



# Soufre et fertilisation des cultures



**Olivier Goujard**

Animateur du groupe Soufre du **comifer**





# Les différentes formes d'apport de Soufre, intérêts agronomiques

## Plan de la présentation



### Le soufre dans le sol

- Le cycle du soufre
- La forme sulfate
- Approche bilancielle du soufre en France



### Le soufre dans les plantes

- Rôle et fonctions
- Besoins des cultures
- Carences en soufre



### La fertilisation soufrée

- Réponse des cultures
- Effets sur la qualité des récoltes
- Les indicateurs de la nutrition soufrée des cultures
- Les préconisations
- Les différents engrais soufrés

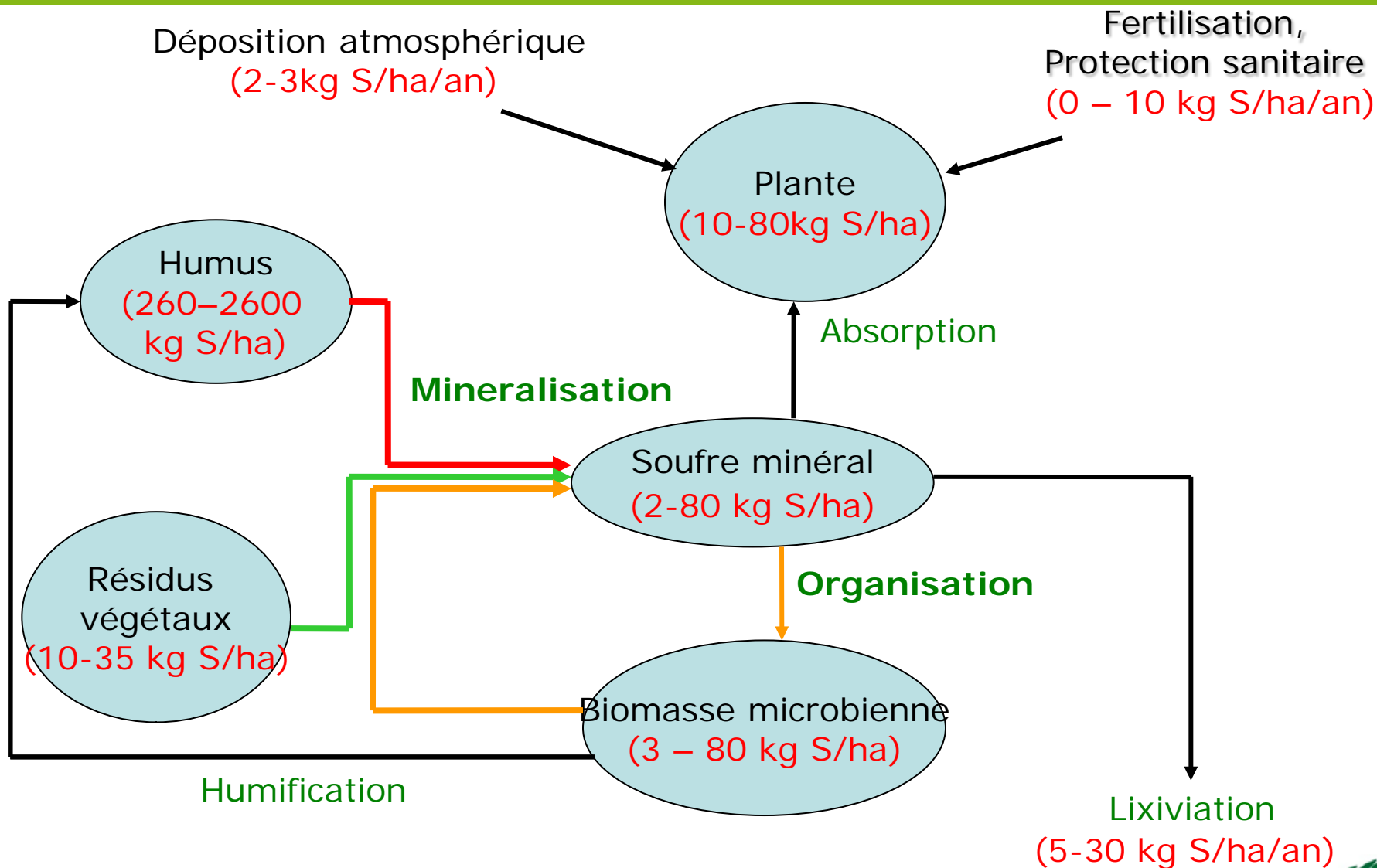


# Le soufre dans le sol

- La teneur en S des sols ~ 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 ( $\text{H}_2\text{S}$  ou  $\text{S}^{2-}$ , -II)
      - ✓ Soufre élémentaire (S, 0)
      - ✓ Thiosulfate ( $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ , +II)
      - ✓ Sulfite ( $\text{H}_2\text{SO}_3$  ou  $\text{SO}_3^{2-}$ , +IV)
      - ✓ Sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ , +VI)
- Cycle du S similaire à celui de l'N:
  - minéralisation - organisation



# Le cycle du soufre dans le sol





# Le soufre dans le sol

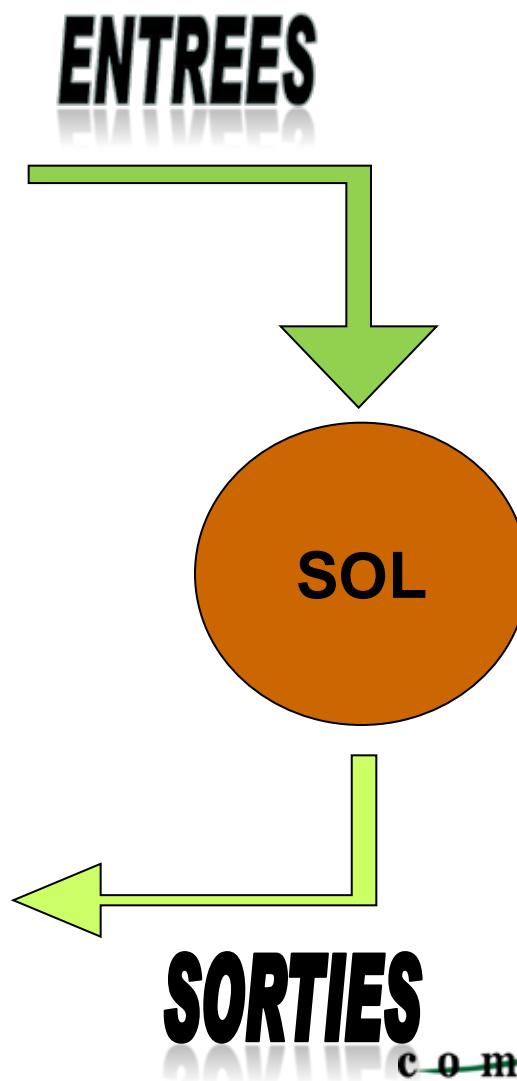
- La forme sulfate  $\text{SO}_4^{2-}$  est la forme clé pour la nutrition des plantes
  - Absorbée par les racines
  - Produit final de la minéralisation
  - Peut être adsorbé par des oxydes (Fe, Al) ou la matière organique
  - Très mobile et facilement lessivable dans le sol (idem  $\text{NO}_3^-$ )
  - 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  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ : )
  - Pratiquée par quelques laboratoires.
  - Références sur teneurs seuils de réponse (Arvalis)



# Bilan du soufre en France

- Apport par les fertilisants minéraux
- Apport comme fongicide
- Apport par les déjections animales
- Retombées atmosphériques
- *Résidus des IAA et boues d'épuration*
- *Apport par les eaux d'irrigation*

- Exportations par les cultures
- Pertes par lixiviation





# Apports de Soufre fongicide

- Anti oïdium (**vigne**, arboriculture fruitière, cultures légumières et horticoles, blé) ~1.5 M ha
- Utilisation en poudrage ou en pulvérisation (S micronisé)
- Marché qui a fortement chuté: environ 20 000 t (source Syngenta)

TOTAL fongicides ~ 50 000 t SO<sub>3</sub> par an



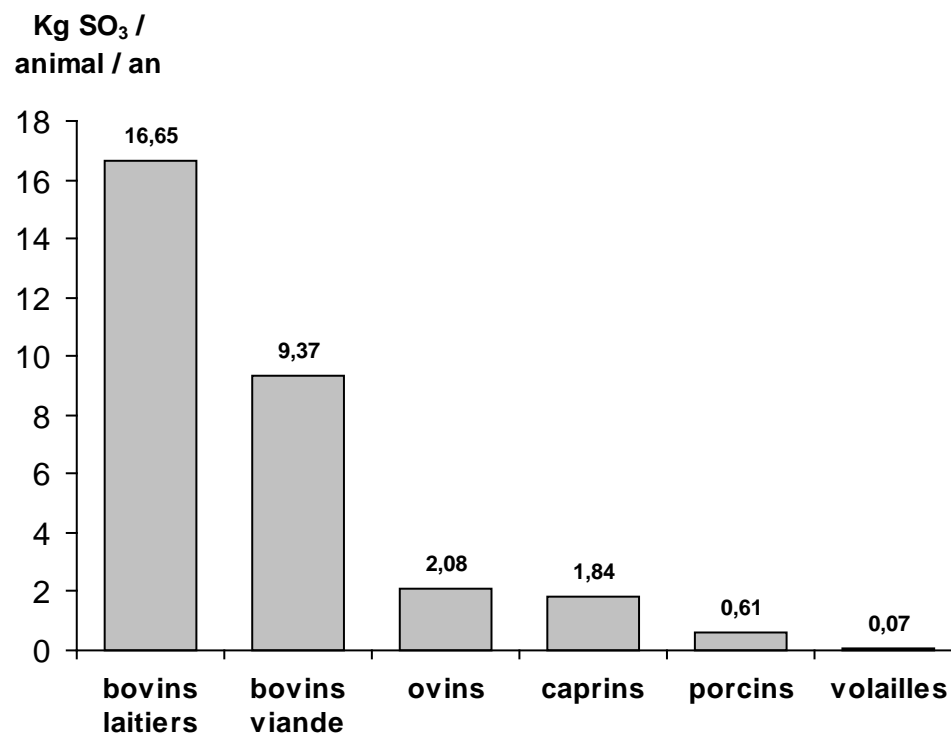
# Apports de S par les déjections animales

**280 millions de tonnes** de déjection animales sont produites par l'agriculture française annuellement;

**3 à 4 millions d'ha** concernés par des épandages

Fumiers, lisier:  
**0,10 à 0,15%  $\text{SO}_3$  / produit brut**

Quantité de soufre présent dans les déjections animales d'après J.ERIKSEN



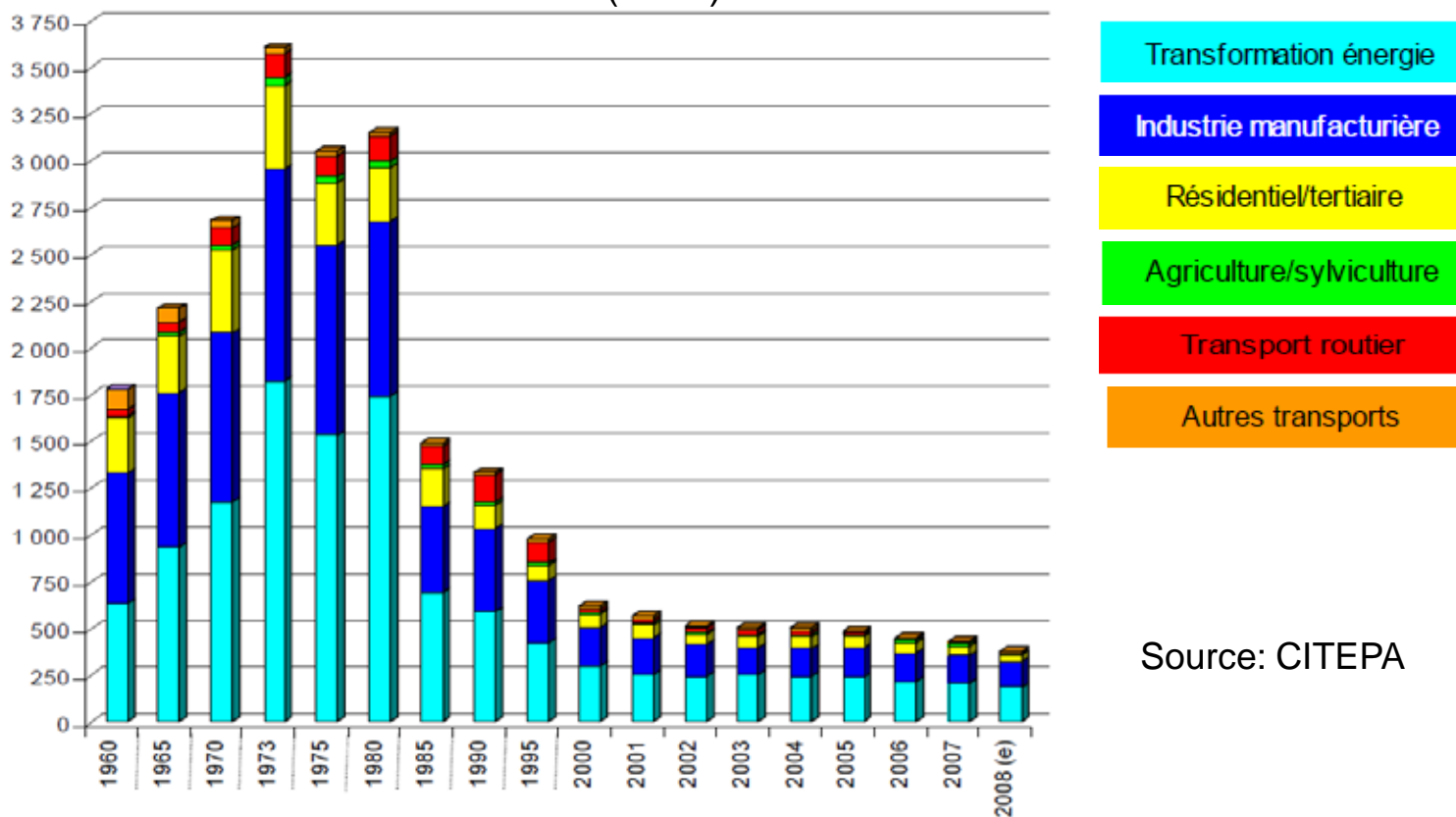
TOTAL déjections animales ~ 330 000 t  $\text{SO}_3$  par an mais sur 15% de la SAU





# Apports de S par retombées atmosphériques

Émissions atmosphériques en SO<sub>2</sub> par secteur en France métropolitaine  
(en kt)

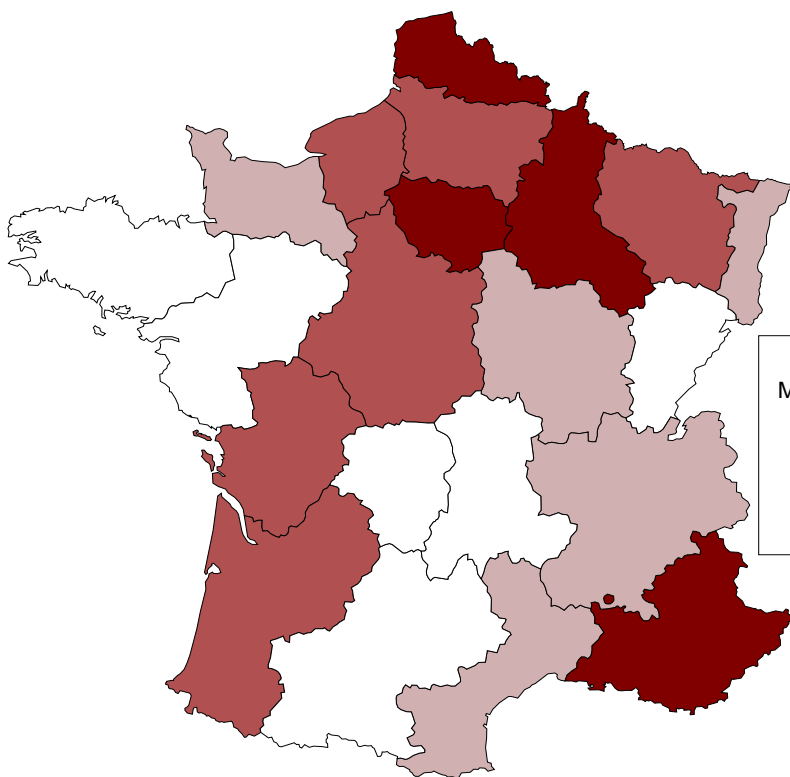


435 kt de SO<sub>2</sub> émis en 2007 (eq à 544 kt SO<sub>3</sub>) soit environ 10 kg SO<sub>3</sub>/ha



# Apports de soufre par les fertilisants N-P-K-Mg

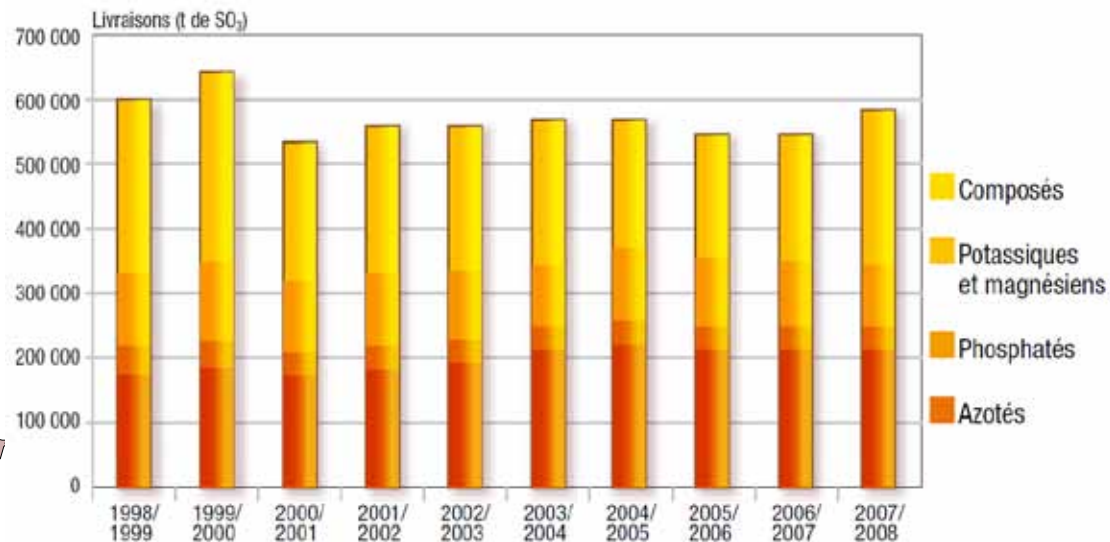
Livraisons de soufre par les engrais  
Campagne 2007-2008



Quantité de SO<sub>3</sub> en kg/ha  
Moyenne nationale : 22,1 kg/ha

- 33,5 à 42,8 (4)
- 21,7 à 33,5 (6)
- 15,1 à 21,7 (5)
- 2,5 à 15,1 (7)

Apports de soufre par les fertilisants N-P-K



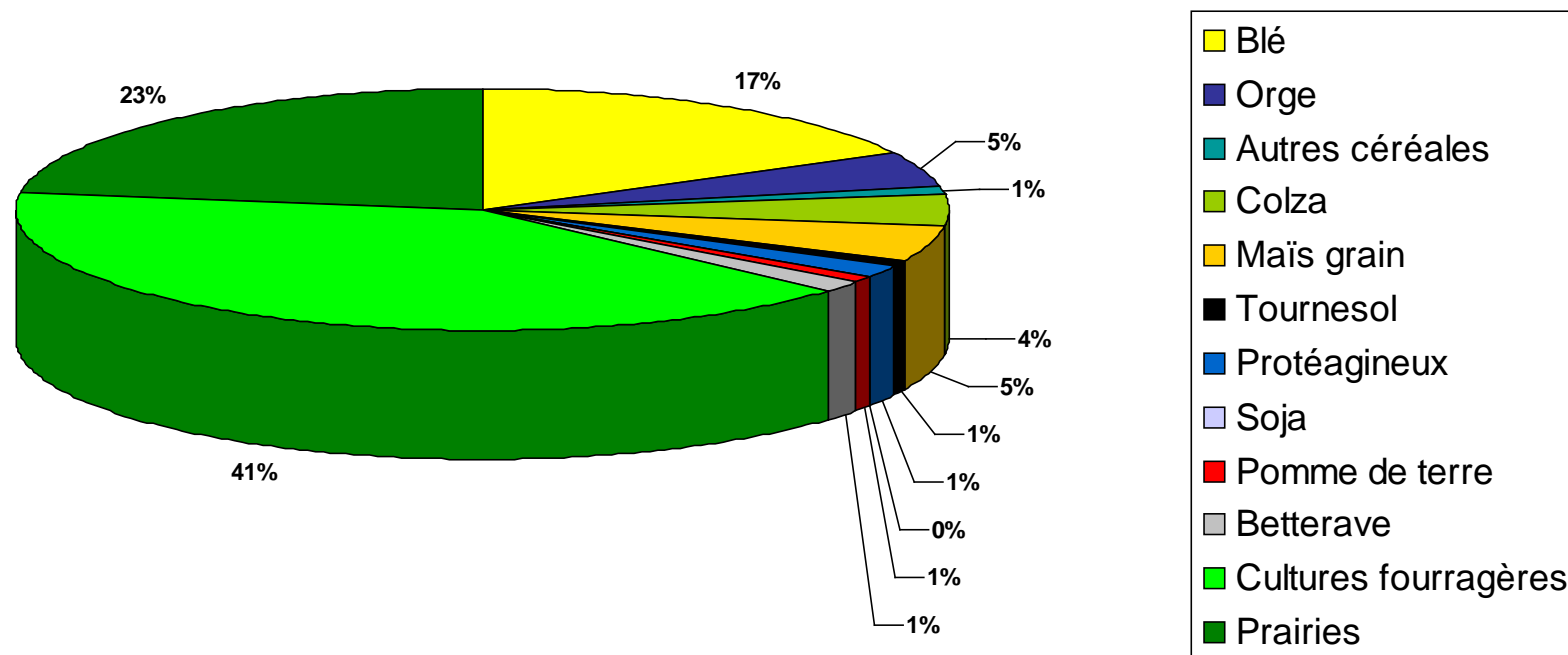
Source: UNIFA

TOTAL engrais minéraux: 573 000 tonnes SO<sub>3</sub>  
Soit ~22 kg SO<sub>3</sub>/ha



# Exportations par les cultures

## Exportations de SO<sub>3</sub> par les productions végétales



Source: données SCEES, INRA, LDAR Laon, estimations

TOTAL Gdes cultures+cultures fourragères+STH ~ 742 000 t SO<sub>3</sub>



# Pertes par lixiviation

Apports et pertes annuelles en S mesurés dans divers lysimètres en France (d'après Muller et Ballif, 1991)

Lieu et période	Type de sol	Précipitations mm	Apports par les engrais kg SO <sub>3</sub> / ha / an	Pertes par drainage kg SO <sub>3</sub> / ha / an
Quimper 1954-1965	Granitique	1090	?	50
Versailles * 1973-88	Limoneux	660	40*	75
Clermont-Ferrand 1959-1966	Argilo-calcaire	570	190	193
Châlons-sur- Marne 1977-1982	Rendzine	630	338	340
Le Magneraud 1986-2004 **	Terres de groie	650	30	50

\*sans apport de soufre depuis 1978

\*\* données Arvalis

Lixiviation très variable selon:  
les types de sol, la pluviométrie et les apports de soufre



# Bilan du soufre en France

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

- Apport par les fertilisants minéraux ~22 kg SO<sub>3</sub>/ha
- Apport par les fongicides ~2 kg SO<sub>3</sub>/ha  
(~33 kg SO<sub>3</sub>/ha épandu)
- Apport par les déjections animales ~12 kg SO<sub>3</sub>/ha  
(~80 kg SO<sub>3</sub>/ha épandu)
- Retombées atmosphériques ~10 kg SO<sub>3</sub>/ha
- Exportations par les cultures ~28 kg SO<sub>3</sub>/ha
- Lixiviation (~50 kg SO<sub>3</sub>/ha ?)

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



# Le soufre dans les plantes

- Essentiel à la synthèse des protéines (avec N)
- Constituant indispensable des acides aminés essentiels soufrés: cystéine, cystine et méthionine
- Coenzyme, il est nécessaires à la formation des chloroplastes, donc indispensable à la photosynthèse
- Intervient dans la synthèse des acides gras (lipides) et d'enzymes vitales et de quelques vitamines (vitamine B1...)
- Absorption par la plante: compétition  $\text{SO}_4^{2-}$  /  $\text{NO}_3^-$ 
  - importance du rapport N/S à fertilisation N avec S



# Besoins des cultures en soufre

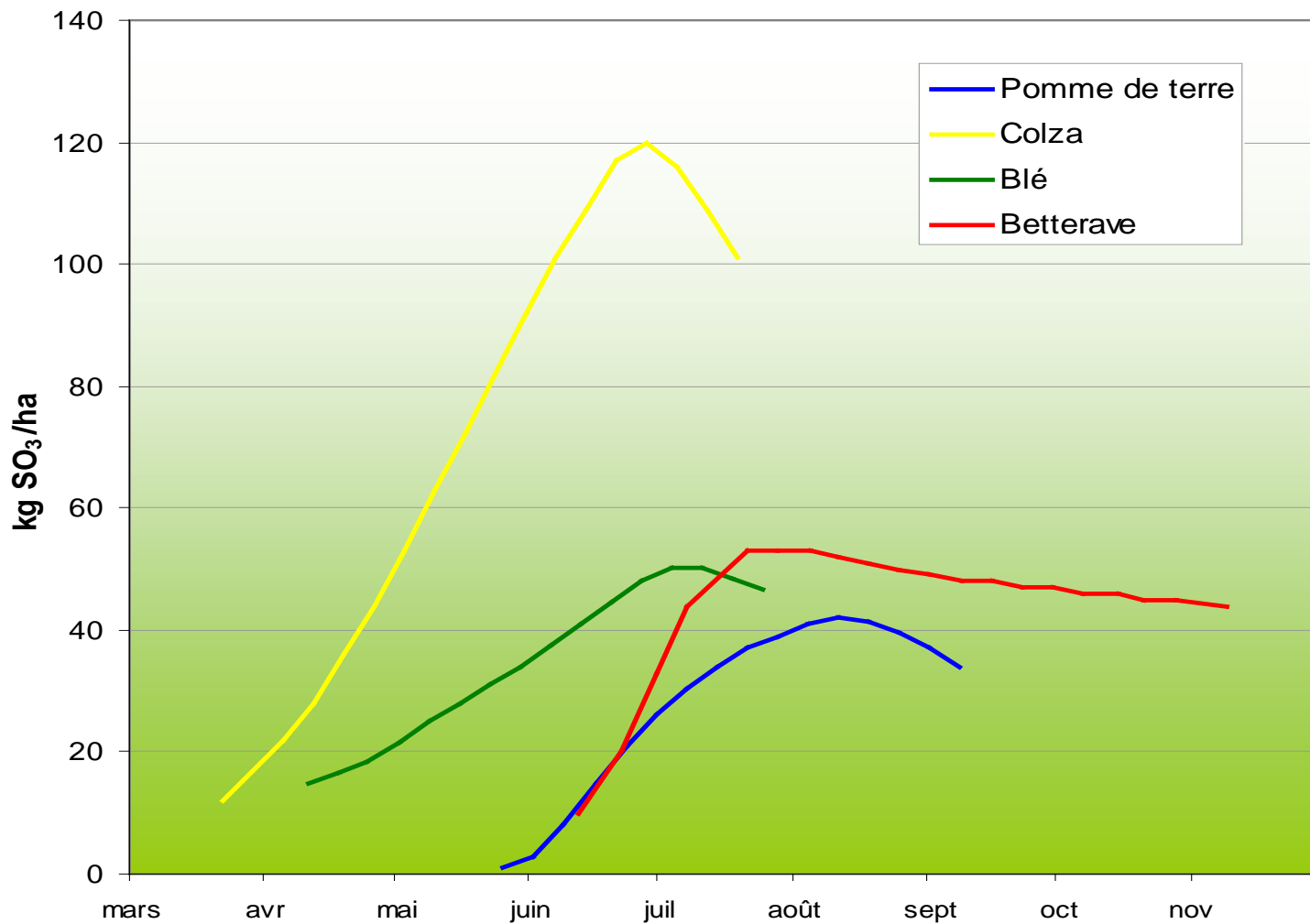
Exigence	Cultures	Besoins en kg SO <sub>3</sub> / ha
Forte	Colza, choux, moutarde, ail, oignon, luzerne, trèfle, graminées fourragères	200 à 100
Moyenne	Céréales à paille, maïs, pomme de terre, betterave sucrière et fourragères	100 à 50
Faible	Toutes les autres	50 à 20



# Mobilisations en soufre des cultures

## Mobilisation en soufre de différentes cultures

source: SADEF Pôle d'Aspach







# Symptômes de carence en soufre

Le soufre est très peu mobile dans la plante:  
à **les carences apparaissent d'abord sur les  
feuilles les plus jeunes.**

Symptômes: jaunissement général de la feuille  
(carence facilement confondue avec celle en N)





# Réponse des cultures à la fertilisation soufrée

- Grandes cultures répondant bien à la fertilisation soufrée:
  - Colza et céréales à paille
- De nombreux essais en France (ARVALIS, CETIOM) et synthétisés au niveau européen (cf « Crop responses to sulphur fertilization in Europe » F.J.Zhao et al. IFS proceedings 504, 2002) ont permis de définir :
  - La dose d'apport optimale
  - La période d'application optimale
  - Le rapport optimal entre fumure azotée et soufrée
- Autres cultures présentant une certaine sensibilité à la nutrition soufrée:
  - betterave sucrière
  - cultures légumineuses
  - pomme de terre
  - légumes de plein champ (brassicacées, liliacées)



# Réponse des cultures à la fertilisation soufrée

Essai sur colza (BASF)

Azote seul



Azote + soufre

- Blé tendre d'hiver:
  - 3 dt/ha en moyenne et jusqu'à 20 dt/ha (source Arvalis)
- Colza:
  - 10 à 20 dt/ha (source Cetiom)





# Influence de la fertilisation soufrée sur la qualité

- L'effet sur la qualité de l'apport de S et la synergie N/S ont été principalement étudiés sur blé tendre
  - Ø « *Assimilation par le blé tendre du soufre et de l'azote apporté en foliaire et influence de l'interaction N/S sur les protéines du grain et la qualité panifiable* » (thèse de doctorat de Illa TEA / Grande Paroisse).
  - Ø Résultats: impacts de la synergie N/S
    - influe significativement sur les teneurs en N et S des grains et sur les coefficients réels d'utilisation du soufre sans effet sur le rendement.
    - augmente significativement la teneur en protéine du grain ainsi que les paramètres W (force), G (gonflement) et L (extensibilité).
    - influe sur la nature et la proportion des protéines: favorise la gliadine (riche en S) et la gluténine (pauvre en S).



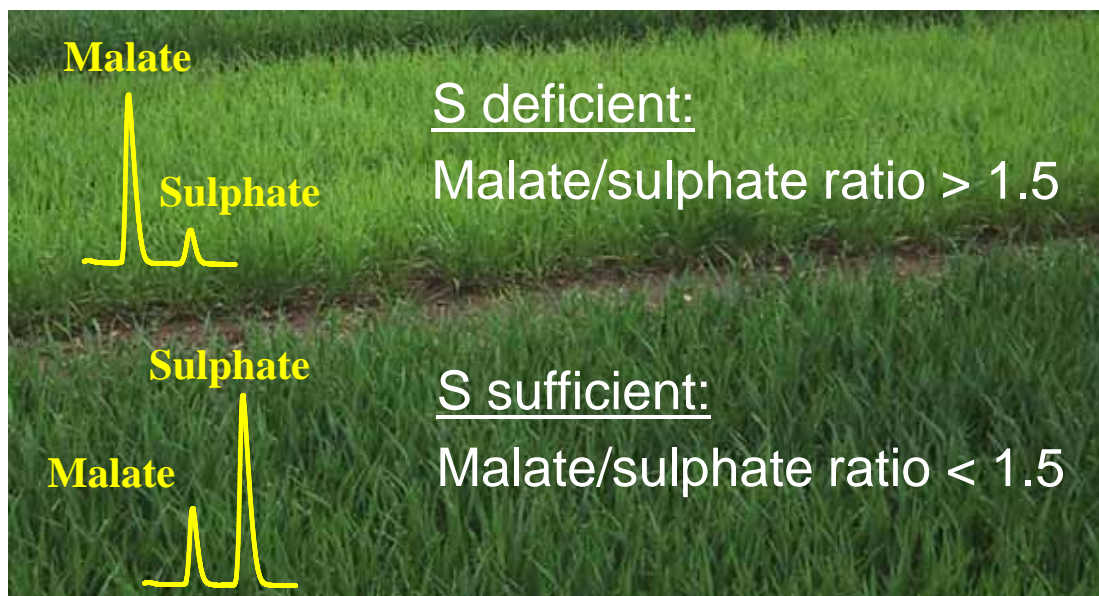
# Les indicateurs de la nutrition soufrée des cultures

- Indicateurs de nutrition soufrée des cultures:
  - Test Malate/Sulfate BLAKE-KALF
  - Teneur  $\text{SO}_4$  dans le jus de base des tiges NUTRICHECK
  - Diagnostic foliaire à la floraison
  - Teneur en soufre des grains
- Indicateurs récemment/en cours de mise au point:
  - Réflectométrie GPN<sup>®</sup> Pilot
  - Fluorimétrie SADEF



# Le diagnostic malate/sulfate BLAKE-KALFF

- Mis au point en Angleterre en 2000 par Mme M.Blake-Kalff (Hill Court Farm Research) sur colza et céréales
- Basé sur le ratio malate/sulfate dans les vacuoles
- Applicable sur une large plage de stades (précoces)
- Ne nécessite qu'une seule mesure
- Coût du test en Angleterre: 15 £ (~14 €)





- Méthode Soufre développée par la société Challenge Agriculture en 2000
- Repose sur la teneur en sulfate dans le jus de base de tiges (JBT) des blés au stade 2 nœuds
- Pour une bonne interprétation, le stade préconisé doit être respecté





# Diagnostic foliaire floraison

- Teneur en S % de la MS dans les feuilles 2 et 3 à la floraison sur un échantillon de 30 plantes
- Indicateur référencé sur essais soufre depuis 1986, considéré comme le plus discriminant à indicateur de référence
- Seuil de 0.20 %, risque de carence probable
- Mesure trop tardive pour correction



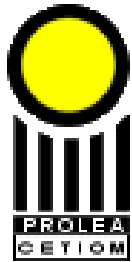


# Les indicateurs de la nutrition soufrée des cultures

- Evaluation comparée sur 61 essais (2006/2007) de 3 indicateurs de nutrition soufrée par ARVALIS au stade 2 nœuds des céréales:  
(*Perspectives Agricoles N 353 fev09*)
  - Test malate/sulfate
  - Teneur en sulfate du jus de base des tiges
  - GPN® Pilot soufre
- Conclusions:
  - Peu d'essais avec des écarts de rendement > 5q/ha
  - Les 3 indicateurs ont donné satisfaction en détectant les carences mais les seuils doivent être adaptés
  - Les outils se sont montrés complémentaires de la grille de décision Arvalis



# Les préconisations de fertilisation soufrée



## CETIOM / Colza

- Apport systématique de **75 kg SO<sub>3</sub>/ha**,
- Positionné en sortie d'hiver (début élongation des tiges)
- La forme de l'engrais importe peu (pas de forme S élémentaire)
- Préconisation bien suivie par les agriculteurs
  - 70% des surfaces colza ont reçu un apport de soufre avec une dose moyenne de 73 kg SO<sub>3</sub>/ha selon l'enquête CETIOM 2008





# Les préconisations de fertilisation soufrée

**ARVALIS**  
Institut du végétal

## / céréales

Ø Une **grille de préconisation** des doses sur céréales a été publiée dans le « Perspectives Agricoles » N 330 de janvier 2007

### Grille de décision d'un apport de soufre sur céréales d'hiver et de printemps (cas des situations sans apports réguliers de fumier) (tab. 1)

	Pluie 1/10 au 1/03	Apport (kg SO <sub>3</sub> /ha) à réaliser :	
		si apport sur le précédent > 60 kg SO <sub>3</sub> /ha	si précédent sans apport de soufre
<b>Risques élevés : sols superficiels filtrants :</b> sols argilo-calcaires superficiels, sols sableux caillouteux, limons caillouteux superficiels	> 300 mm	40	50
	< 300 mm	20	30
<b>Risques moyens :</b> sols argilo-calcaires moyennement profonds, limons battants froids humides	> 500 mm	30	40
	300 à 500 mm	20	30
	< 300 mm	0	20
<b>Risques faibles :</b> sols profonds sains, limons argileux profonds, limons francs, sols argileux	> 500 mm	20	30
	300 à 500 mm	0	20
	< 300 mm	0	0



# Les engrais soufrés

Formes de S disponibles sur le marché:

- Sulfate
  - La forme la plus utilisée dans les engrais
  - Associé à un ou plusieurs autres éléments : N, P, K, Mg
  - Forme directement assimilable par la plante.
- Thiosulfate
  - Transformation relativement rapide en sulfate
  - Forme liquide associée à N, K
- S élémentaire (micronisé)
  - Oxydation en sulfate par les micro-organismes du sol plus longue
  - Effet acidifiant sur le sol
  - Utilisé essentiellement comme fongicide



# Les engrais soufrés

- Déjà un large choix en engrais simples:
  - Sulfate d'ammoniaque: 21%N + **59% SO<sub>3</sub>**
  - Sulfonitrate d'ammoniaque 26%N + **32.5% SO<sub>3</sub>**
  - Solution azotée soufrée : 20.5%N + **13.5% SO<sub>3</sub>**
  - Ammonitrates soufrés : 26+**13**; 25+**20**; 24+**15**; 30+**7**...
  - Azotés soufrés (urée+AS21) 20-30%N + **30-45% SO<sub>3</sub>**
  - Superphosphates SSP 18% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> + **29% SO<sub>3</sub>**
  - Sulfate de magnésium (Kiesérite) 25% MgO + **50% SO<sub>3</sub>**
  - Sulfate de potassium 50% K<sub>2</sub>O + **45% SO<sub>3</sub>**
- Les engrais composés: de nombreuses formules...



- Le soufre est indispensable à la synthèse des protéines :
  - **Les plantes ont besoin de soufre**
- Les sols reçoivent moins de soufre qu'il y a 25 ans :
  - Engrais minéraux plus concentrés en N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et K<sub>2</sub>O avec moins de SO<sub>3</sub>
  - Apports de lisiers et fumiers concentrés dans les régions d'élevage
  - Très forte réduction des émissions et dépositions de SO<sub>2</sub> atmosphérique
- Les indicateurs de nutrition soufrée permettent essentiellement d'évaluer les risques pour les années suivantes et de décider **d'apports de soufre dès la sortie d'hiver.**
- Il y a encore des marges de progrès sur le pilotage conjoint de la fertilisation azotée et soufrée en cours des cycles de culture.



Merci pour votre attention

