

Rendement et qualité du blé : fertilisation soufrée et interaction avec la température

Francesca Degan (Arvalis), Rosie Sangata (UCA-Inrae), Julie Boudet (UCA-Inrae)

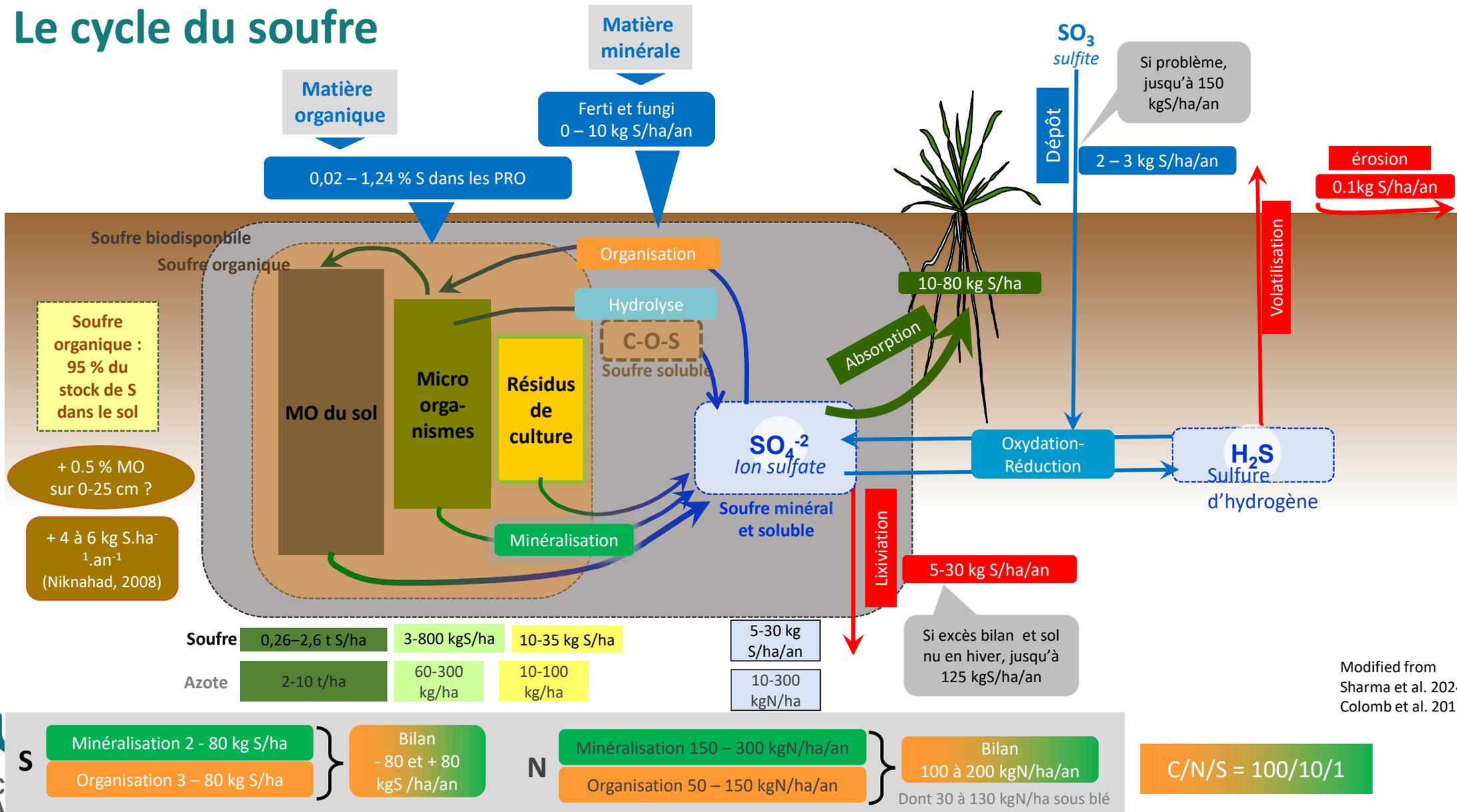
ASF - Journée section céréales à pailles

14/05/2024

Plan

- 1- Raisonnement de la fertilisation soufrée :
 - Le cycle du soufre dans les agroécosystèmes
 - Les outils de raisonnement et de diagnostic
 - La balance N/S dans la plante et dans le grain
- 2- le soufre et qualité du grain
- 3- le soufre et stress thermique

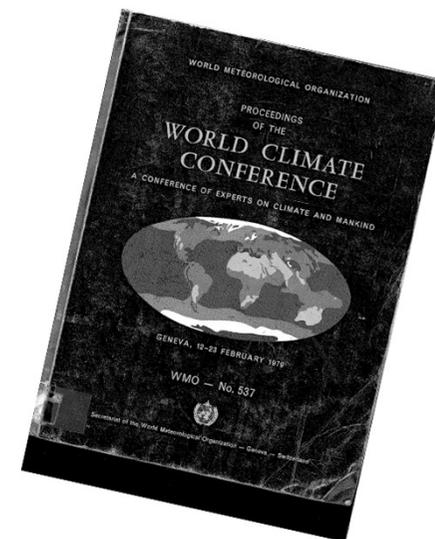
Le cycle du soufre



Modified from Sharma et al. 2024
Colomb et al. 2017

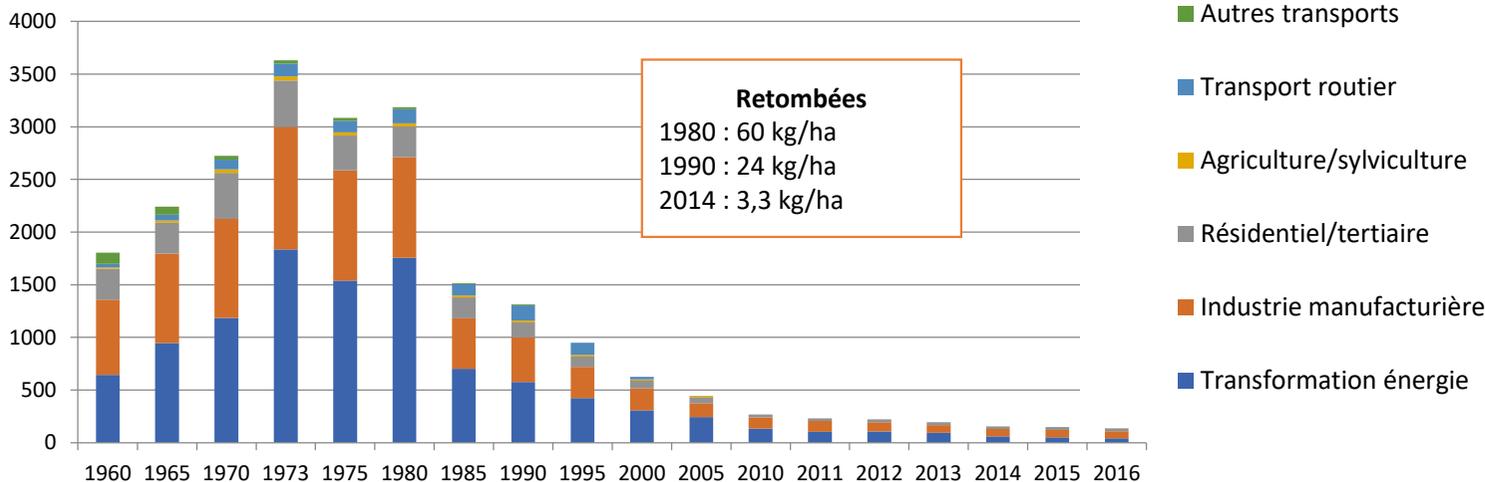
Enjeux environnementaux

1. le soufre est stocké essentiellement dans l'océan, la pédosphère (les sols) et la lithosphère. Le stock atmosphérique est très faible.
2. Les flux entre les continents (35), les océans (170) et les activités humaines (mines + combustion 220 MtS/an) vers l'atmosphère sont importants.
3. Les dépôts de l'atmosphère vers les continents sont en baisse depuis les années 80.



Émissions atmosphériques de SO₃ en France métropolitaine

Source CITEPA, format SECTEN - avril 2017



La disponibilité du soufre pour les plantes dans le sol a diminué de 34 à 86 % entre 2000 et 2020 (Sharma et al 2024).

169 kt de SO₂ émis en 2014 (eq à 211 kt SO₃) soit environ 3,3 kg SO₃/ha

Source: <https://www.citepa.org/fr/air-et-climat/polluants/aep-item/dioxyde-de-soufre>

Le soufre dans la plante

- S absorbé par la plante dans la solution du sol sous forme SO_4^{2-}
- L'assimilation du sulfate conduit à la synthèse de :
 - (i) des acides aminés soufrés (cystine, cystéine, méthionine)
 - (ii) des produits secondaires (glucosinolates et flavonoïdes)
 - (iii) des métabolites, contenant du soufre, impliqués :
 - dans la résistance à des pathogènes (ex glucosinolates)
 - dans la réponse aux stress abiotiques (ex glutathion)
- Besoins de la plante sont très liés à la concentration en protéines

Réseaux d'expérimentation sur le soufre sur blé en France (Arvalis et partenaires)

Localisation des essais soufre sur céréales et type de sols	Année (récolte du blé)	Nombre d'essais
Région Poitou-Charentes Terres de groies (argilo-calcaire)	1986 / 1987 / 1988	91 essais
Région Centre Argilo-calcaires, limons, sables ..	1987 / 1988	52 essais
Champagne Crayeuse Sols de craie	1987 / 1988	32 essais
Régions Centre, Nord et Poitou-Charentes Réseau animé par le CRITT Hyginov	1996 – 1997 - 1998	25 essais
Champagne Crayeuse	1995 - 1996	23 tests
Sud-Ouest Argilo-calcaire, boubènes	1995 - 1996	10 tests
Réseau national Arvalis sur blé <i>Objectif : évaluer la réponse à la fertilisation soufrée dans des milieux à faible risque</i>	2001 / 2002	15 essais
Réseau national sur blé tendre et blé dur : Arvalis, Cerexagri et partenaires (chambre d'agriculture, coopératives, négoce, organisme de développement, l'INRA, le laboratoire SAS-Agrosystèmes) <i>Objectif : mieux cerner la réponse au soufre, améliorer la grille de décision « soufre » sur céréales, évaluer les indicateurs</i>	2006 / 2007	61 essais
Réseau dans le Nord <i>limons profonds</i>	2012-2015	14 essais
Observatoire COMIFER (Vivescia, Eurochem, Terrena)	1994-aujourd'hui	141 essais

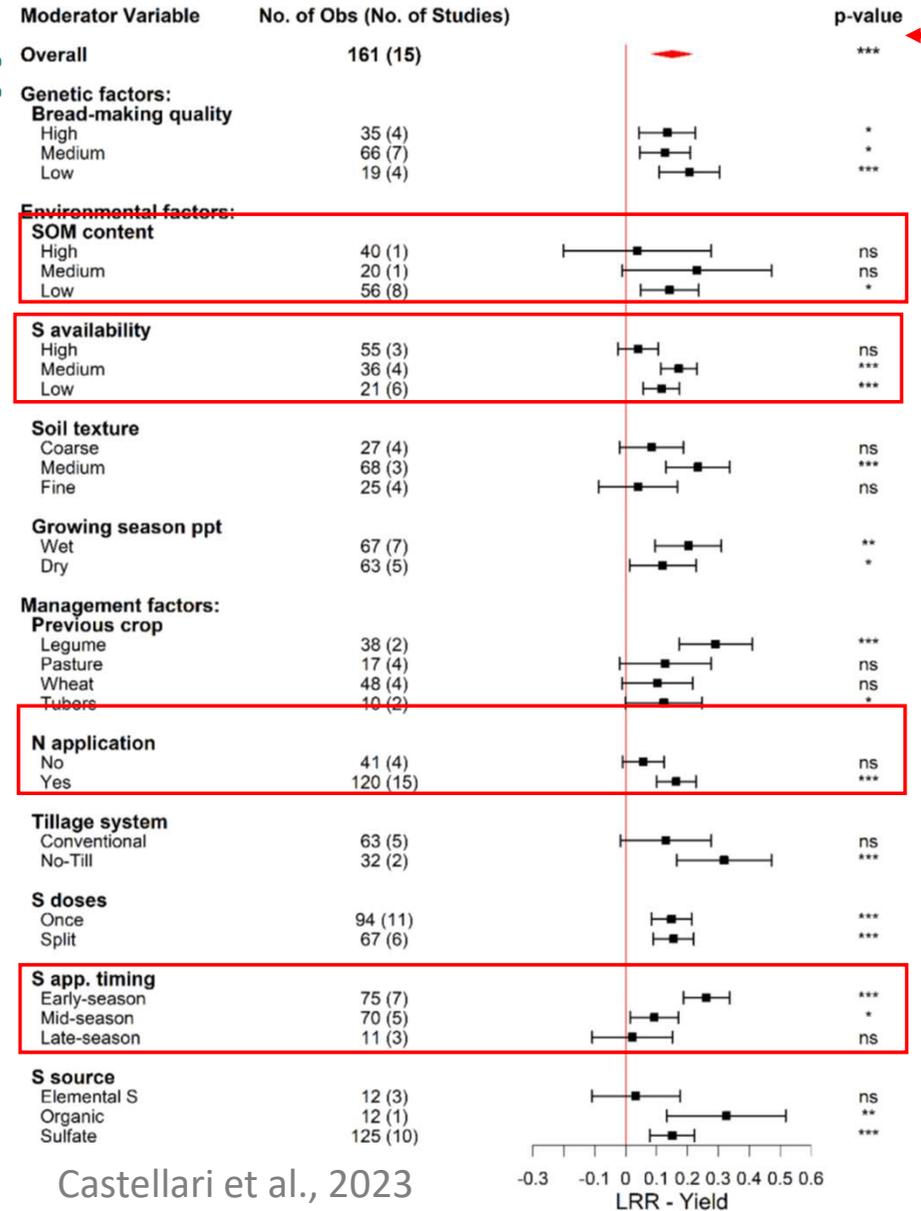
Impact du soufre sur le rendement

• PERTES DE RENDEMENT :

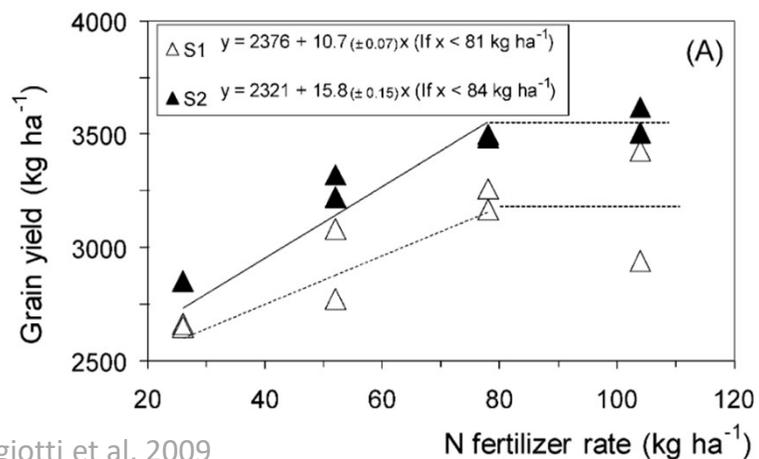
- Déficience modérée (temporaire) : 2-10 q/ha
- Déficience sévère (15-30 q/ha)
- Pertes modérées (< 10 q/ha), pas toujours associées à des symptômes visuels et inversement

• Interaction entre AZOTE-SOUFRE

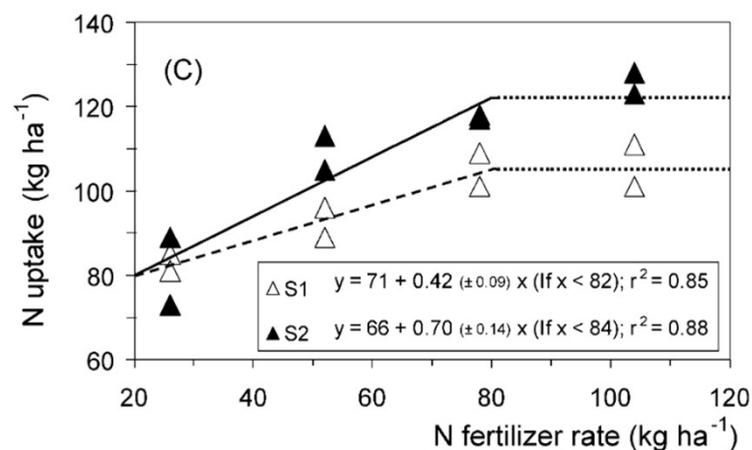
- Dynamique d'absorption du soufre liée à celle de l'azote
- Rapport optimal N/S dans les plantes pendant la montaison est de l'ordre de 15-16
- Une plus forte absorption de N entraîne un plus fort besoin de S
- Carences en S dans les parties surfertilisées en N (recoupement entre passages)



Impact du soufre sur le rendement



Salvagiotti et al. 2009



Augmentation de l'absorption d'azote et du rendement avec apport en S en interaction avec l'apport de N

Outils de raisonnement- bilan du soufre

- Besoins en soufre des cultures :
 - très exigeantes protéines et composés soufrés (crucifères) : 60 – 80 kg S/ha
 - Moyennement exigeantes – bcp de protéines : 20-50 kg S/ha
 - Peu exigeantes – peu de protéines (cap) : 10-20 kg S/ha
- Sources de soufre - 75 à 90 % organique
 - Minéralisation du S organique (20-80 kg S/ha/an)
 - Apports de S organique exogène (PRO entre 0,04 et 1,24%, résidus, Cl...10-40 kg S/ha/an)
 - Apports atmosphériques (2-8 kg S/ha/an)
 - Apports S minéral : Eaux d'irrigation, Fungi, ferti
- Pertes de soufre :
 - Lixiviation : 1 - 30 - 125 kg S/ha/an
 - Erosion : 0,1 kg S/ha/an

Manque l'approche par un bilan complet analogue à celui de l'azote

Grille de risque de carences en soufre

Grille adaptée à partir de:

- résultats des essais (fréquence des réponses par type de sol et climat)
- suivi dispositifs lysimétriques (seuils de pluviométrie)

Situations à risque connues

Sols superficiels, caillouteux, sableux
Pluviométrie hivernale > 250 mm
Apports rares ou inexistants de S ou MO
Semis tardifs plus exposés

Objectif de rendement : blé tendre 70 et 100 q/ha

Sans apports réguliers de pro

Avec apports réguliers de fumiers et composts (> 1 an sur 3) (entre parenthèses)

	pluviométrie (mm) 1/10 au 1/03	précédent avec apport de soufre > 60 kgSO ₃ /ha	Autres cas
Risque élevé, sols superficiels filtrants: argilo-calcaires superficiels caillouteux, sol sableux	<i>forte ou normale (>250)</i>	50 (20) - 60 (30)	50 (30) - 60 (30)
	<i>faible (<250)</i>	20 (0) - 30 (0)	30 (0) - 40 (0)
Risque moyen: argilo-calcaires moyens, sols de craie, limons et limons sableux battant (MO faible)	<i>forte (>400 mm)</i>	40 (0) - 30 (0)	40 (0) - 30 (0)
	<i>normale</i>	20 (0) - 30 (0)	30 (0) - 40 (0)
	<i>faible (<300)</i>	0 (0) - 0 (0)	20 (0) - 30 (0)
Risque faible: sols profonds limons argileux, argileux	<i>forte (>400 mm)</i>	30 (0) - 40 (0)	30 (0) - 40 (0)
	<i>normale</i>	0 (0) - 0 (0)	20 (0) - 30 (0)
	<i>faible (<300)</i>	0 (0) - 0 (0)	0 (0) - 0 (0)

Outils de diagnostic

- **Indicateurs visuels :**
 - Diagnostic : Jaunissement de la feuille la plus jeune
- **Indicateurs de nutrition soufrée des cultures :**
- **plante**
 - **Test Malate/Sulfate** : est le test le plus précis concernant le diagnostic du statut S chez les plantes. Le ratio malate:sulfate surestime le diagnostic de déficience en S, suggérant un besoin de réévaluation des valeurs seuils (Blake-Kalff et al., 2004; Carver, 2005 ; Reussi et al., 2011)
 - **Teneur SO_4 dans le jus de base des tiges NUTRICHECK** : les résultats ne sont pas très discriminants pour les essais avec carences. Mais, peu d'essais avec des écarts de rendement > 5q/ha
 - **Diagnostic foliaire à la floraison** : trop tardif pour corriger, mais il est discriminant pour comparer les modalités dans un essai
 - **Teneur en soufre des grains** : évaluer des modalités sur un même site, en relatif
- **sol**
 - **Méthode Scott**: performance moyenne mais situations carencées discriminées
 - **Reliquat soufré** : donnent une photographie à un instant t sur la disponibilité de soufre, mais il serait nécessaire de l'associer à un modèle de minéralisation du S des matières organiques pour évaluer les fournitures de S du sol
- **D'autres indicateurs :**
 - Réflectométrie N-Pilot[®] (ce n'est plus développé)
 - Fluorimétrie XRF (en cours de mise au point sur le blé)

Perspectives Agricoles N°353 fev 2009

Carences en soufre sur blé tendre d'hiver



Les carences en soufre apparaissent en foyer généralement à partir de début montaison.

Carences en soufre sur blé tendre d'hiver : Stries jaunes le long des nervures



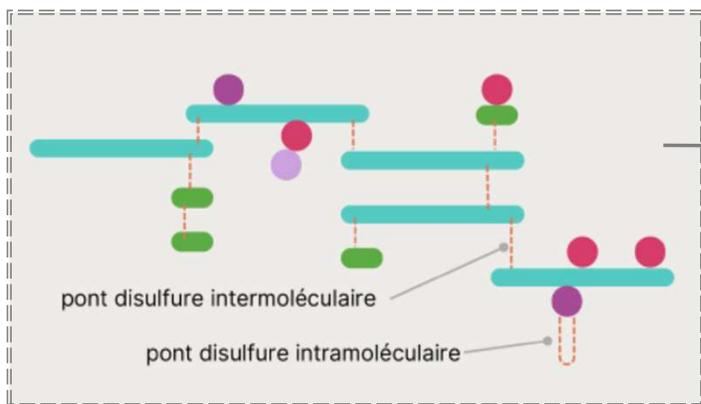
Stries jaunes ou vert clair le long des nervures des jeunes feuilles.

Préconisations sur céréales d'hiver

- Raisonner les apports de soufre par rapport au risque de lixiviation
- Apporter le soufre avec l'azote , de préférence en fin tallage - mi-tallage 40 à 60 kg SO_3 :
 - Sur céréales d'hiver, il est préconisé un apport de fin tallage à début montaison, juste avant la période de besoins importants
 - Les engrais azotés-soufrés sont considérés comme la forme d'apport la plus commode compte tenu de la complémentarité des deux éléments.
- Si une carence est observée, alors **la correction possible jusqu'à 2 nœuds, mais préférable au stade épi 1 cm, visant d'abord le rendement au travers du peuplement épis**

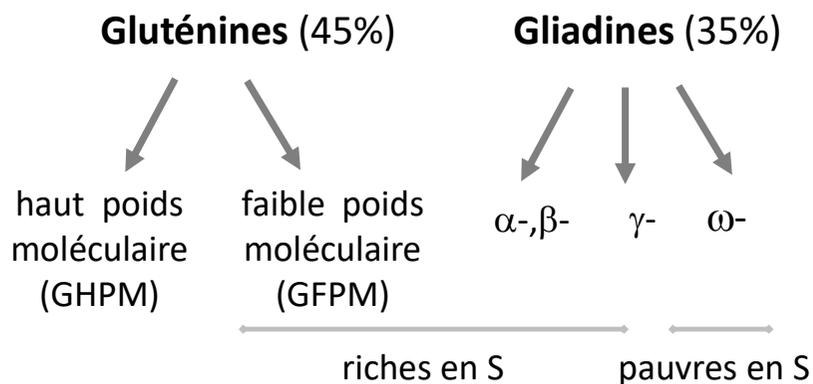
Le soufre et qualité du grain

Réseau polymérique du gluten



Propriétés rhéologiques de la pâte
 Gliadines -> viscosité et extensibilité
 Gluténines -> élasticité

La qualité technologique est déterminée par la concentration et la composition en protéines de réserve



L'azote et le soufre déterminent la concentration et la composition en protéines de réserve dans le grain

Le soufre et qualité du grain

Impact de l'apport de soufre sur les propriétés rhéologiques et la qualité boulangère

Source of Variation	W		P		L		P/L	
	Average	sig	Average	sig	Average	sig	Average	Sig
<i>Sulfur</i>		*		*		ns		ns
S0	64	b	42	b	39	a	1.14	a
S1	73	a	45	a	44	a	1.15	a

Augmentation de la force boulangère et de la ténacité avec apport de S

Sol limono-argileux
Variétés de blé tendre : Andriolo, Sieve, Verna

Guerrini et al. 2020



Zhao et al. 1999

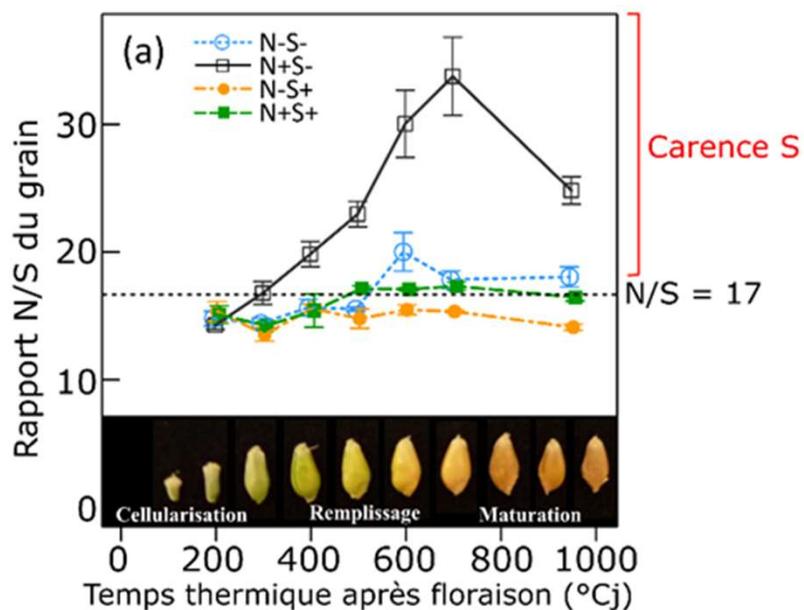
Blé de printemps
Serre, culture en sable

Augmentation du volume de pain quand le ratio N/S diminue (par un apport de S)

Traitement	Fort S + S	Fort S	Faible S
Ratio N/S farine	15,9	16,9	30,9
Volume du pain (mL)	1055	930	475

Le soufre et qualité du grain

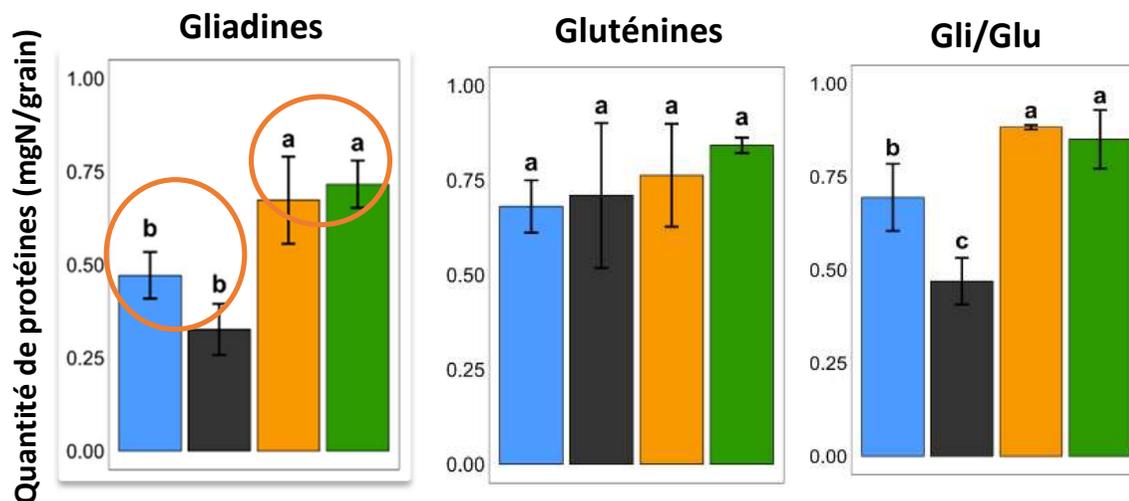
Le ratio N/S dans le grain impacte la composition en protéines de réserve



Triticum monococcum

Traitements appliqués à 200°Cj

- N-S- 0 mM N & 0 mM S
- N+S- 6 mM N & 0 mM S
- N-S+ 0.5 mM N & 2 mM S
- N+S+ 6 mM N & 2 mM S



Bonnot et al. 2017

Modification de la composition en protéines de réserve (gliadines) avec apport de S en interaction avec l’N

Augmentation significative des α/β -gliadines et γ -gliadines (riches en S) avec apport de S (tendance pour les gluténines de faible poids moléculaire)

Le soufre et qualité du grain

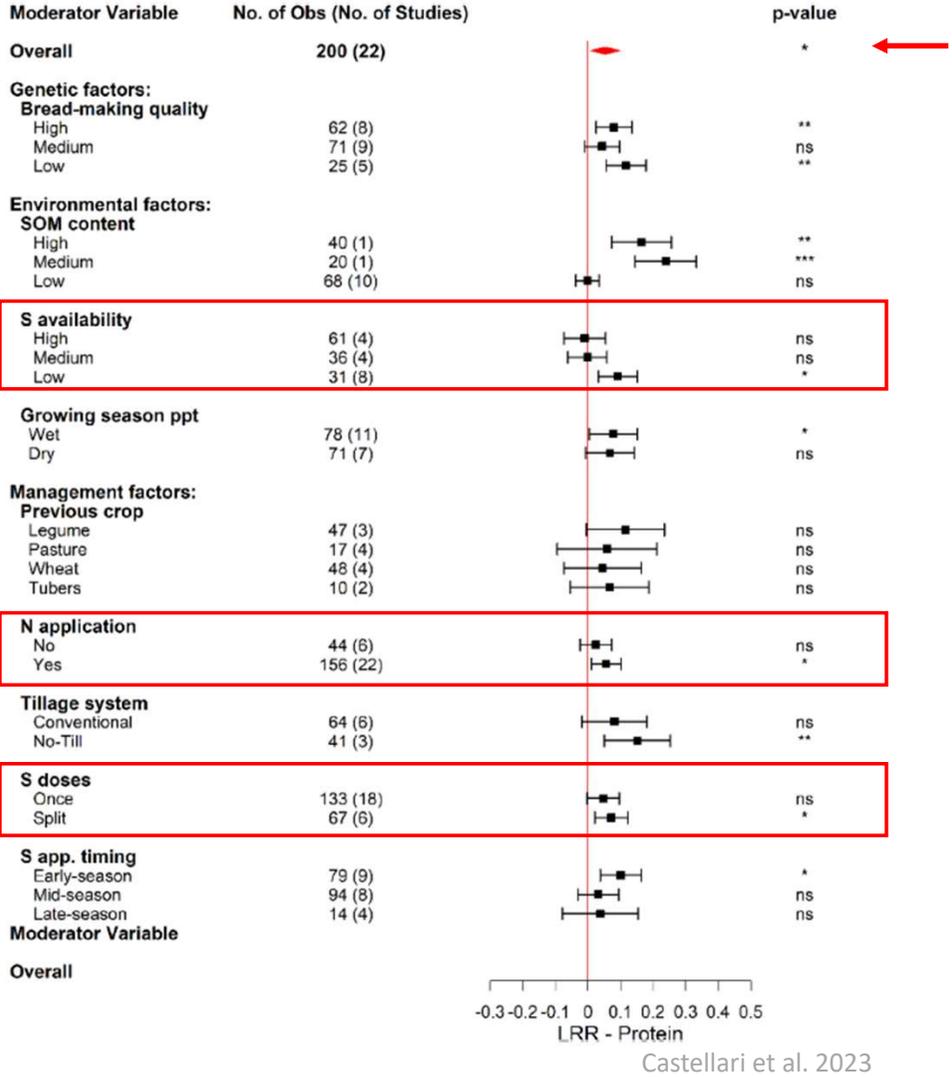
Interaction azote et soufre

Source of Variation	Total Protein (%DW)	
	Average	sig
<i>Sulfur</i>		
S0	12.21	a
S1	12.86	a
<i>Nitrogen</i>		
N35	11.7	b
N80	11.98	b
N135	13.93	a

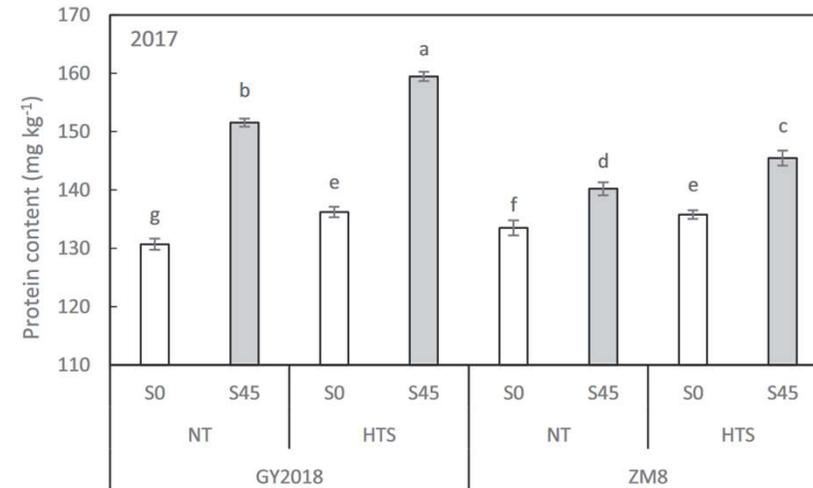
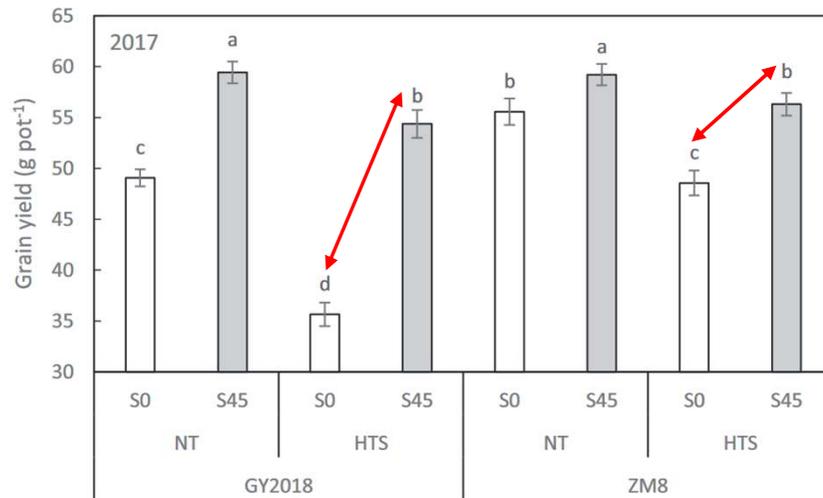
Interactions
Nitrogen × Sulfur *

Guerrini et al. 2020

Effet significatif de l'interaction N x S sur la quantité de protéines totales



Le soufre et stress thermique



Tao et al. 2018

Sol limono-argileux - 26.05 mg de S disponible / kg de sol
Variétés de blé tendre : Gaoyou 2018 et Zhongmai 8

Augmentation du rendement et de la teneur en protéines avec apport de S en cas de stress thermique
Variabilité génétique de la réponse

Rôle du glutathion dans le maintien du statut redox des cellules

(Bonnot et al. 2023, Farooq et al. 2011)

Apport du S permet une meilleure absorption et efficacité d'utilisation de l'azote (en cas d'accélération de la sénescence en réponse à un stress thermique)

(Salvagiotti et al. 2009; Yu et al. 2021)



Mécanismes génétiques et moléculaires de la tolérance au réchauffement climatique en lien avec la nutrition soufrée

Financement : CIR1 Agro-écosystèmes durables dans un contexte de changement global
Axe 1 CAAP : capacités adaptatives de animaux et des plantes

Partenaire : Limagrains Ingrédients, Laurent Linossier

01/12/23 – 31/11/26

Directeur de thèse : Jacques Le Gouis

Co-encadrante : Julie Boudet

Contexte et axes de recherche

Augmentation de la prévalence :
d'évènements climatiques extrêmes (canicules...)
de carence en S dans les sols



**Comment la nutrition soufrée peut-elle
limiter l'impact du stress thermique sur le
rendement et la qualité du blé tendre ?**

Mécanismes moléculaires
impliqués dans l'interaction
fertilisation soufrée x stress
thermique

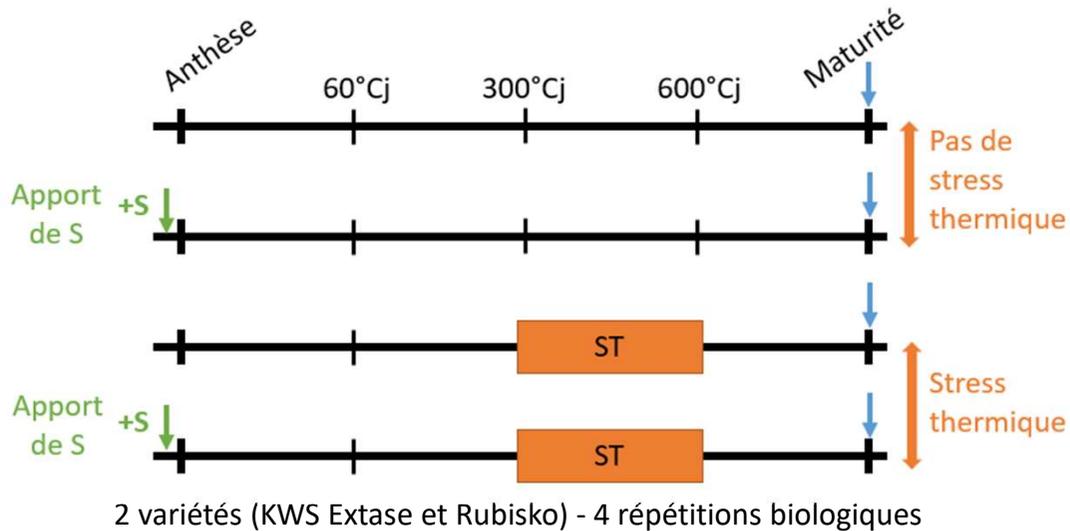
Effet de l'interaction
fertilisation soufrée x stress
thermique sur rendement
et la qualité technologique

Variabilité génétique de la
réponse à l'interaction

Projet de thèse

Expérimentation au champ & analyses

Modalités



Tente mobile

Analyse sur grains matures

Rendement

PMG
Biométrie des grains

Composants du grain

%N et %S
Composition en protéines de réserve
Taille des polymères de gluténines (Arvalis)
Dosage amidon

Qualité technologique

Alvéographe
Mixolab mode Farinographe
Micropanification (Limagrains Ingrédients)

Conclusions & perspectives

Amélioration du raisonnement et du diagnostic

- précision de la méthode de raisonnement pour le conseil de fertilisation soufrée
- développement d'outils de diagnostic avec des indicateurs plus précis du statut S de la plante avant 2 nœuds
- évolution vers une approche la fertilisation S intégré dans un modèle (type CHN)
- intégration dans le conseil d'une combinaison de fertilisation azotée et soufrée optimale

Interactions entre fertilisation soufrée et stress thermique

- fertilisation soufrée comme levier pour une meilleure tolérance au stress thermique?
- évaluation la variabilité génétique de l'interaction S x stress thermique
- Quels sont les enjeux environnementaux d'utiliser la fertilisation soufrée comme levier pour le stress thermique ?
- évaluation sur d'autres stress abiotiques