

GESTION DE LA FERTILISATION SOUFREE DANS LES SYSTEMES DEGRANDE CULTURE

Alain Bouthier, ARVALIS

Plan de la présentation

- Le cycle du soufre à l'échelle globale
- Le Soufre dans le sol
- Le soufre dans la plante
- Gestion de la fertilisation soufrée

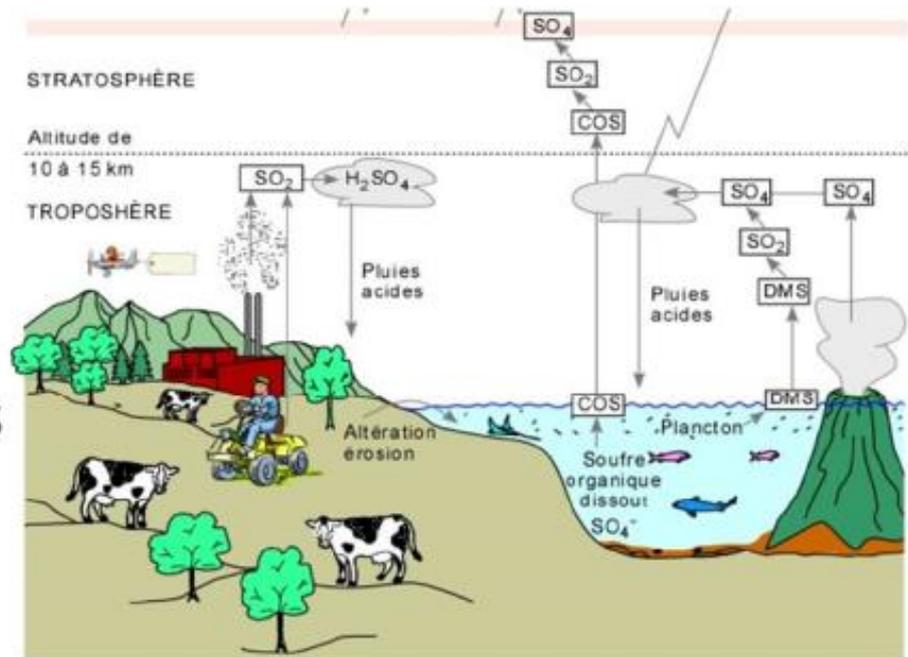


Rappel sur les unités

- *Modes d'expression les plus courants*
 - *En quantité de S*
 - *En quantité de SO₂ (domaine atmosphérique)*
 - *En quantité de SO₃ (domaine de la fertilisation)*
 - *En quantité de SO₄ (domaine de l'eau)*
- *Coefficients de conversion*
 - *S > SO₂ X2*
 - *S > SO₃ X 2.5*
 - *SO₂ > SO₃ X 1.25*

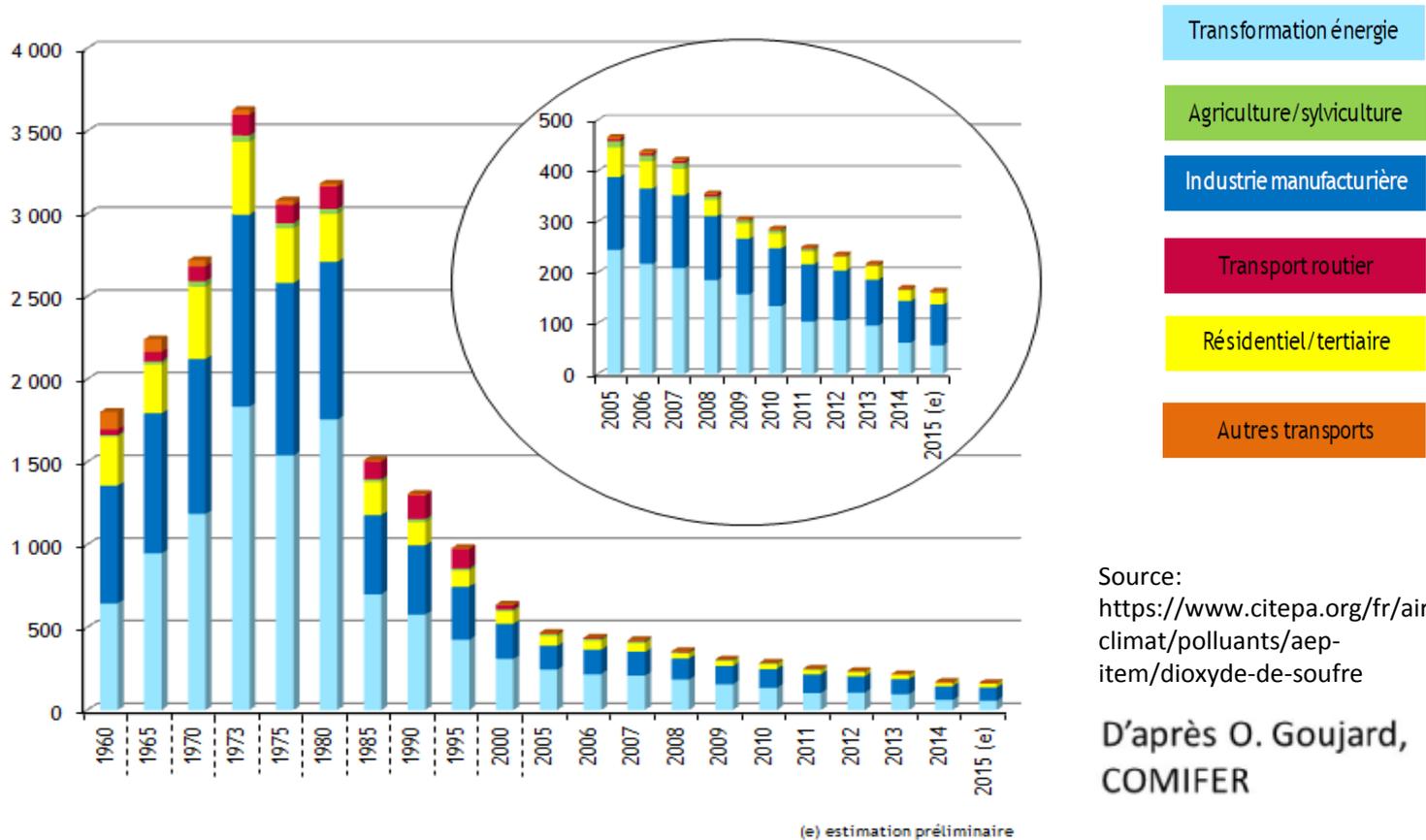
Le cycle du Soufre à l'échelle globale

- Principaux réservoirs: océan, croute terrestre
- Atmosphère=compartiment de transfert
- Les activités humaines (combustion charbon, pétrole, gaz) sont à l'origine d'émissions de SO_2 vers l'atmosphère, hydrolysé sous forme H_2SO_4 , à l'origine des « pluies acides »



Apports de S par retombées atmosphériques

Emissions atmosphériques en dioxyde de soufre par secteur en France métropolitaine (en kt)

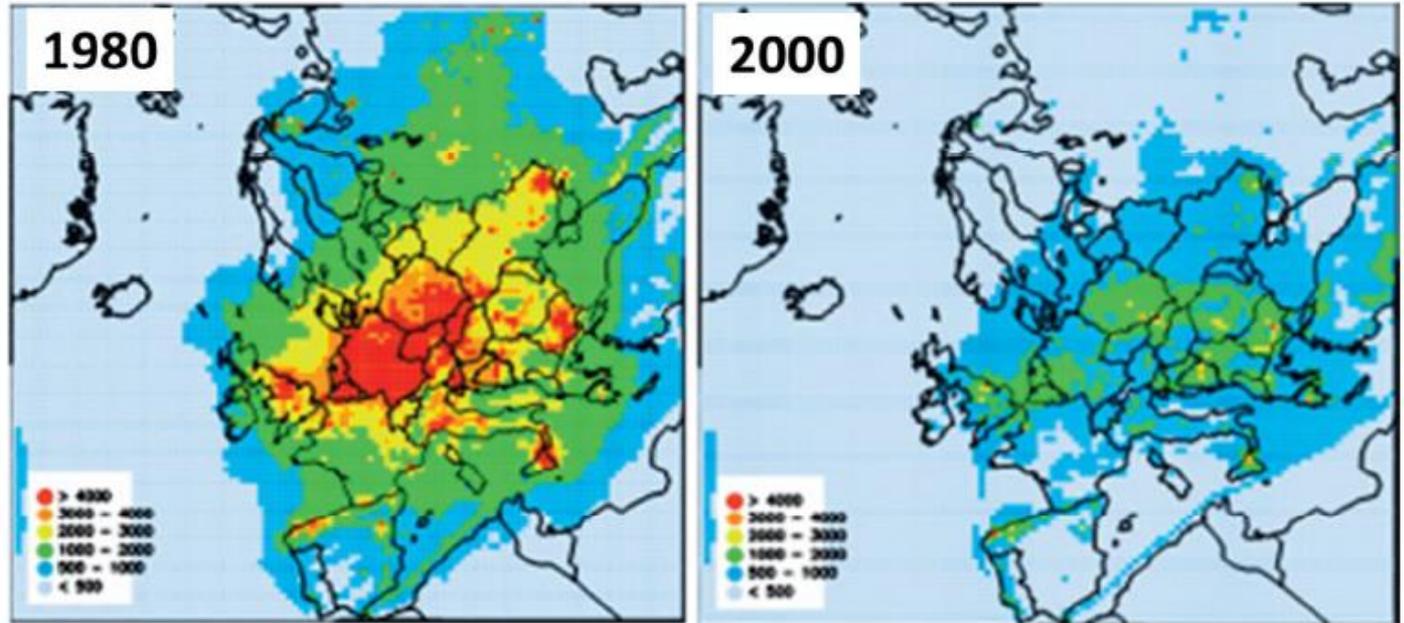


Source:
<https://www.citepa.org/fr/air-et-climat/polluants/aep-item/dioxyde-de-soufre>

D'après O. Goujard,
 COMIFER

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

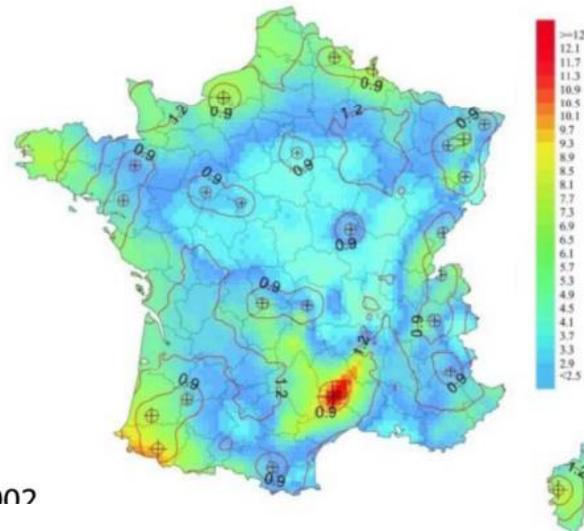
Evolution des dépôts atmosphériques de soufre sur l'Europe en 1980 et 2000 (mg S/m²)



1000mg S m⁻²=10kg S ha⁻¹

Gun Lövblad, *EMEP Assessment Report*

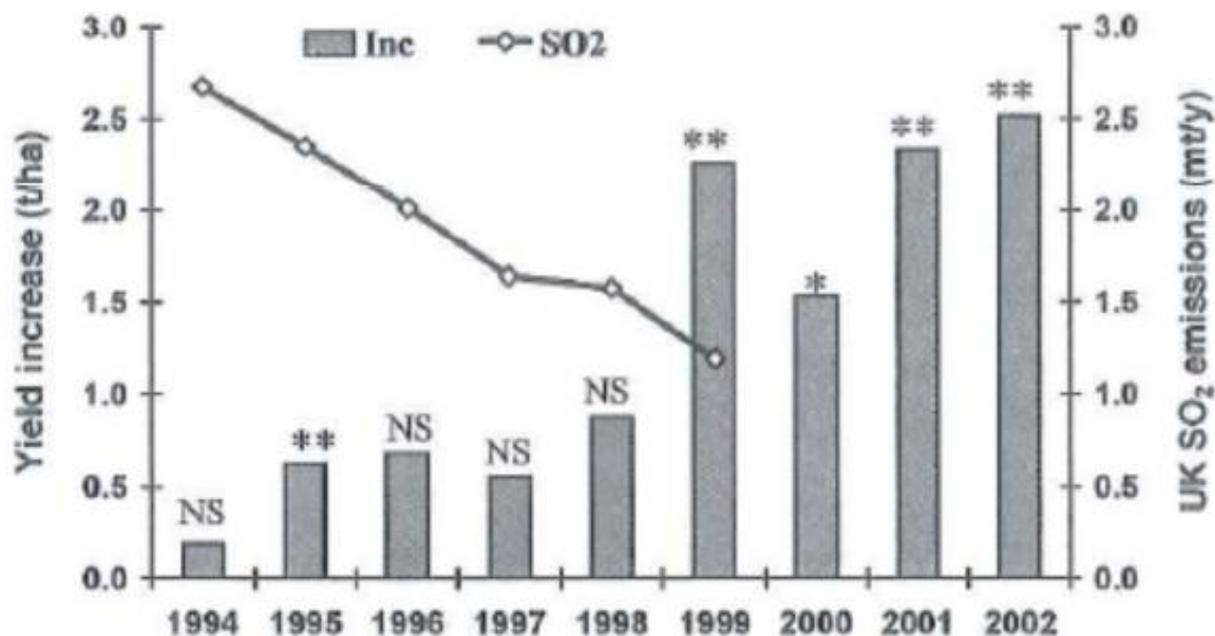
Dépôts atmosphériques totaux hors couvert forestier, de sulfate (S-SO₄, kg.ha⁻¹.an⁻¹)



Renecofor, Croisé et al, 2002

Conséquence de la réduction des émissions (et donc des dépôts) : Réapparition de carences en S dans les années 80-90

Evolution des émissions de SO_2 en Angleterre et réponse à la fertilisation soufrée (essai de Woburn farm) (in McGrath et al., 2002)



A la baisse des dépôts atmosphériques s'est ajoutée une baisse des teneurs en S dans les fertilisants minéraux et une augmentation des exportations par les récoltes liées à l'augmentation des rendements

Soufre apporté par les effluents d'élevages

Livestock manure type	Number of samples	Dry matter content (%)	Mean SO ₃ content (kg/t or m ³)	Mean SO ₃ content (kg/t DM)
Cattle FYM	325	24	2.5	10.4
Pig FYM	105	24	3.7	15.4
Cattle slurry	170	2	0.3	15
		6	0.7	12
		10	1.2	12
Pig slurry	94	2	0.6	30
		4	0.9	22.5
		6	1.2	20

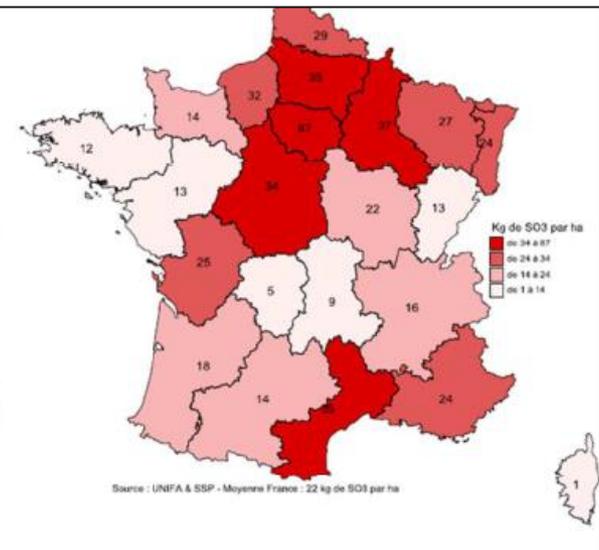
Sagoo et al., 2014



Un apport de 30T/ha de fumier de bovin (représentant 170kg N) apporte de l'ordre de 75 kg de SO₃/ha

Soufre apporté par les engrais minéraux (source Unifa)

Livraisons des éléments soufre et magnésium en France depuis 2005/2006



Concentration des aquifères de Poitou-Charentes en mg/l SO₄ (source www.adeseaufrance.fr)

	Moyenne	Ecart type
CHARENTE	18.8	7.8
CHARENTE MARITIME	14.4	5.3
DEUX SEVRES	4.7	0.4
VIENNE	57.4	51.4

Soufre apporté par l'irrigation

Bilan du soufre en France

sur 25,8 M d'ha fertilisables (SAU – jachère – parcours & pacages)

● Apport par les fertilisants minéraux	~22 kg SO ₃ /ha
● Apport par les fongicides	~2 kg SO ₃ /ha
● Apport par les déjections animales	~12 kg SO ₃ /ha
● Retombées atmosphériques	~3 kg SO ₃ /ha
● Exportations par les cultures	~28 kg SO ₃ /ha
● Lixiviation	(~50 kg SO ₃ /ha ?)

- Approche bilancielle difficile avec de **fortes disparités régionales**
- Il y a des **risques importants** d'apparition de carence en soufre dans certaines **zones cultivées**.

Le soufre dans le sol

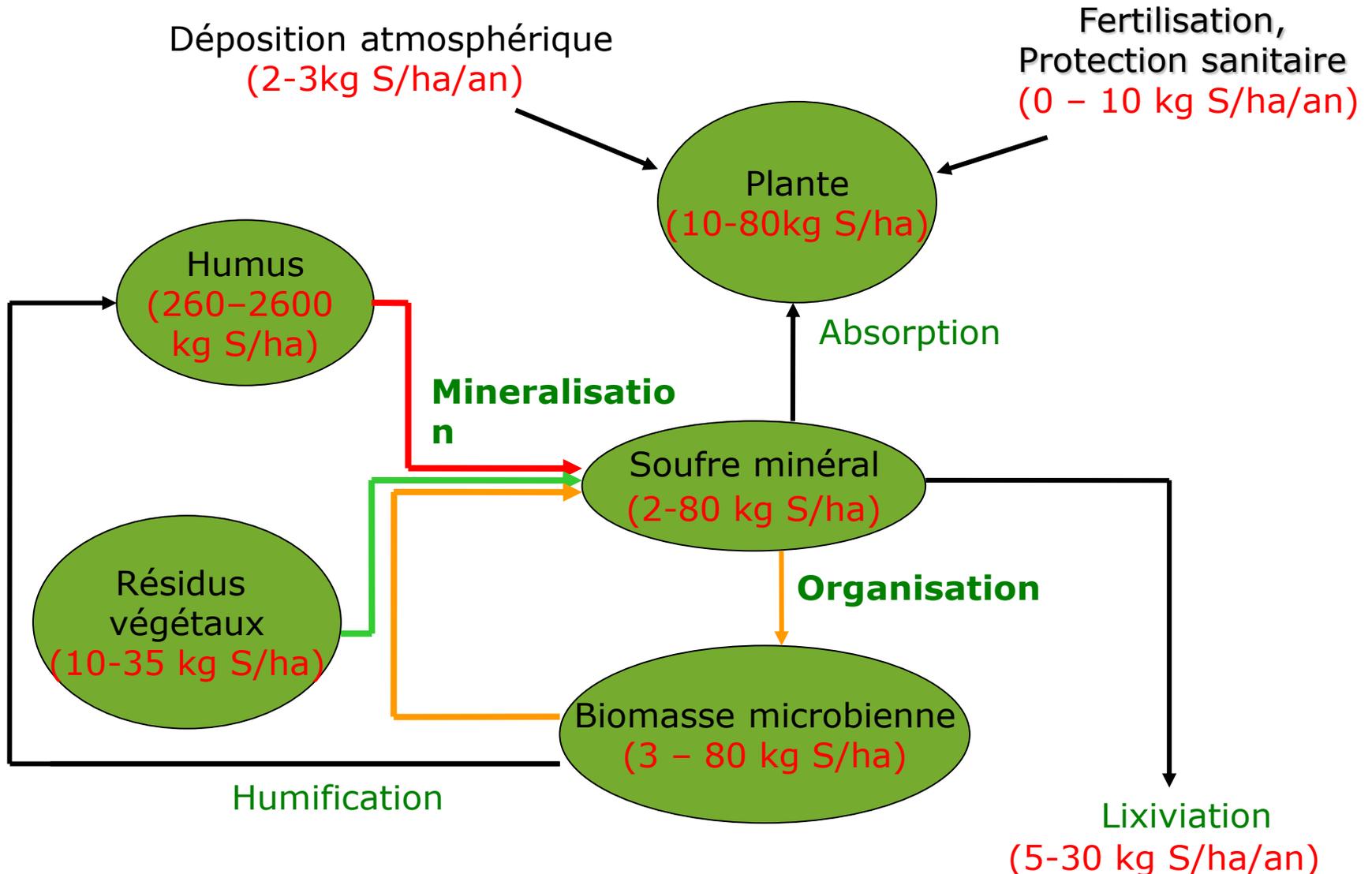
- La teneur en S des sols \sim 0.02-0.2%
 - Mais peut atteindre 1% en sol tourbeux
- 60 à 95% du S sous forme organique
 - Humus, résidus de cultures, biomasse microbienne
- S minéral:
 - Plusieurs formes possibles en fonction de l'état du sol
 - Forme plus ou moins oxydée en fonction du potentiel redox:
 - ❖ Sulfure (H_2S ou S^{2-} , -II)
 - ❖ Soufre élémentaire (S, 0)
 - ❖ Thiosulfate ($\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$, +II)
 - ❖ Sulfite (H_2SO_3 ou SO_3^{2-} , +IV)
 - ❖ Sulfate (SO_4^{2-} , +VI)
- Cycle du S similaire à celui de l'N:
 - minéralisation - organisation



Le soufre dans le sol

- La forme sulfate SO_4^{2-} est la forme clé pour la nutrition des plantes
 - Absorbée par les racines
 - Produit final de la minéralisation
 - Peut être adsorbé par des oxydes (Fe, Al) ou la matière organique
 - Très mobile et facilement lessivable dans le sol (idem NO_3^-)
 - Aucun risque actuellement pour l'environnement
- Mesure de la teneur en sulfate du sol par analyse de reliquats
 - Méthode normalisée (NF ISO 11048)
 - Proposée par certains laboratoires français (couplée à reliquat N)
 - Contribue à mieux quantifier le bilan du soufre à la parcelle
- Mesure de la teneur en soufre extractible (soufre sulfate + soufre adsorbé) par la méthode SCOTT (extraction au KH_2PO_4 :)
 - Pratiquée par quelques laboratoires.
 - Références sur teneurs seuils de réponse (Arvalis)

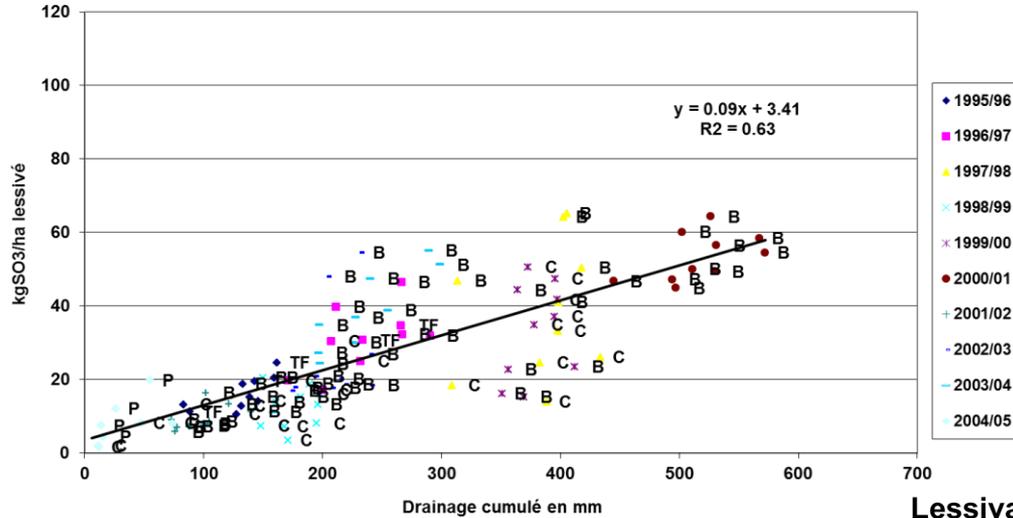
Le cycle du soufre dans l'agrosystème



Etude lixiviation du soufre à la station ARVALIS du Magneraud

Etiquettes avec la campagne de mesure et la culture en place

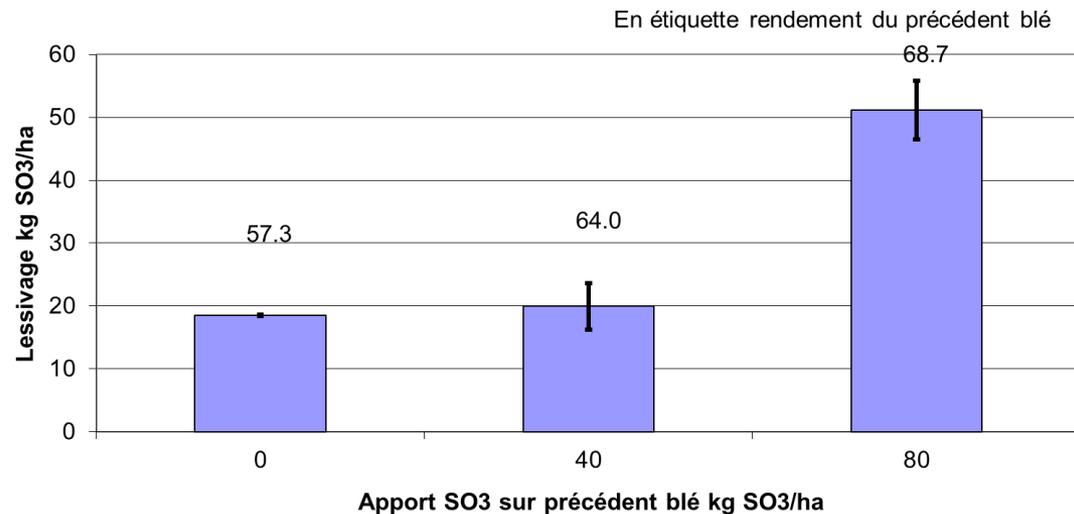
1995-05 rotation



Impact de la quantité d'eau drainée sur lixiviation du soufre

Lessivage de soufre en relation avec la dose de soufre apportée sur le précédent blé 2002

Impact de la dose de soufre sur le précédent sur lixiviation du soufre



Soufre et nutrition des plantes

- Entre dans la composition des acides aminés soufrés (cystine, cystéine, méthionine)
- + certaines vitamines et molécules impliquées dans la résistance à des pathogènes (ex glucosinolates)
- S prélevé dans la solution du sol sous forme SO_4^{2-}
- Besoins très liés à la teneur en protéines
 - 60 à 80 kg S/ha : Espèces riches en protéines et composés soufrés (ex Colza)
 - 20 à 50 kg S/ha : Espèces riches en protéines (ex légumineuses)
 - 10-20 kg S/ha : Espèces avec peu de protéines soufrées (ex céréales)
- Les végétaux sont l'unique voie d'entrée de S dans la chaîne alimentaire, jusqu'à l'homme

Symptômes de carence: jaunissement des feuilles jeunes (pas de confusion possible avec carence N)



Effets sur le rendement, la résistance aux stress (biotique, abiotique), l'efficacité d'utilisation de N, la qualité (ex qualité boulangère)



DEFICIENCE EN SOUFRE SUR CEREALES

PERTES DE RENDEMENT

- Déficience modérée (temporaire) : 2-10 q/ha
- Déficience sévère (15-30 q/ha)

FORTE INTERACTION AZOTE-SOUFRE

- Augmentation de la dose d'azote
 - Besoins en soufre accrus
 - Favorise apparition déficience en soufre
 - Amplifie la réponse aux apports de soufre

LIAISON SYMPTOMES -PERTES DE RENDEMENT

- Pertes modérées (< 10 q/ha), pas toujours associées à des symptômes visuels et inversement

Fertilisation soufrée et qualité technologique des blés et des farines

Au regard des expérimentations et des analyses technologiques des pâtes, les apports de soufre justifiés pour le rendement ont **peu d'effets directs marqués** sur la qualité des blés

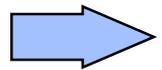
- ◆ La teneur en protéines n'est de manière générale pas influencée
- ◆ Le paramètre P/L peut être affecté mais non systématique (l'action du soufre peut conduire à des pâtes plus extensibles)
- ◆ La modification de l'équilibre des pâtes peut être un avantage ou un inconvénient selon le niveau intrinsèque de la variété de blé tendre cultivée => pas d'évolution des préconisations en fertilisation soufrée pour des aspects qualitatifs

VARIABILITÉ DE LA RÉPONSE AU SOUFRE DU BLE: EFFET DE LA PLUVIOMÉTRIE HIVERNALE

(Réseau expérimental soufre blé en terres de groies de Poitou-Charentes, ITCF et partenaires)

ANNÉE	PLUVIOMÉTRIE 1/10 - 31/03 (mm)	% D'ESSAIS AVEC RÉPONSE SOUFRE	NOMBRE ESSAIS
1985-86	401	37	32
1986-87	218	33	24
1987-88	600	59	22

CONSEIL DE FERTILISATION SOUFREE SUR CEREALES

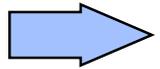


APPORT PREVENTIF

Entre mi tallage et Epi 1 cm

0 à 60 kg S₀₃/ha au sol selon grille de décision

Formes sulfate ou thiosulfate ou soufre micronisé



RATTRAPAGE (sur symptômes)

de 1 Noeud à 2 Noeuds

40 kg S₀₃/ha au sol

Si temps sec : pulvérisation de 30-40 kg S₀₃/ha

- Solution \leq 10 % sulfate d'ammoniaque
- Soufre élémentaire micronisé

Une grille d'évaluation du risque de carence sur les céréales à paille

Grille de préconisation d'apport de soufre (kg /ha de SO₃)
entre début et fin tallage, sur blé et orge d'hiver

En rouge avec apports réguliers de pro, en noir autres situations

	<i>pluviométrie 1/10 au 1/03</i>	précédent colza SO3	autres préc.
Risques élevés, sols superficiels filtrants: argilocalcaire superficiel; sol sableux; limon caillouteux à silex	<i>forte ou normale (>250)</i>	40 (20)	50 (30)
	<i>faible (<250)</i>	20 (0)	30 (0)
Risques moyens: argilocalcaire profond; limon battant froid hydromorphe	<i>forte (>400 mm)</i>	30 (0)	40 (0)
	<i>normale</i>	20 (0)	30 (0)
	<i>faible (<300)</i>	0 (0)	0 (0)
Risques faibles: sols profonds sains; limon argileux profond, limon franc	<i>forte (>400 mm)</i>	20 (0)	30 (0)
	<i>normale</i>	0 (0)	20 (0)
	<i>faible (<300)</i>	0 (0)	0 (0)

Grille adaptée à partir de:

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

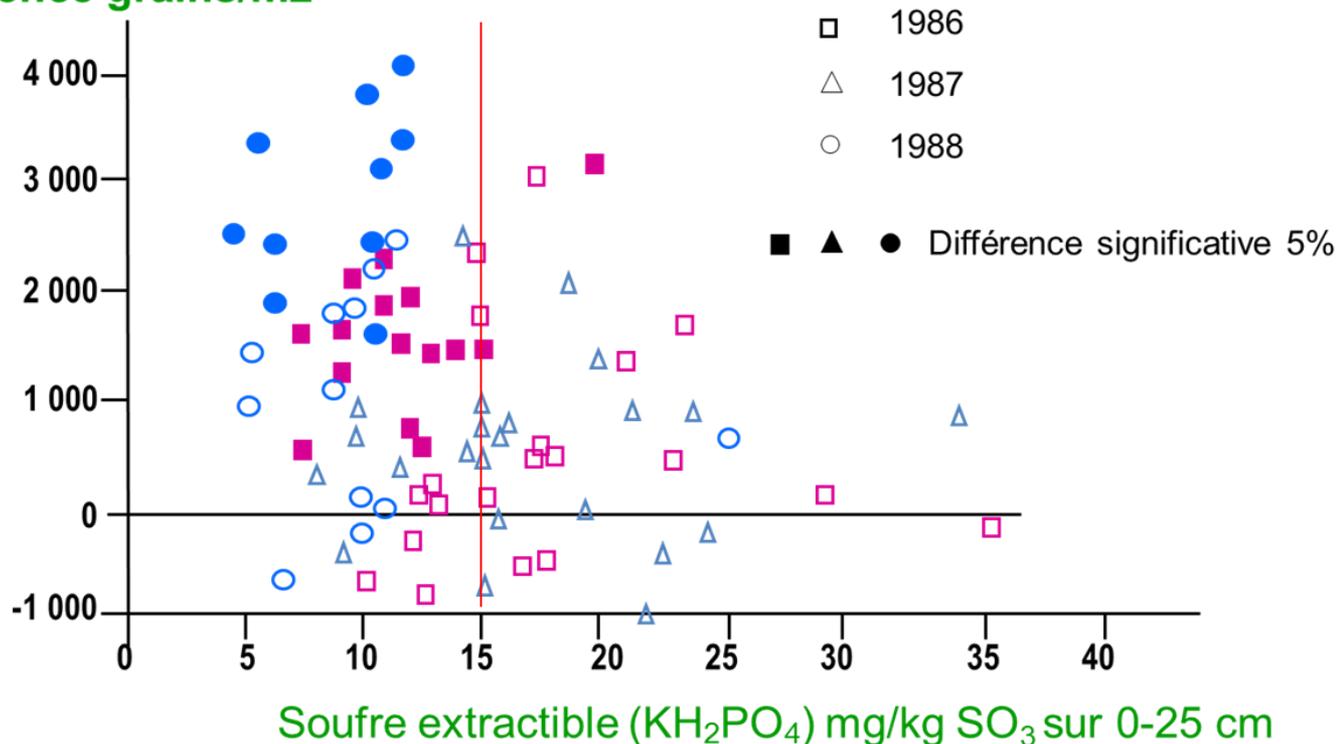
Les engrais soufrés

Engrais	Teneur SO ₃ (%)	Autres éléments	Marques	Remarques
Sulfate d'ammoniaque	59%	21% N	Granular3,	Granulé ou cristallisé
Sulfonitrate d'ammoniaque	32,5%	26% N	Basammon 26S	
Ammonitrate soufré	18%	24% N	Sulfan, Kemistar	Autres équilibres: 25+20; 30+7; 27+12; 31+5
Azotés soufrés	30-45%	20-30%N	Sulfammo	Mélange AS21+urée
Superphosphate simple	29%	18% P ₂ O ₅		
Sulfate de magnésium	40-50%	18-25% MgO	ESTA Kieserit, MAG25	Granulés
Sulfate de magnésium technique	33%	16% MgO	EPSO Top, Bittersalz	Cristallisé; pour foliaire, fertigation
Sulfate de potassium	50%	45% K ₂ O	KALISOP, SOP	Granulé
Polyhalite	48%	14% K ₂ O, 6% MgO 17% CaO	Polysulfate	Granulé
Thiosulfate d'ammonium	65%	12% N	Thio-Sul	Liquide; utilisation en mélange avec solution azotée
Engrais NPK+S	Formules diverses; composés granulés ou engrais de mélange.			

Prix agriculteur (janvier 2017) unité N (Ammo) 0.9 - 1€,
 unité P₂O₅ (TSP) 0.8 - 0.9 €,
 unité K₂O (KCl) 0.5 - 0.6 €
 unité de SO₃: 0.2 à 0.7 € selon type d'engrais soufré

Evaluation du dosage du soufre extractible selon la méthode Scott

Différence grains/m²



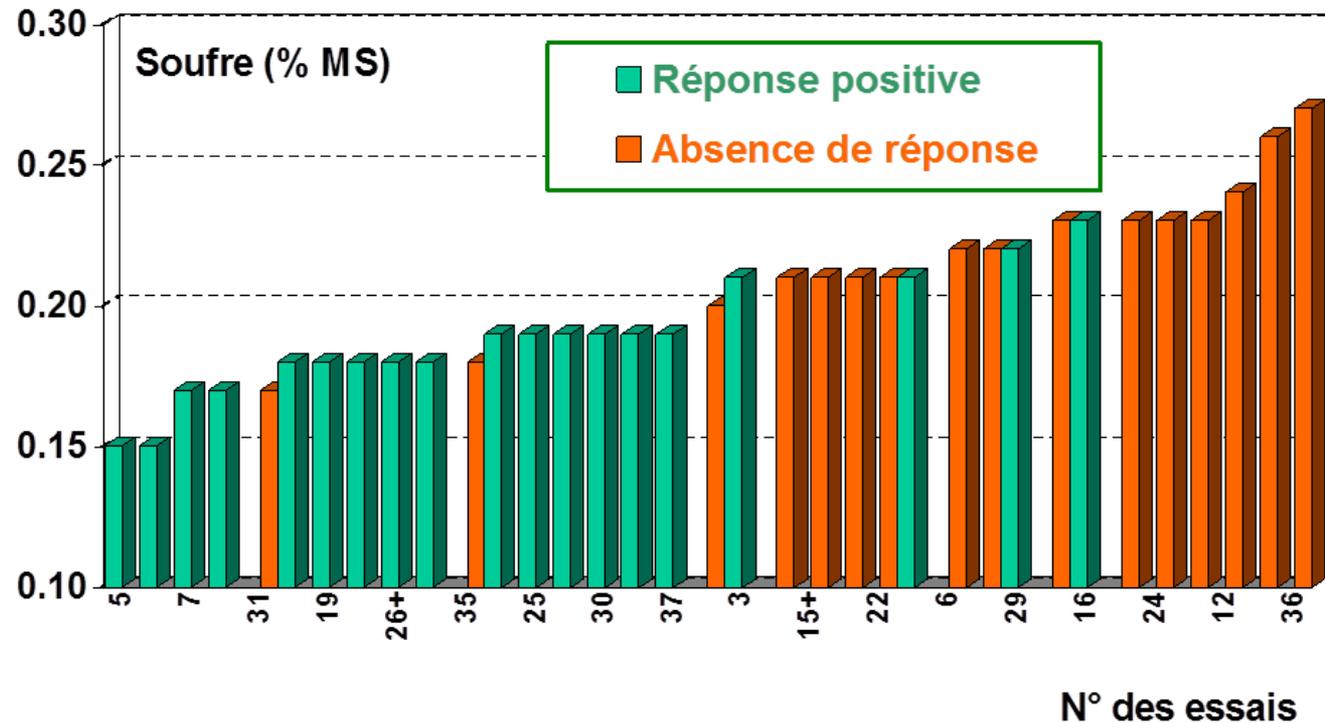
Bilan réalisé sur essais 1985-98

Plages de teneurs	SO ₃ Scott < 15 mg/kg	SO ₃ Scott ≥ 15 mg/kg
% essais avec réponse à S	48 % (131 essais)	22 % (49 essais)

Evaluation du diagnostic foliaire floraison

TENEUR EN SOUFRE DES 2^{ème} ET 3^{ème} FEUILLES SOUS EPI DANS
LES TEMOINS

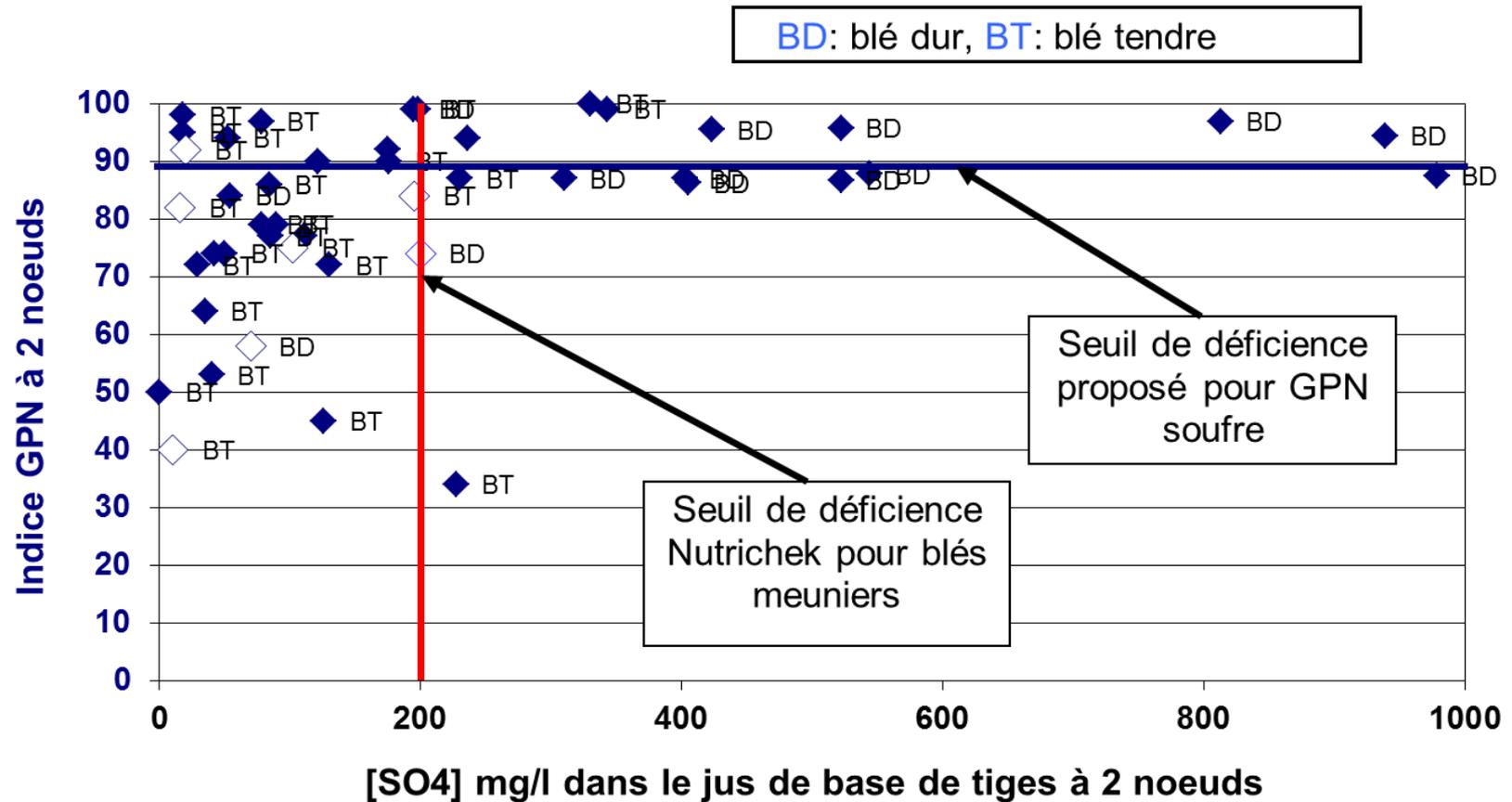
Réseau Poitou-Charentes 1986



Bilan réalisé en 1995 (Dugast, Comifer-Gemas 1995)

Plages de teneurs	% S < 0.20 % MS	0.20 ≤ %S ≤ 0.25 % MS	0.25 % MS < % S
% essais avec réponse à S	84 % (63 essais)	46 % (54 essais)	18 % (66 essais)

Réseau Soufre 2006 et 2007 : évaluation des indicateurs plantes

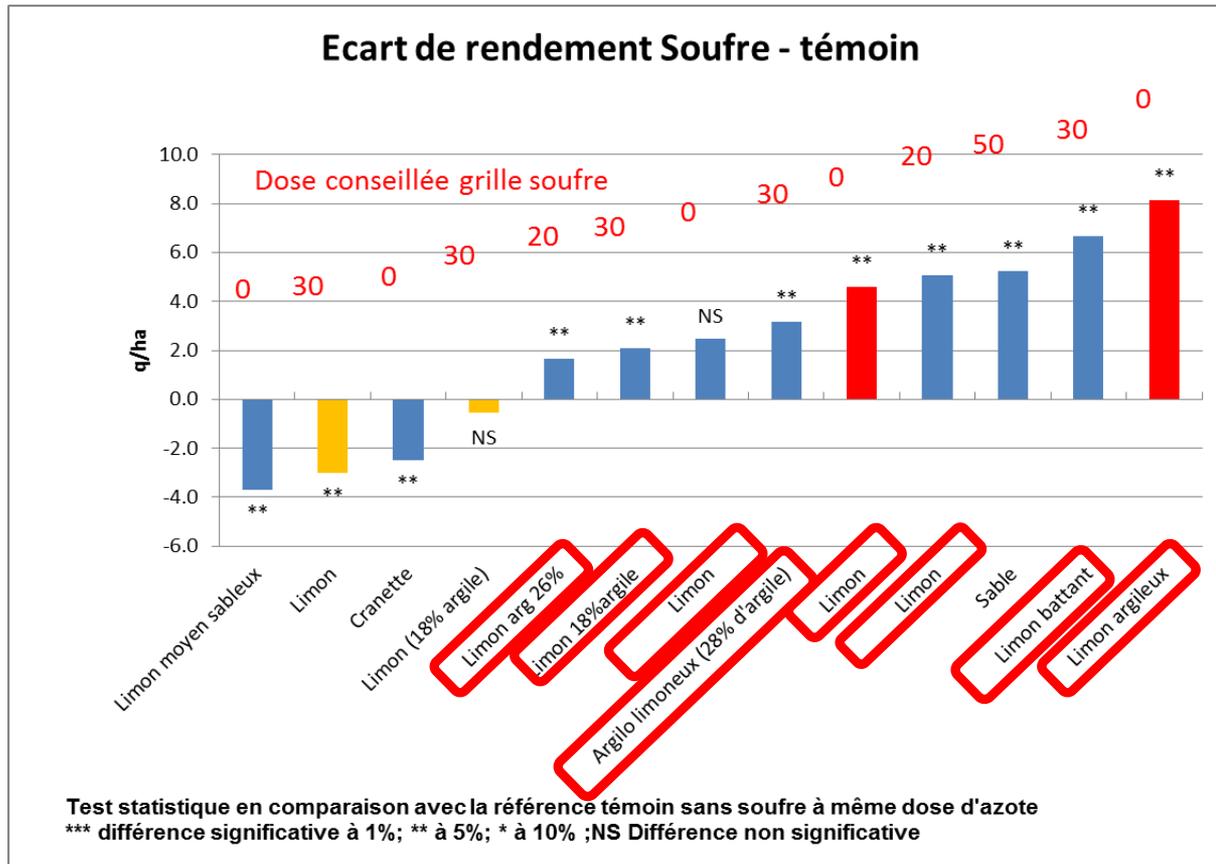


◇ Ecart de rendement > 5 q/ha ou Sign.

◆ Ecart de rendement < 5 q/ha ou NS

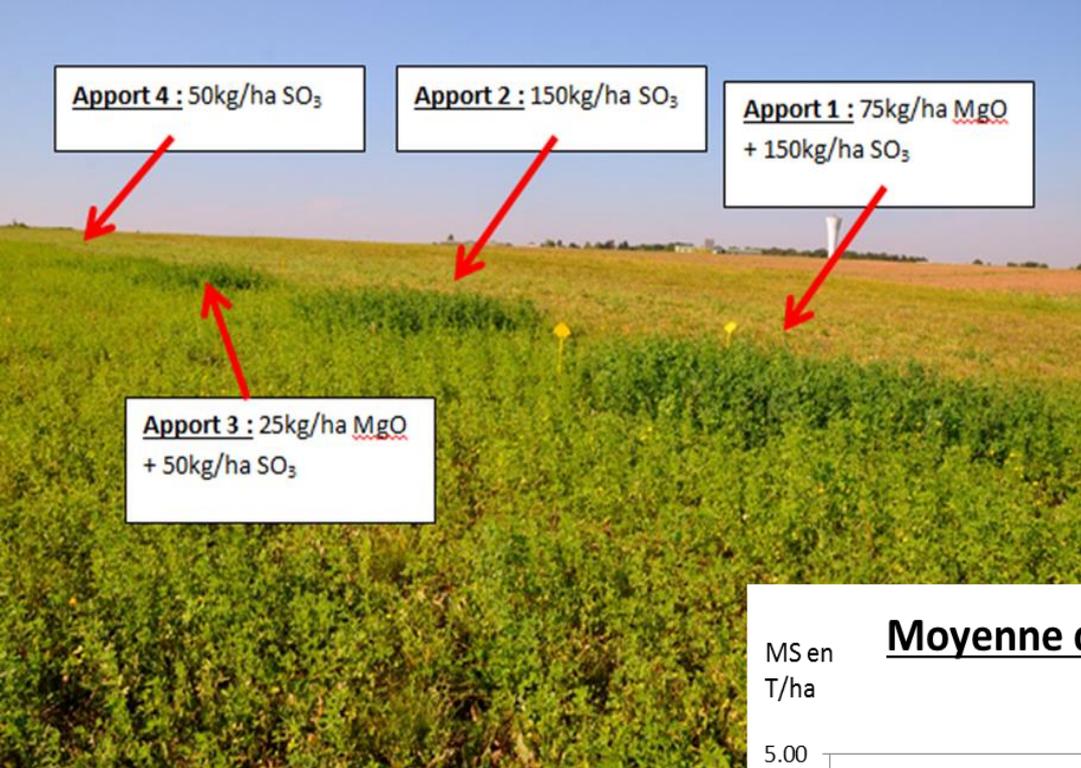
Une extension de la carence en soufre: réponse à la fertilisation soufrée en limons profonds du Nord de la France, depuis quelques années

Réseau d'essais 2012 à 2015 Nord-Picardie
Apport de 40 kg/ha SO₃ au tallage



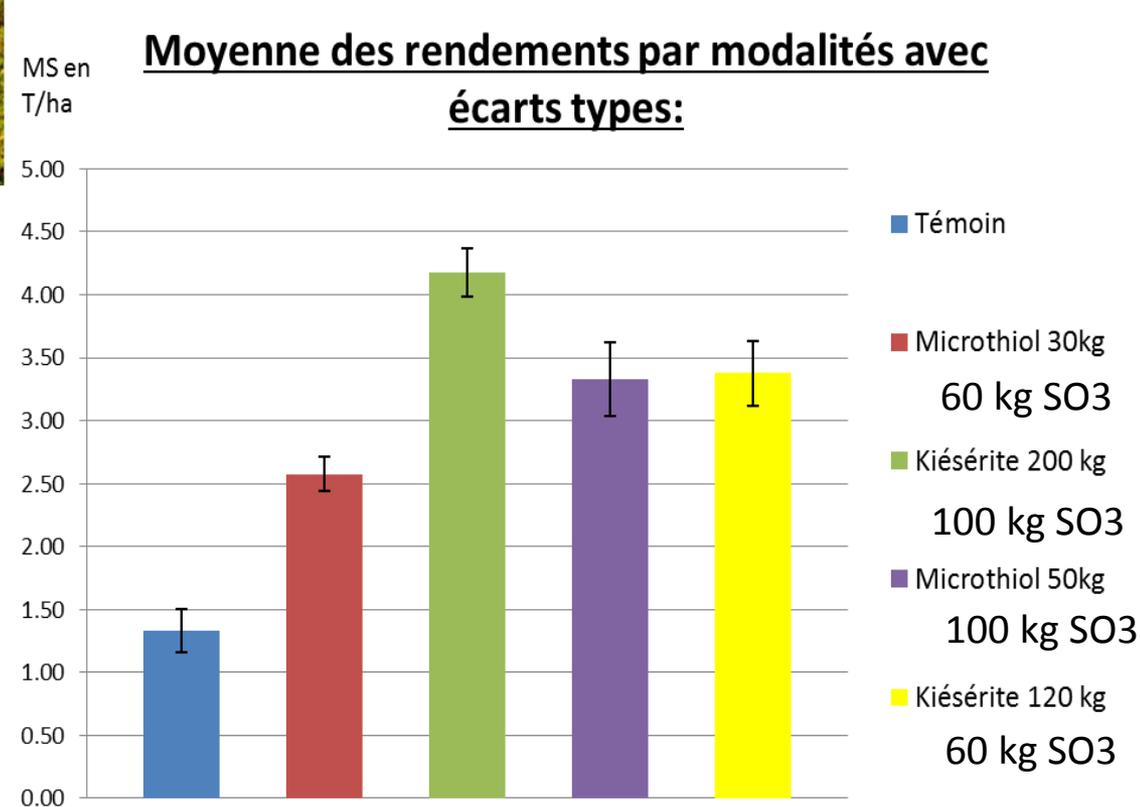
Bilan du soufre devient déficitaire en limons profonds avec les rendements élevés

- exportations de soufre élevées
- besoin en soufre élevé



Risque de carence en soufre sur les légumineuses des systèmes bio en grande culture

Essai soufre sur la luzerne du système « bio » de Boigneville en 2014 (ARVALIS)



Conclusions

- Besoin d'améliorer la qualité du conseil de fertilisation soufrée: apport systématique non satisfaisant
- Performances variables des indicateurs étudiés
 - DF floraison performant mais diagnostic à postériori.
 - Indicateurs plante tallage-montaison moins performants : JBT > Malate > GPN.
 - Scott: performance moyenne mais situations carencées discriminées
- Grille d'estimation du risque à améliorer et à faire évoluer vers une approche de type bilan d'azote (cf thèse Hamid NIKNAHAD-GHARMAKHER, 2008)



MERCI DE VOTRE ATTENTION