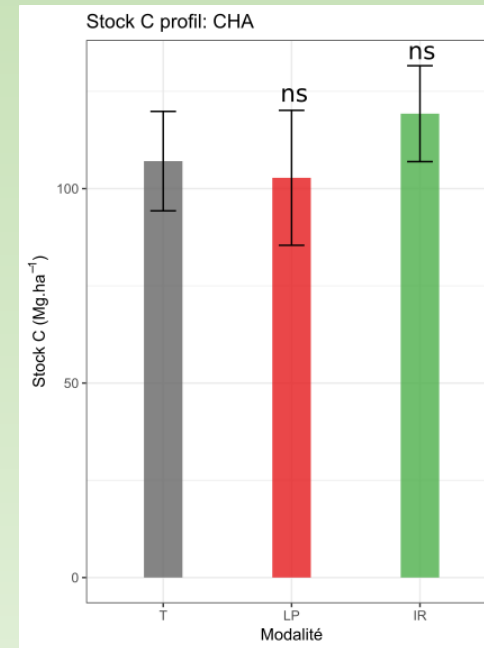
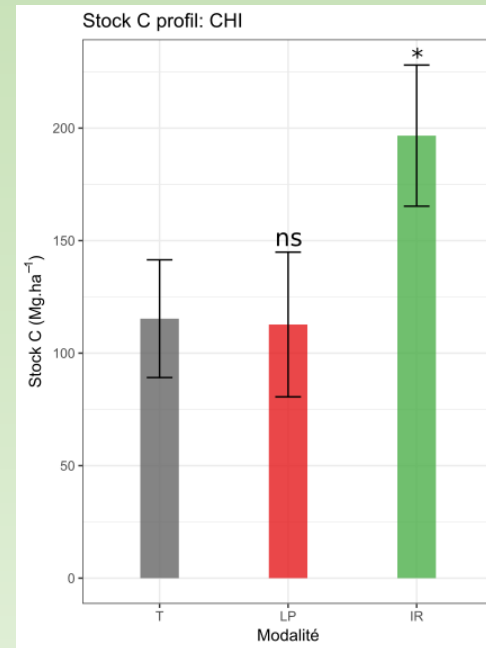
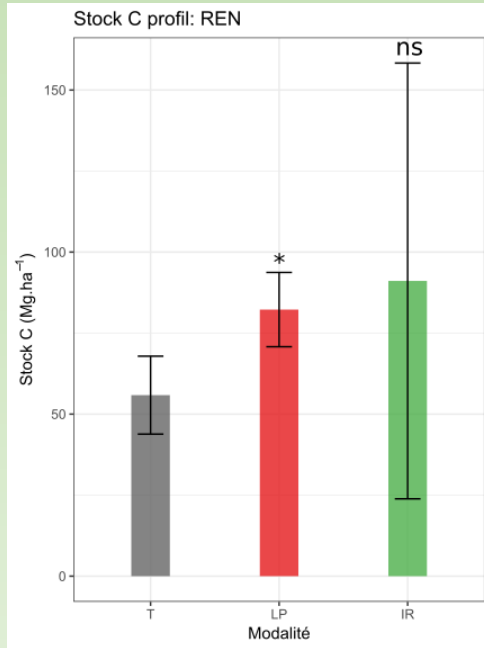
- Stock de C à masse constante pour permettre les comparaisons
- Effets variables de la combinaison d'outils RAZ + C3B en fonction des sites :
 - Rennes : stock sur 30 cm car impossibilité de prélever plus profond, ↗ sur LP

Pilote : stock de C par zone de prélèvement



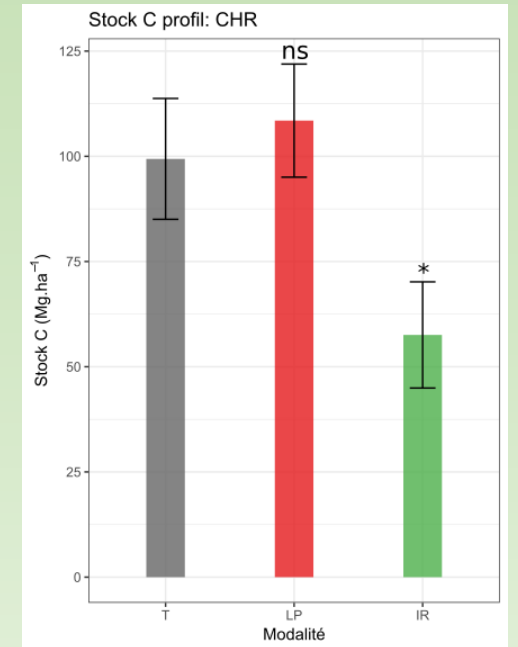
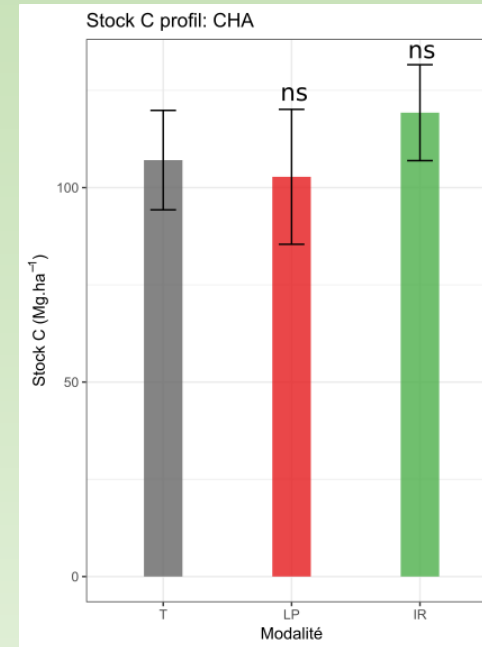
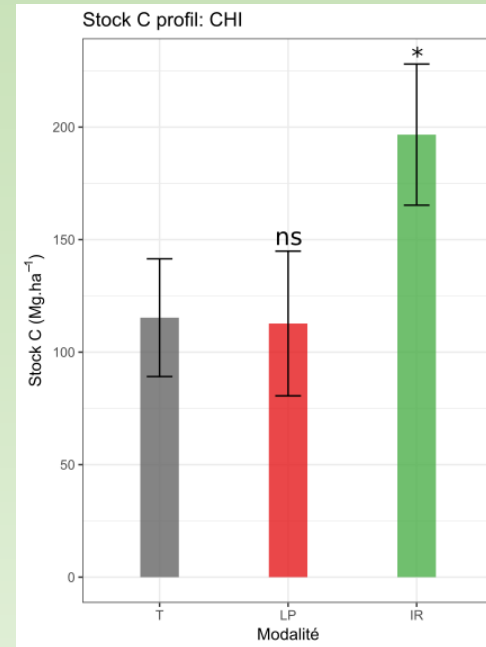
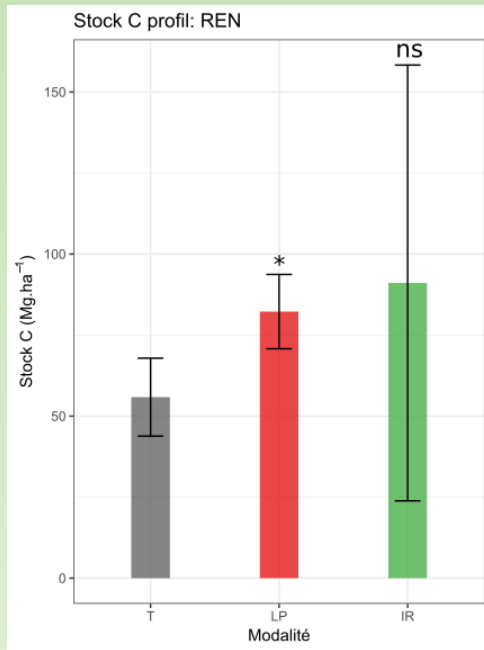
- Stock de C à masse constante pour permettre les comparaisons
- Effets variables de la combinaison d'outils RAZ + C3B en fonction des sites :
 - Rennes : stock sur 30 cm car impossibilité de prélever plus profond, ↗ sur LP
 - Chinon : stock plus élevé sur IR, touradons plus développés et « andainage » ponctuel du RAZ ?

Pilote : stock de C par zone de prélèvement



- Stock de C à masse constante pour permettre les comparaisons
- Effets variables de la combinaison d'outils RAZ + C3B en fonction des sites :
 - Rennes : stock sur 30 cm car impossibilité de prélever plus profond, ↗ sur LP
 - Chinon : stock plus élevé sur IR, touradons plus développés et « andainage » ponctuel du RAZ ?
 - Chaux : pas de différence de stock

Chrono : stock de C par zone de prélèvement



- Stock de C à masse constante pour permettre les comparaisons
- Effets variables de la combinaison d'outils RAZ + C3B en fonction des sites
- Chrono-Chaux :
 - 25 ans après la mise en place
 - Travail plus **intensif** que sur Pilote (labour en plein + billonnage)
 - Méthodes de calculs : profondeur constante ≠ masse constante
 - Compensation par l'apport sur LP de matériel depuis IR

Pilote et Chrono : Conclusion

- Pilote :
 - LP : Impacts qui varient selon les sites
 - IR : Augmentation du stock en tendance ou significative, andainage plus important que supposé
- Chrono :
 - Impact fort d'un travail intensif
 - Permet de mettre en avant l'impact limité des outils d'Alter et Pilote
- Recommandations
 - l'utilisation de la combinaison RAZ+C3B doit être précédée d'une réflexion sur la proportion de surface travaillée

Conclusion générale


- **Hypothèse 1** : Les travaux de PMS lors de la plantation, provoquent une modification du stock de COS
 - **Hypothèse 1a** : La PMS entraîne un déstockage de C à l'échelle du profil de sol travaillé
 - **Hypothèse 1b** : La PMS induit une hétérogénéité spatiale du stock de C
- **Hypothèse 2** : la modification locale du stock de C se retrouve à l'échelle du peuplement forestier
- **Hypothèse 3** : Le déstockage du C du sol à l'échelle du profil de sol touche majoritairement le pool labile (à temps de renouvellement rapide) de la matière organique du sol

	Bord Louviers	ALTER	PILOTE	CHRONO
Hypothèse 1a	✓	✓	X	X
Hypothèse 1b	✓	✓	✓ pour 2 sites sur 3	✓
Hypothèse 2	✓	X	Non testée	Non testée
Hypothèse 3	✓	Partiellement ✓ (weoc)	Non testée	Non testée

Conclusion générale

- L'utilisation des outils est envisageable aux vues des résultats à l'échelle du peuplement
- Il faut cependant être vigilant sur certains points:
 - Les surfaces de travail ne doivent pas être importantes
 - Attention sur les sites avec beaucoup d'accumulation de litière (type Bord-Louviers)
 - Le nombre de passages (1 fois par parcelle tous les x ans)

Perspectives

- 
- Suivi d'un ou plusieurs sites depuis la mise en place : T0
 - Dosage des éléments minéraux du profil
 - Mise en place d'expérimentation « priming effect »
 - Envisager un suivi à long terme
 - Suivi de reformation de la litière
 - Evolution du C du sol
 - Confirmation des modélisations

La tache 1 en quelques chiffres

- 6 stagiaires
- 6100 km parcourus
- 13 semaines de terrain
- 3000 échantillons prélevés
- 1,5 t de sol transporté et tamisé
- 54 personnes sur le terrain ou en labo (d'une ½ journée à plusieurs semaines)



Maria-Chiara

Lucas

Estelle

Marta

Lindsay

Sabrina

Hélène

Tom

Thomas

Marceau

Fabrice

François

Corentin

Thibault

Lucille

Phil

Philippe

Michaël

Romain

Arthur

Emila

Maud

Killian

Stéphane

Marthe

Matthieu

Apolline

Aurélie

Pierre

Marthe

Tania

Mickaël

Raphaël

MERCI

Héloïse

Flore

Lisa

Roxane

Sylvaine

Lorelei

Artichette

Lucie

Charlotte

Sonia

Sékou

Evelyne

Justine

Joseph

Benoit

Emilie

Laurent

Charly

Johannes

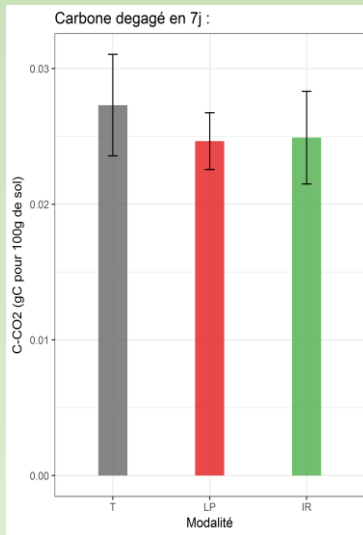
Agathe

Blandine

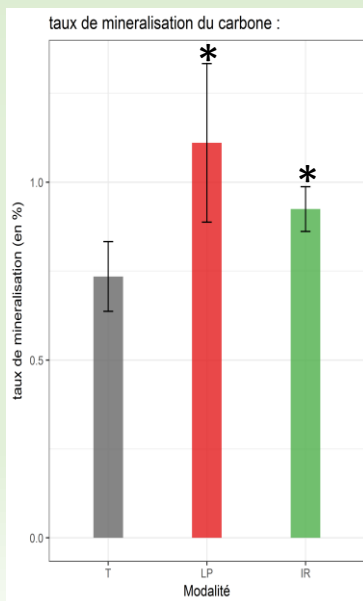
Charlène

Pilote : Minéralisation

Pilote : Chaux



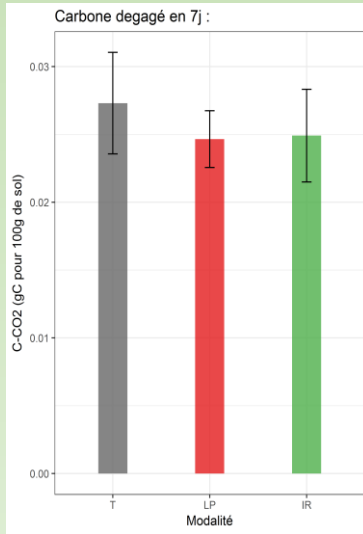
Pas de différence du dégagement de CO₂ par rapport au témoin



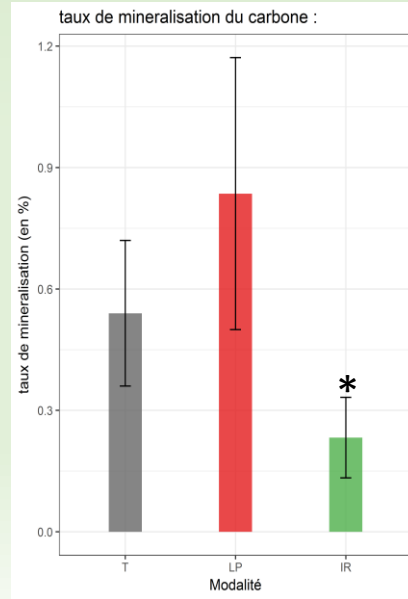
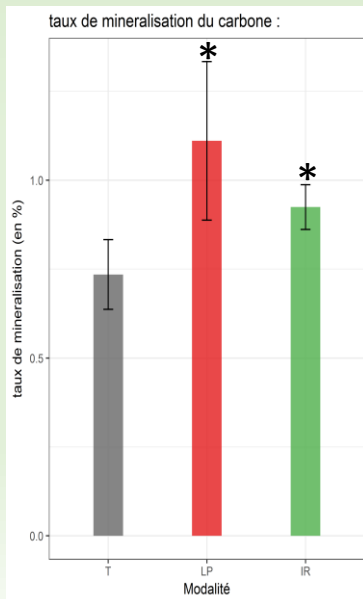
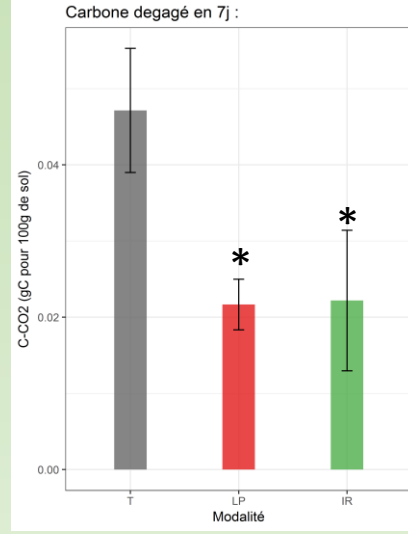
Taux de minéralisation plus élevé sur les 2 zones de la modalité travaillée que sur le témoin

Pilote : Minéralisation

Pilote : Chaux



Pilote : Chinon



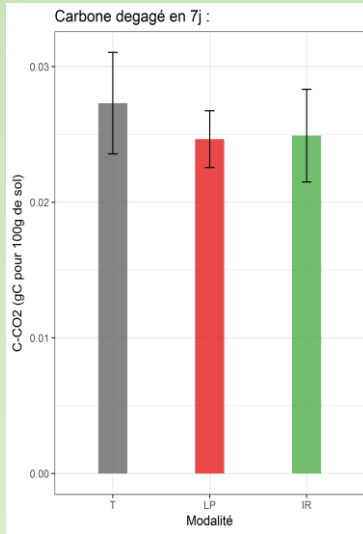
Dégagement de CO₂ plus faible sur la modalité travaillée

LP : stock LP = T et dégagement faible ????

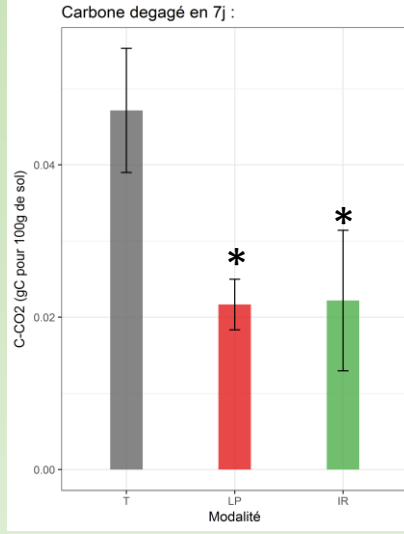
IR : stock IR > T et dégagement faible ????

Pilote : Minéralisation

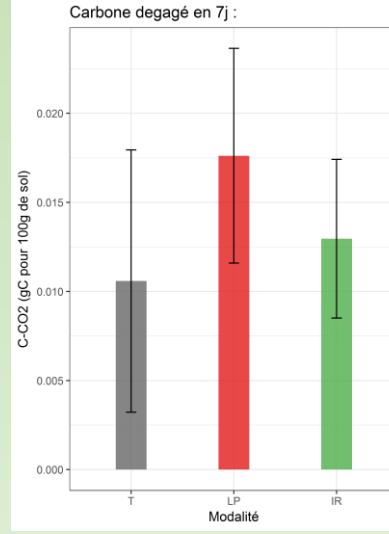
Pilote : Chaux



Pilote : Chinon



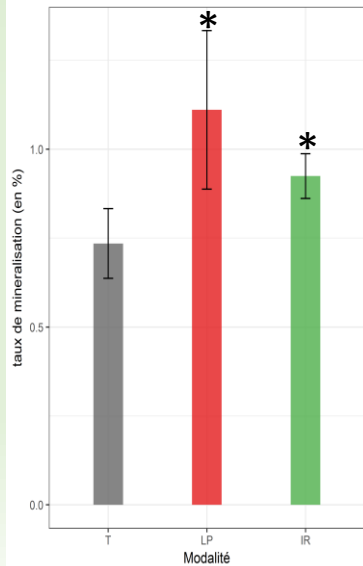
Pilote : Rennes



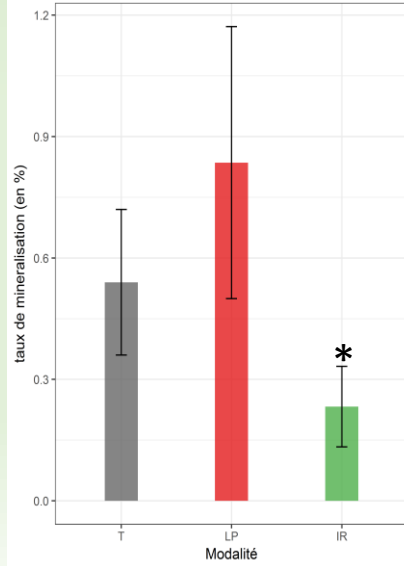
Pas de dégagement significativement différent

Mais tendance a un taux plus élevé sur LP ou le stock est plus élevé

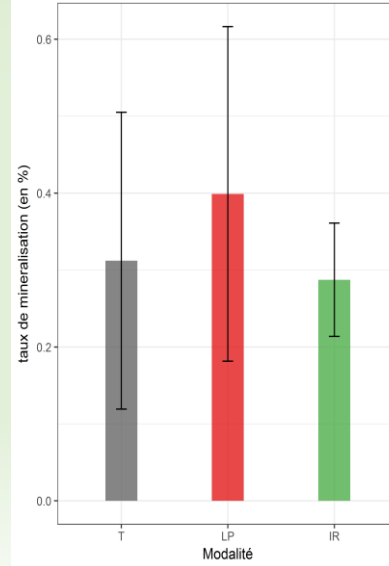
taux de minéralisation du carbone :



taux de minéralisation du carbone :



taux de minéralisation du carbone :

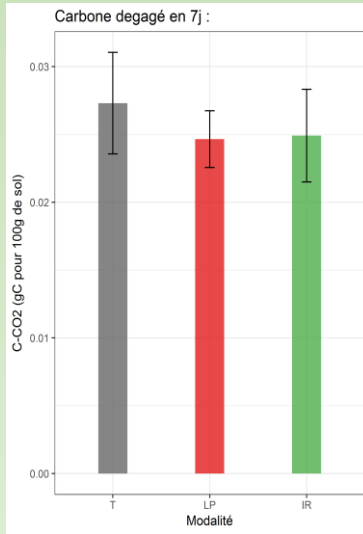


Taux de minéralisation qui tend a suivre les variations sur LP

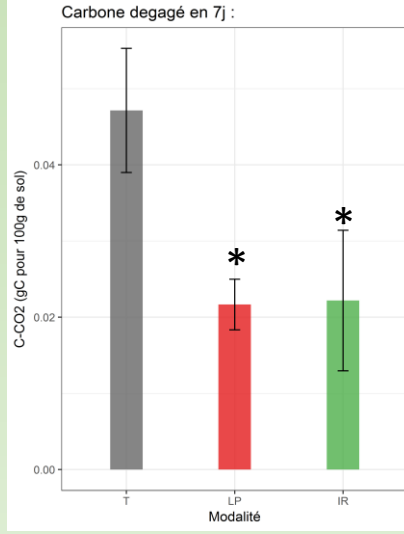
Activation potentielle de la minéralisation par l'outil (remet en surface des horizons engorgés)

Pilote : Minéralisation

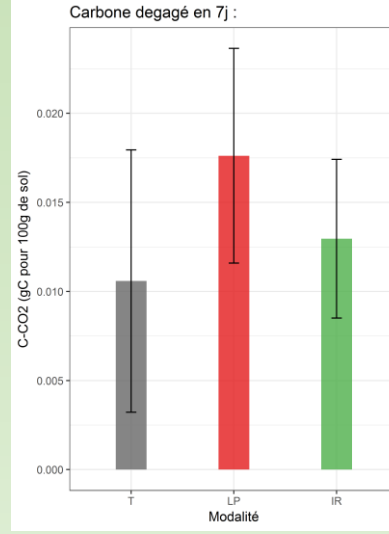
Pilote : Chaux



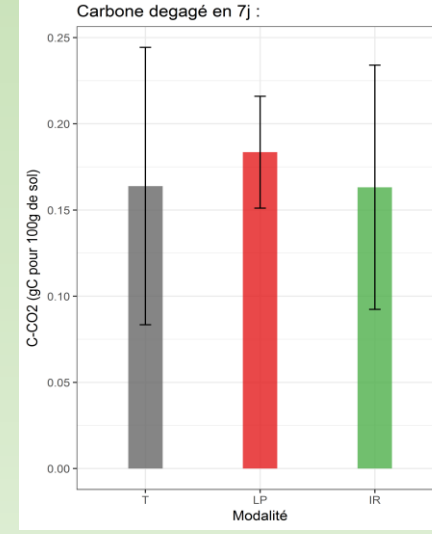
Pilote : Chinon



Pilote : Rennes

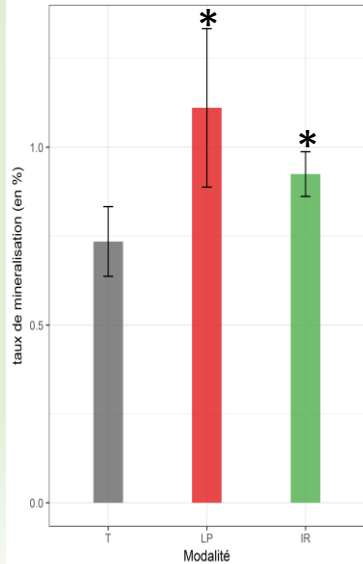


Chrono : Chaux

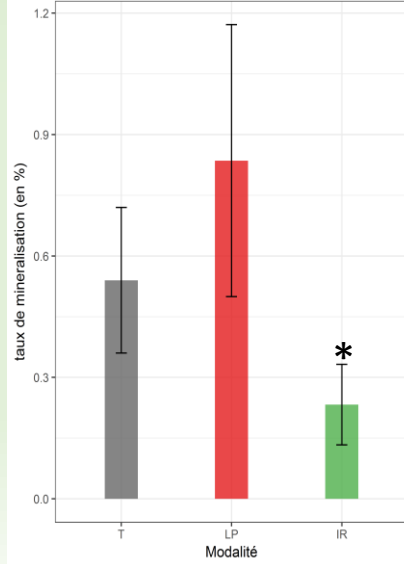


Pas de différence du dégagement de CO₂ 25 ans après la mise en place

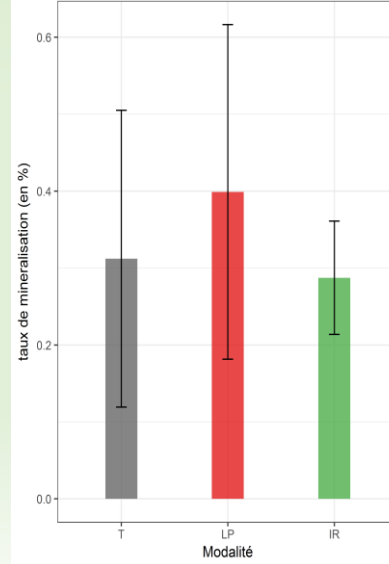
taux de minéralisation du carbone :



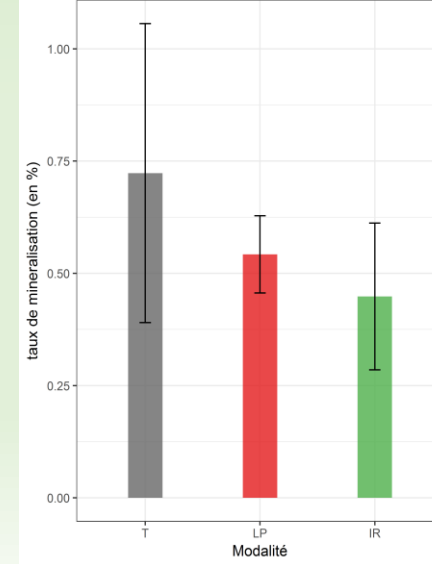
taux de minéralisation du carbone :



taux de minéralisation du carbone :



taux de minéralisation du carbone :



Pas de différences du taux de minéralisation mais une tendance à la baisse