

Académie d'Agriculture de France

Le Soufre dans le Sol
et
Rôles dans la Physiologie de la Plante

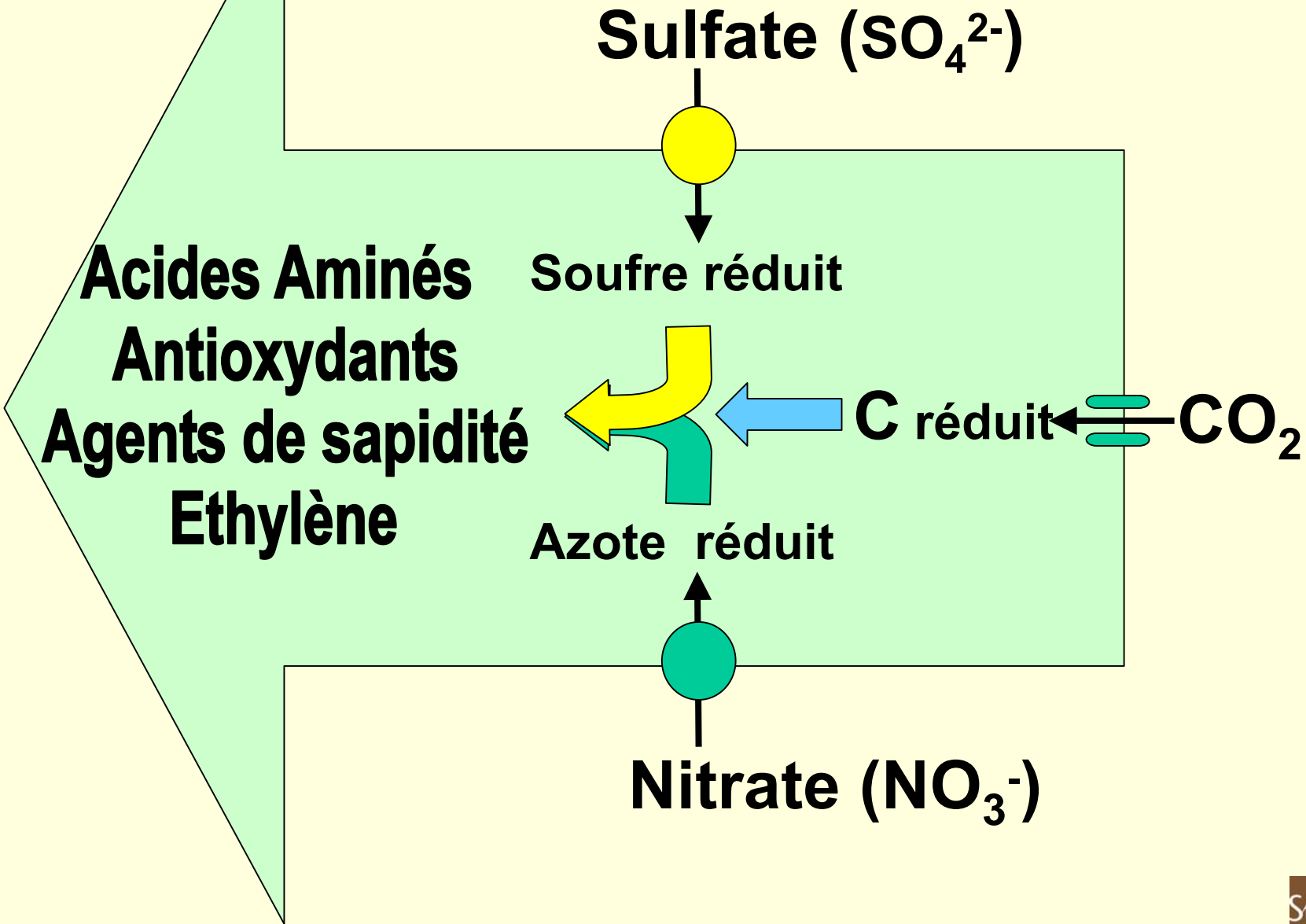
Jean-Claude Davidian

Centre International d'Etudes Supérieures
en Sciences Agronomiques



Paris 13 juin 2007

La signature du monde végétal



Abondances relatives du Soufre et des éléments majeurs dans les sols

<u>Éléments</u>	<u>Formes absorbées</u>	<u>Sources majeures</u>	<u>Abondance (%)</u>
N	NO_3^-	M.Org, N_2	0,03 – 0,3
P	H_2PO_4^- HPO_4^{2-}	Ca-, Al-, Fe-Phosphate	0,01 – 0,1
Soufre	SO_4^{2-}	M.Org, Fe/S, Fe/SO₄	0,01– 0,1
K	K^+	Mica, Illite, Feldspath	0,2 – 3,0
Ca	Ca^{2+}	CaCO_3 , CaSO_4 , ...	0,2 – 1,5
Mg	Mg^{2+}	MgCO_3 , ...	0,1 – 1,0
Fe	$\text{Fe}^{2+/3+}$	Oxyde/Hydroxyde Fe, ...	0,5 – 4,0

Le Soufre :

- a joué un rôle initial essentiel pour l'origine de la vie
 - en Anaérobiose, rôle du Sulfure de Fer (FeS -II)
 - en Aérobiose, passage à l'état de Sulfate (SO_4^{2-} +VI)
 - S existe aussi sous d'autres états Rédox
 - *environnements volcaniques / anaérobiose / métabolites*

- L'utilisation Réductrice du SO_4^{2-} est dite **Assimilatrice**
 - si elle conduit à la synthèse de **Cystéine / Méthionine / C. Org**
Chez les Plantes et de nombreux Micro-organismes (aérobie)

- L'utilisation Réductrice du SO_4^{2-} est dite **Dissimilatrice**
 - si elle conduit à la formation de Sulfure (S^{2-}) = déchéât
Chez certaines Bactéries Anaérobiques

« Analogie avec l'utilisation de O_2 et émission de CO_2 »

Etat de Valence du Soufre (inorganique)

		<u>Valences</u>	
Sulfate	SO_4^{2-}	+VI	(+6)
Sulfite	SO_3^{2-}	+IV	(+4)
Oxyde de Soufre	SO	+II	(+2)
Soufre élémentaire	S°	0	(0)
Sulfure d'hydrogène	H_2S	-II	(-2)

→ Les propriétés chimiques du **Soufre** lui confère la capacité d'entrer dans des réactions d'Oxydo-Réduction

Nitrate	NO_3^-	+V	(+5)
Nitrite	NO_2^-	+III	(+3)
Ammonium	NH_4^+	-III	(-3)

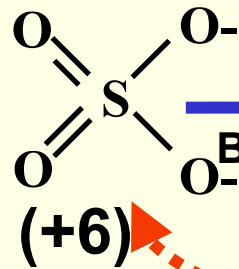
Cycle bio-géochimique du soufre

Bactéries sulfo-oxydatrices chimiolithotrophes
Thiobacillus, Sulfolobus (agents de corrosion)
Oxydation dissimilatrice

Sulfolipides
Protéines
Polysaccharides -S

Cystéine
Méthionine
R-SH

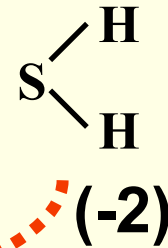
Sulfatation



Dégradation
Assimilation

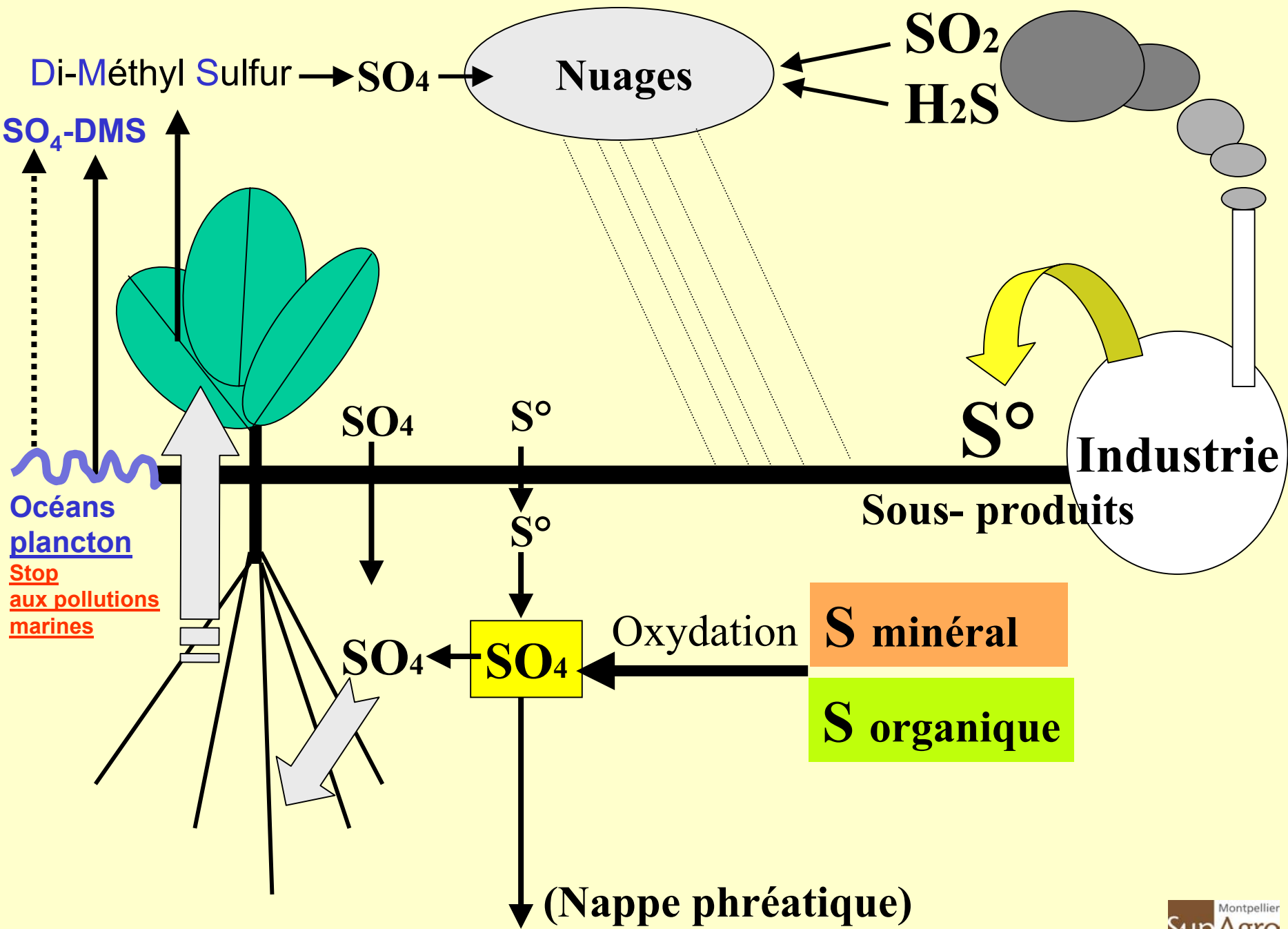
Réduction dissimilatrice

Bactéries sulforéductrices chimiolithotrophes
Desulfovibrio desulfuricans



Photosynthèse

Bactéries sulfo-oxydatrices photolithotrophes
Desulfovibrio, Desulfomaculatum



Compositions élémentaires (%) : comparaison Plante (Pl*) / Animal (An**)

	O	C	H	N	Si	K	Ca	P	Mg	S	Cl	Al	Fe	Mn	Na
Pl*	44.4	44	6.2	1.5	1.2	0.9	0.3	0.2	0.18	0.18	0.14	0.11	0.08	0.04	/
An**	14.6	56	7.5	9.3	0.005	1.1	4.7	3.1	0.16	0.78	0.47	/	0.012	/	0.47

d'après Epstein E. (1973), Mineral Nutrition of Plants, J. Willey

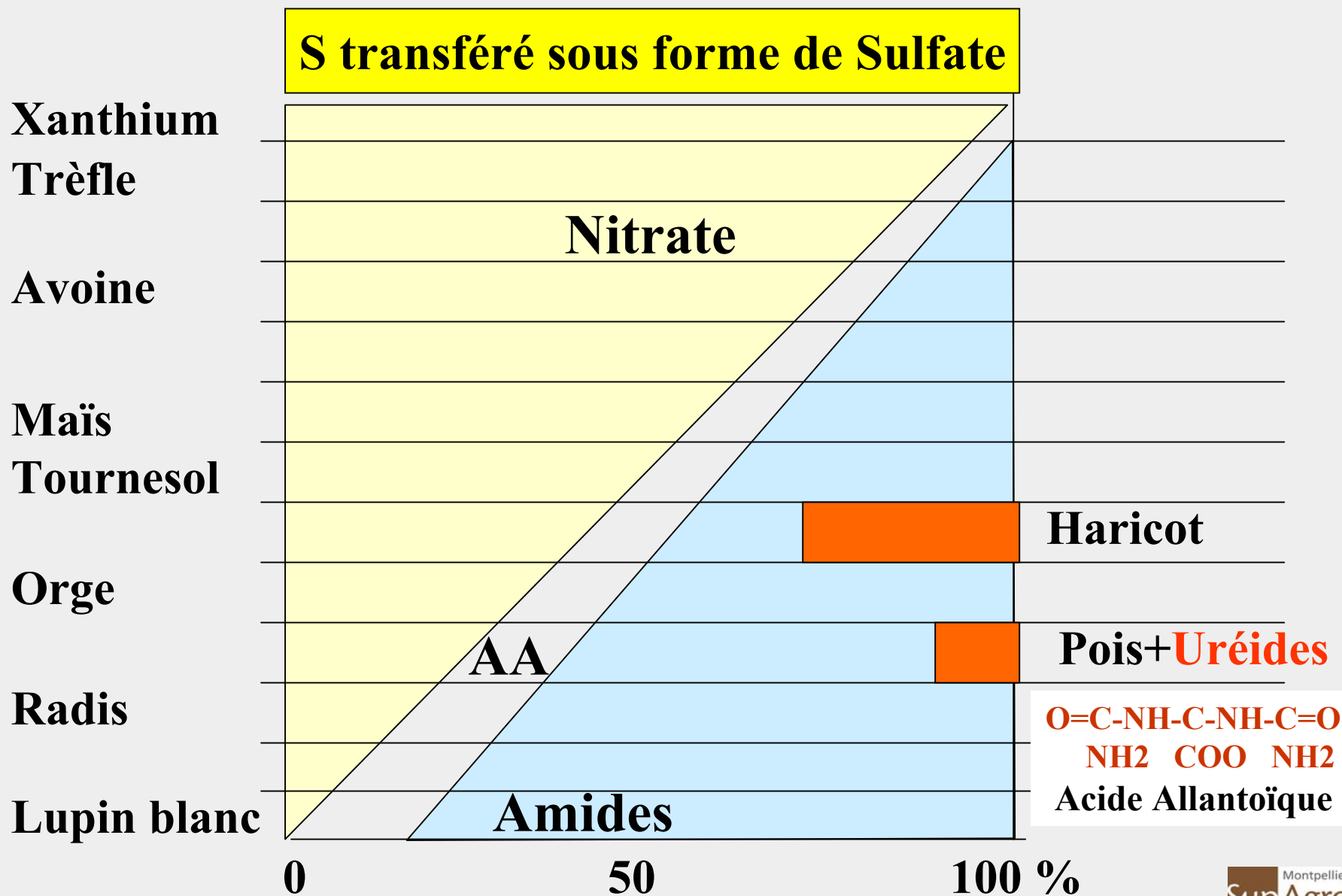
→ La teneur en S (et N) des Animaux > Plantes

Teneurs comparées en % de la matière sèche (feuilles)

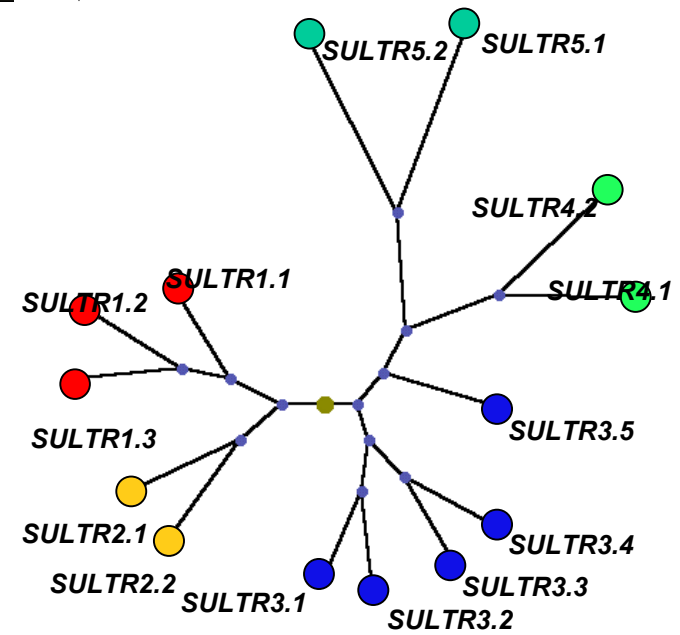
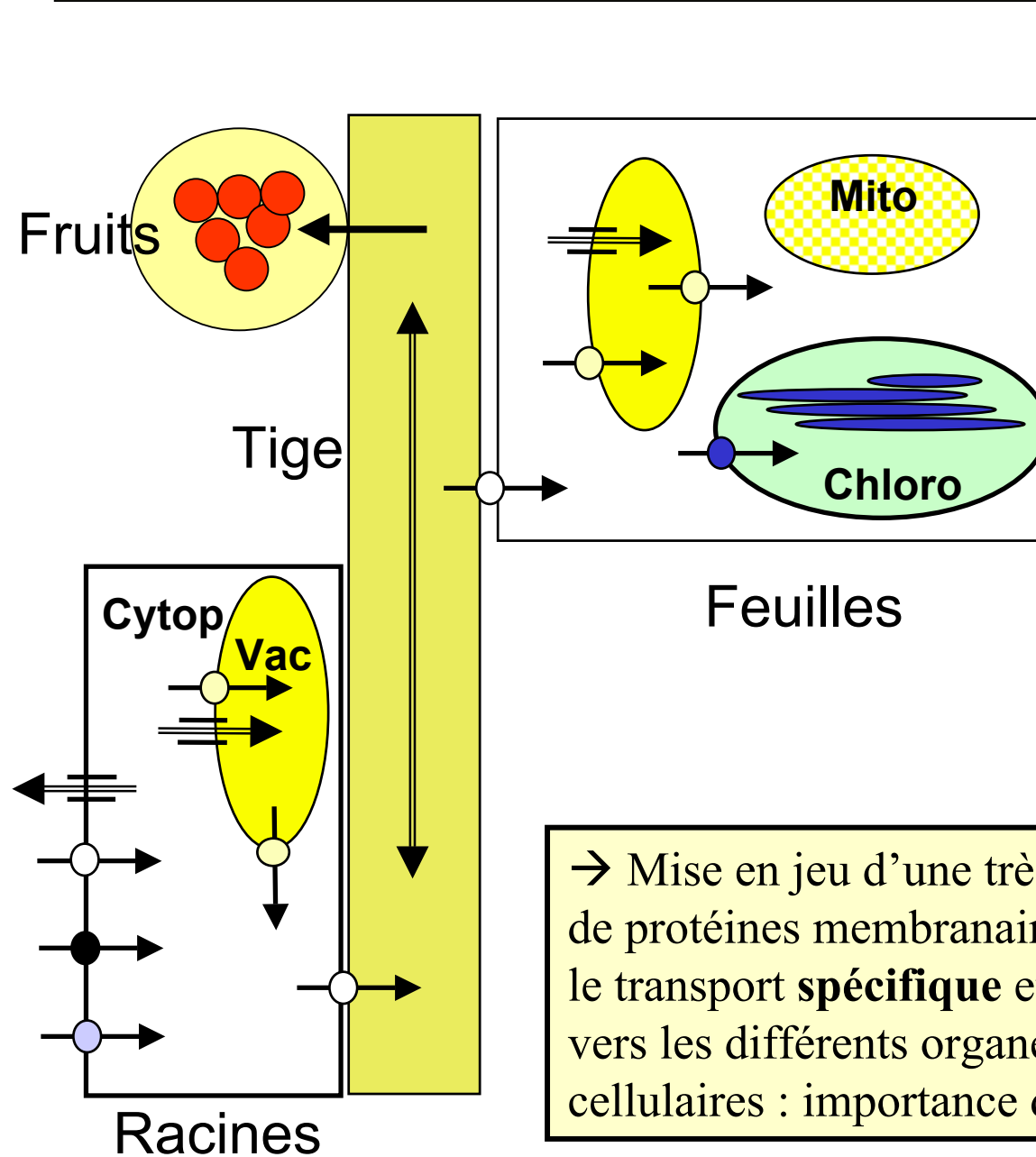
	Colza	Ray Grass	Trèfle
% N	3,45	2,5	3,4
% S	0,50	0,20	0,18
% P	0,40	0,22	0,27
% K	3,2	1,2	1,0
N/S	7,0	12	19

→ Les besoins en S et en N diffèrent entre espèces végétales

Analyse des composés N et S dans la Sève Xylémique



Transport et Compartimentation du Sulfate dans la Plante

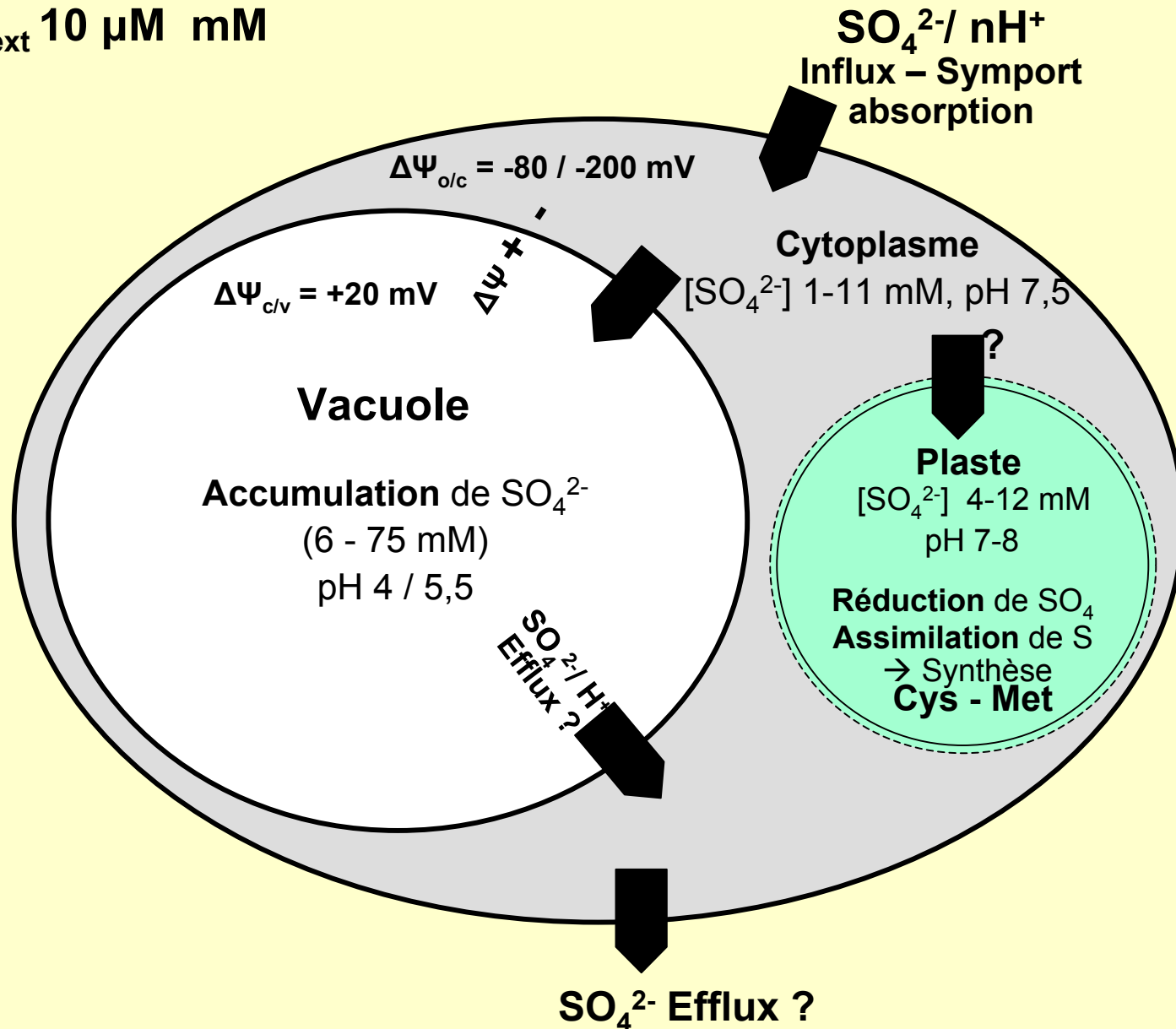


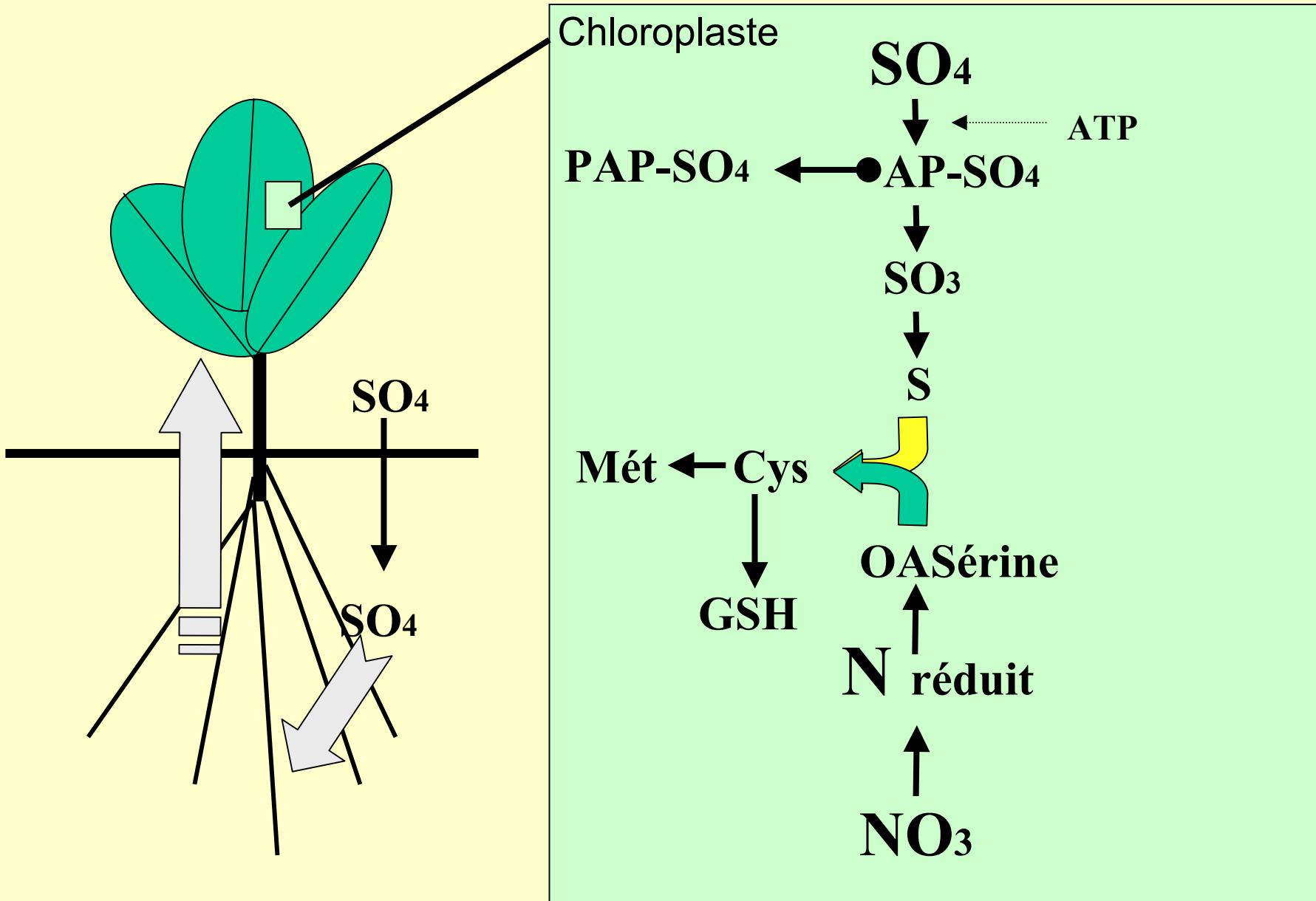
Arbre phylogénétique regroupant les 14 protéines membranaires impliquées dans le transport de sulfate identifiés chez la plante modèle *Arabidopsis thaliana* (famille des Brassicacées)

→ Mise en jeu d'une très grande diversité de protéines membranaires impliquées dans le transport **spécifique** et **actif** du Sulfate vers les différents organes et compartiments cellulaires : importance des **Chloroplastes**

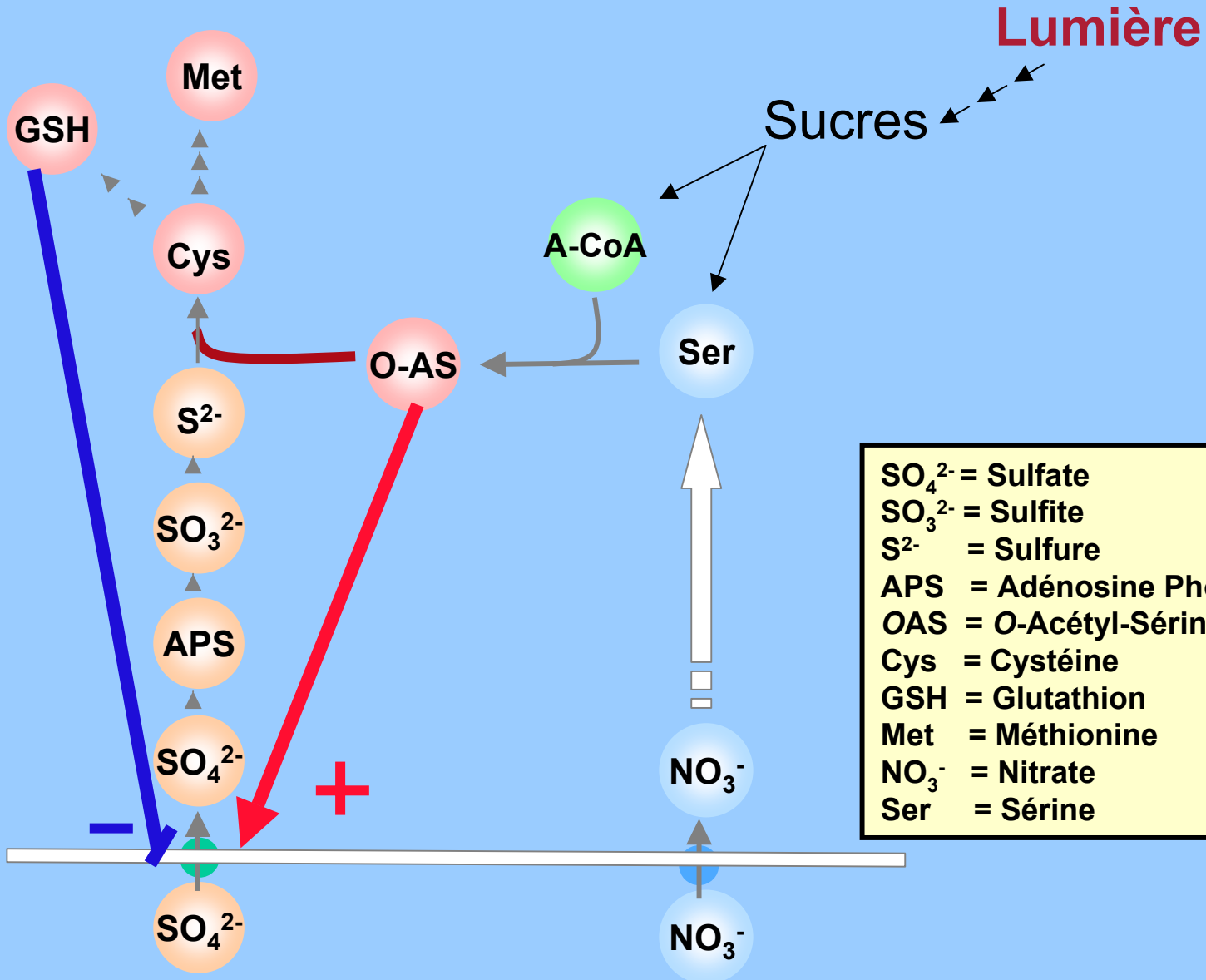
Localisation subcellulaire des transporteurs de Sulfate

$[\text{SO}_4^{2-}]_{\text{ext}} 10 \mu\text{M} \text{ mM}$



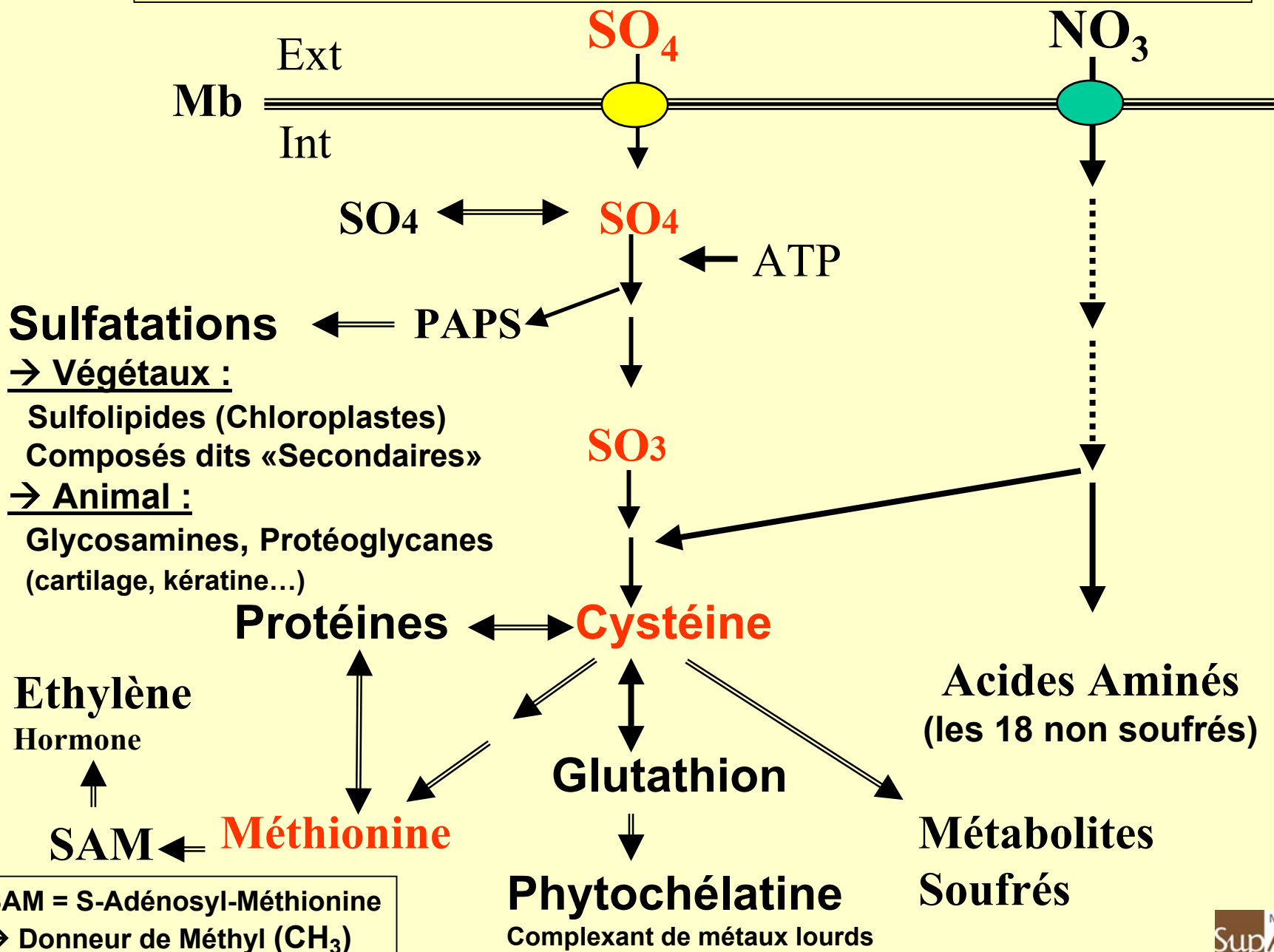


Voie métabolique du Soufre / Régulation du Transport de Sulfate
à la recherche d'un modèle de régulation intégrative S / N / C



- SO_4^{2-} = Sulfate
- SO_3^{2-} = Sulfito
- S^{2-} = Sulfure
- APS = Adénosine Phospho Sulfate
- OAS = O-Acétyle-Sérine
- Cys = Cystéine
- GSH = Glutathion
- Met = Méthionine
- NO_3^- = Nitrate
- Ser = Sérine

Voie d'assimilation métabolique du Soufre (très simplifiée)



Occurrence / Importance du Soufre

Composés soufrés

dits « secondaires »

ex. Glucosinolates; Agents de sapidité...

Acides Aminés Soufrés

Cystéine - Méthionine

Sulfolipides

Chloroplastes

Protéines

Structure : S-S

Activité :

FeS / Thiorédoxine

Métabolisme C1

Méthylation

Interactions

N / C / S

S

Phytohormones

Ethylène/Polyamine

Vitamines

Biotine – Thiamine

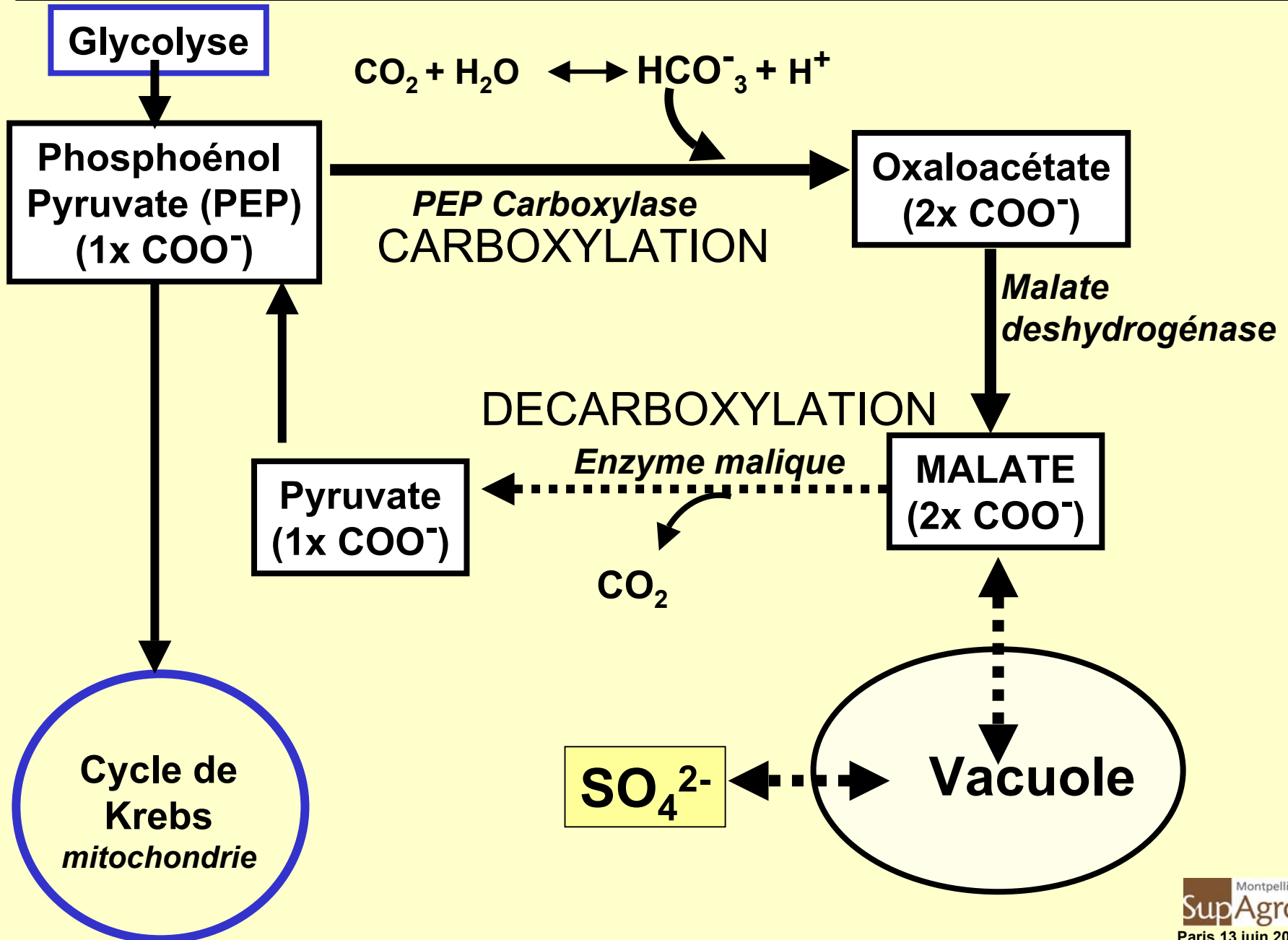
S-Méthylméthionine

Réponses aux stress

Biotiques & Abiotiques

Glutathion (G-SH)

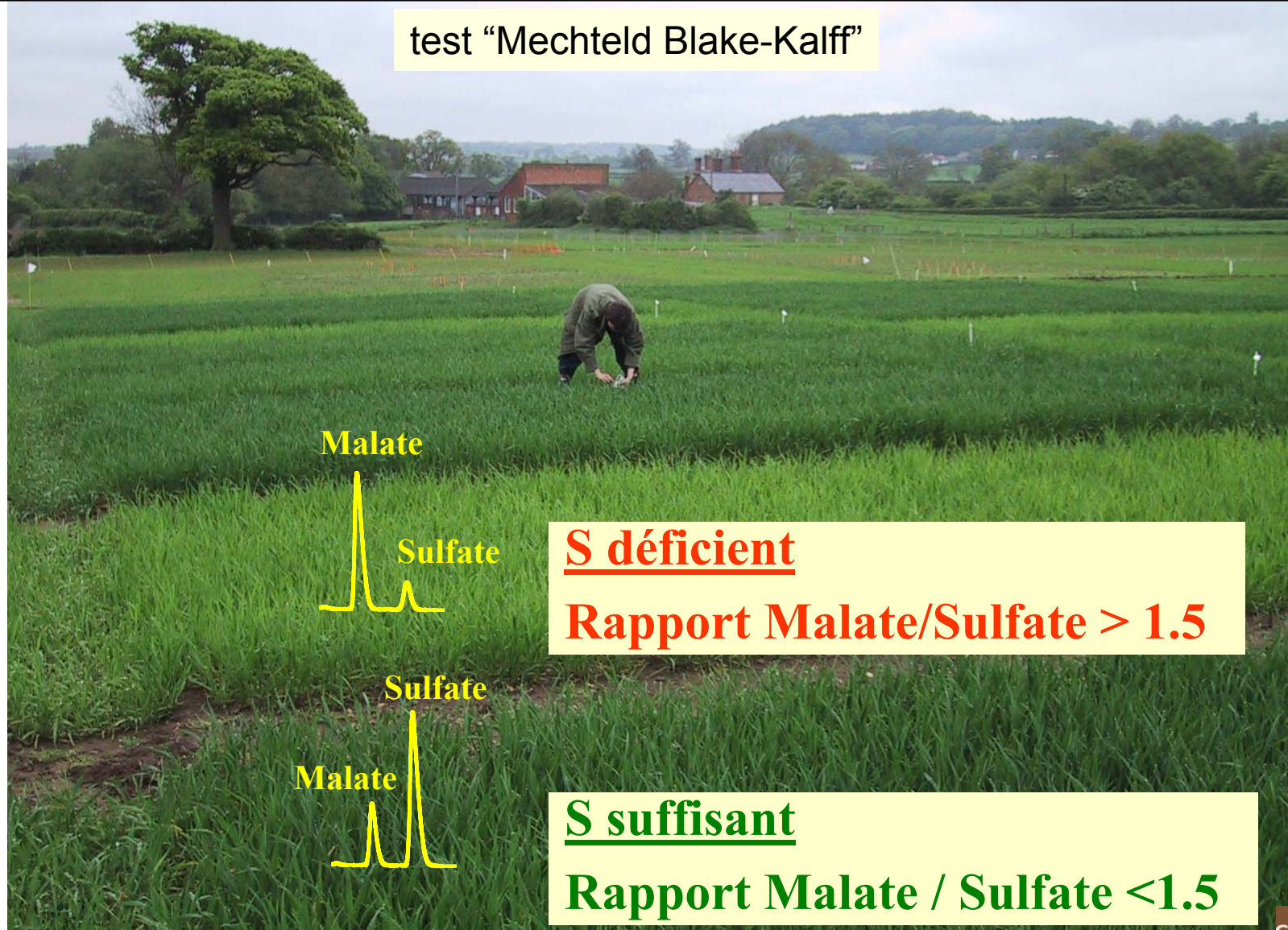
Marqueurs Précoces Potentiels de la Qualité d'un blé



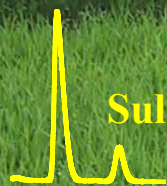
Marqueurs Précoces Potentiels de la Qualité des blés :

→ détermination du profil anionique des feuilles (+HPIC)

test "Mechteld Blake-Kalff"



Malate

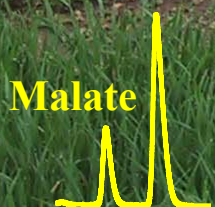


Sulfate

S déficient

Rapport Malate/Sulfate > 1.5

Sulfate



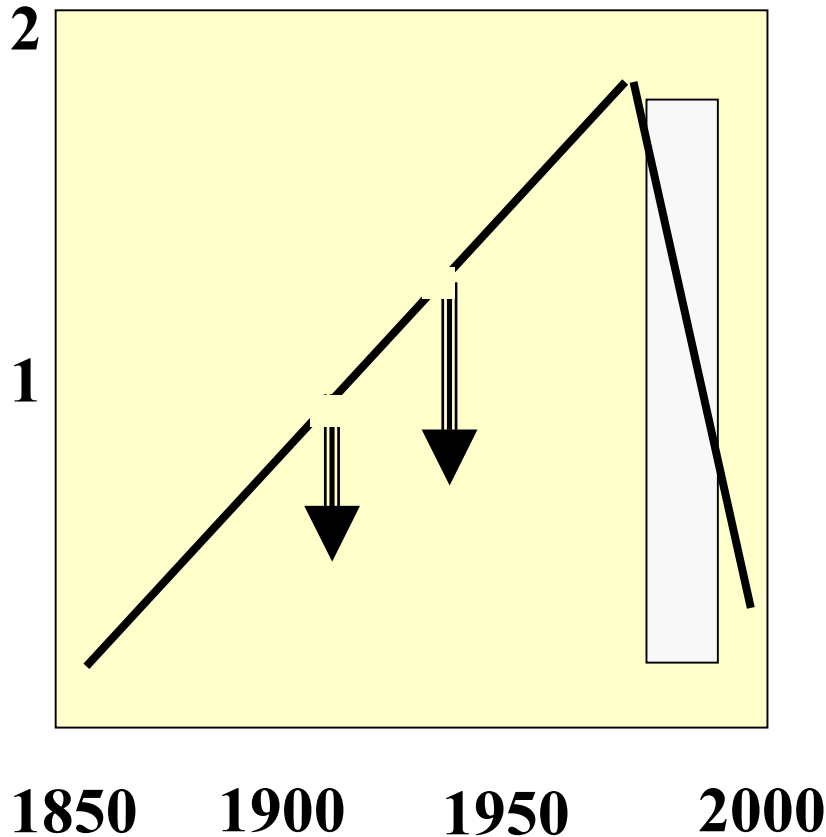
Malate

S suffisant

Rapport Malate / Sulfate < 1.5

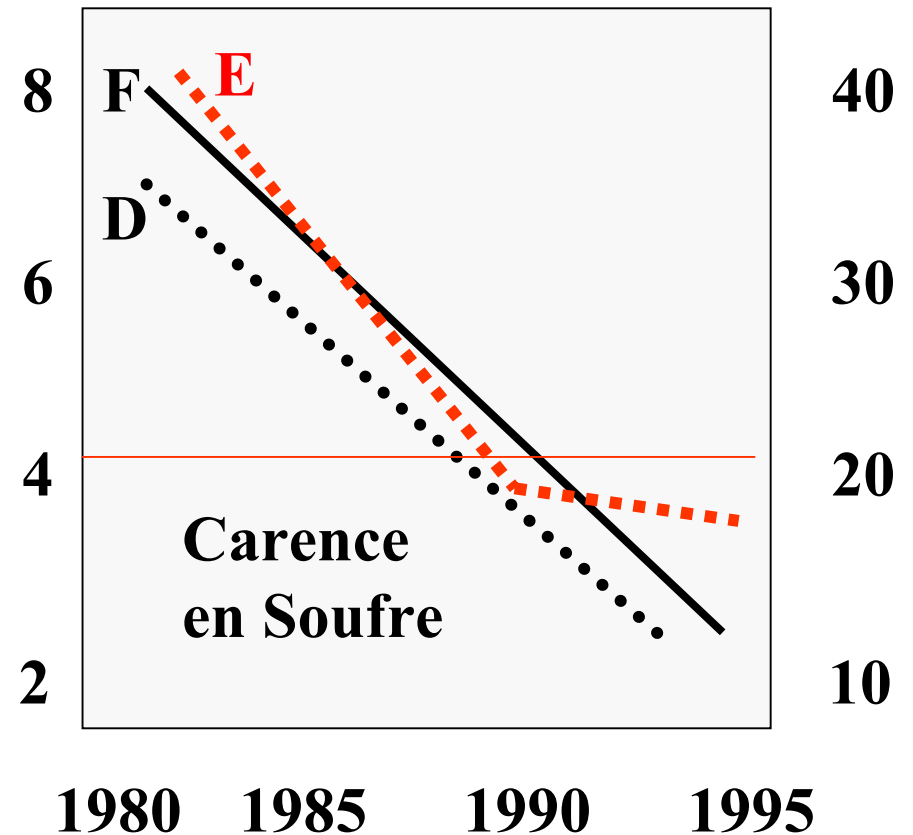
Pollution, Engrais, Teneur en Soufre

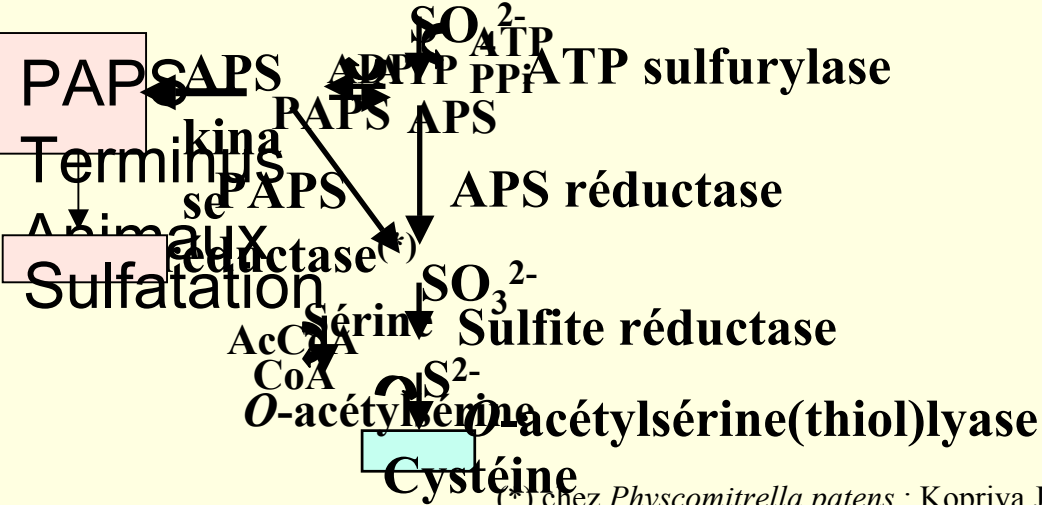
Emission de S
(Allemagne)
(10^6 t/an)



F=[S] Feuille mg/g
E=Engrais : kg/ha

D=Dépôt
kg/ha



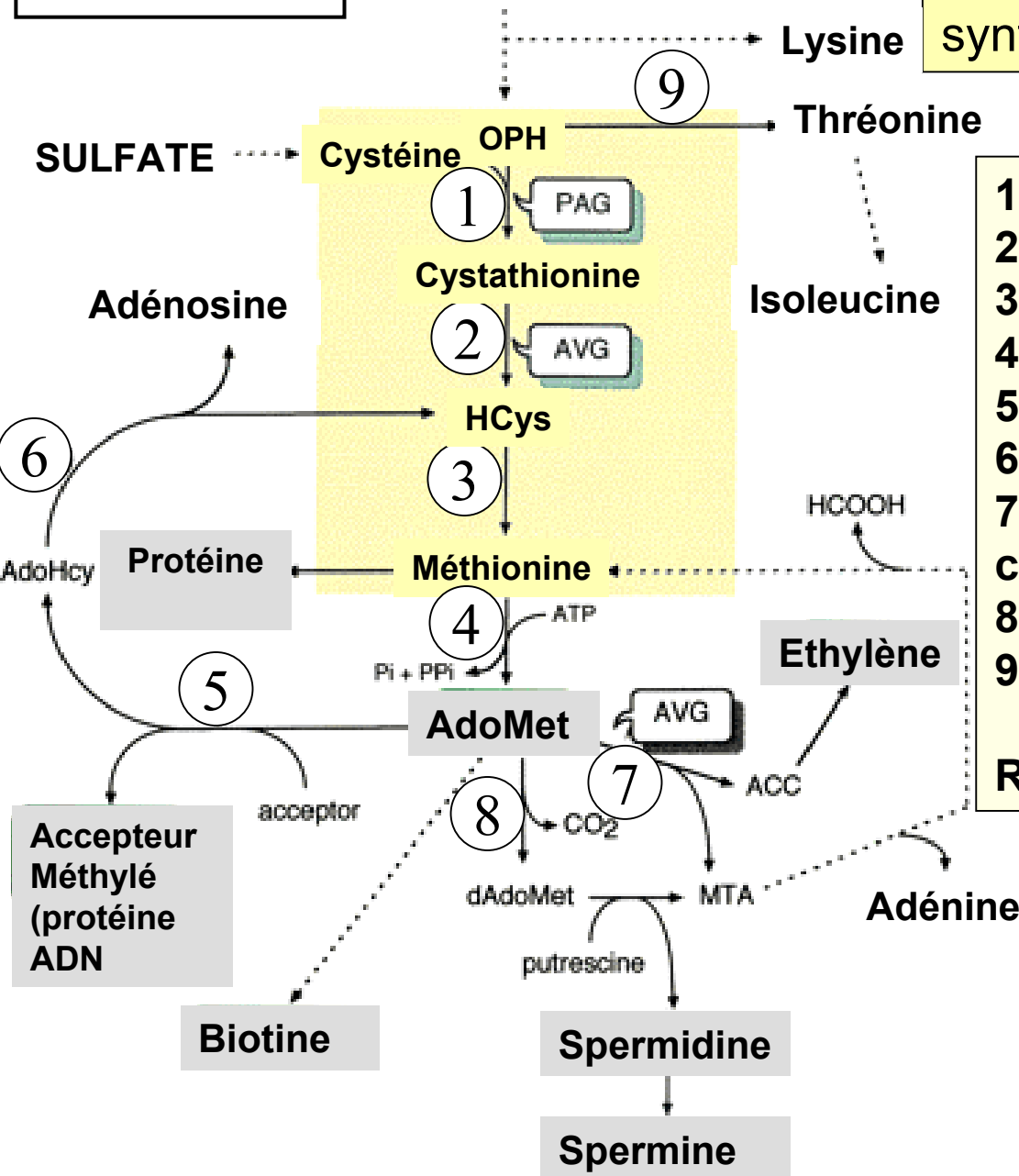


(*) chez *Physcomitrella patens* : Kopriva J Exp Bot 2004 55: 1775

Addendum - JCD

Aspartate

La Méthionine au cœur de voies de synthèses métaboliques importantes

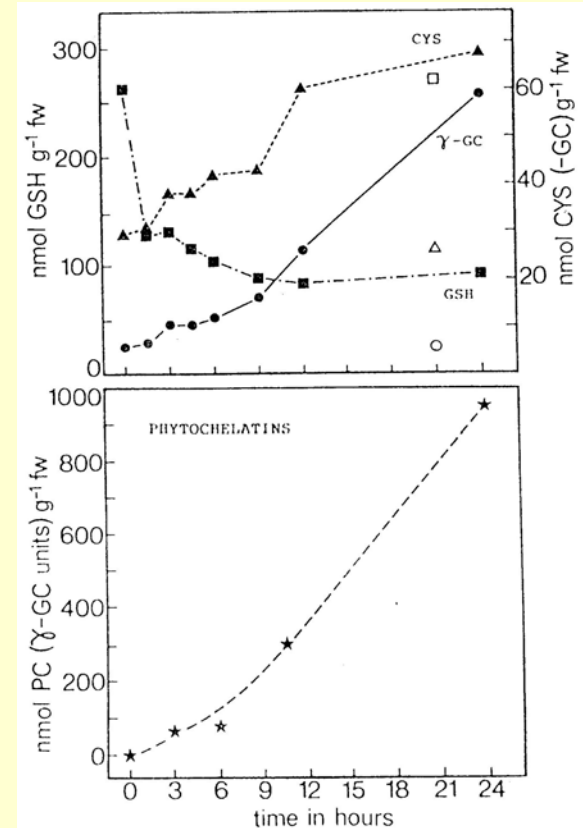
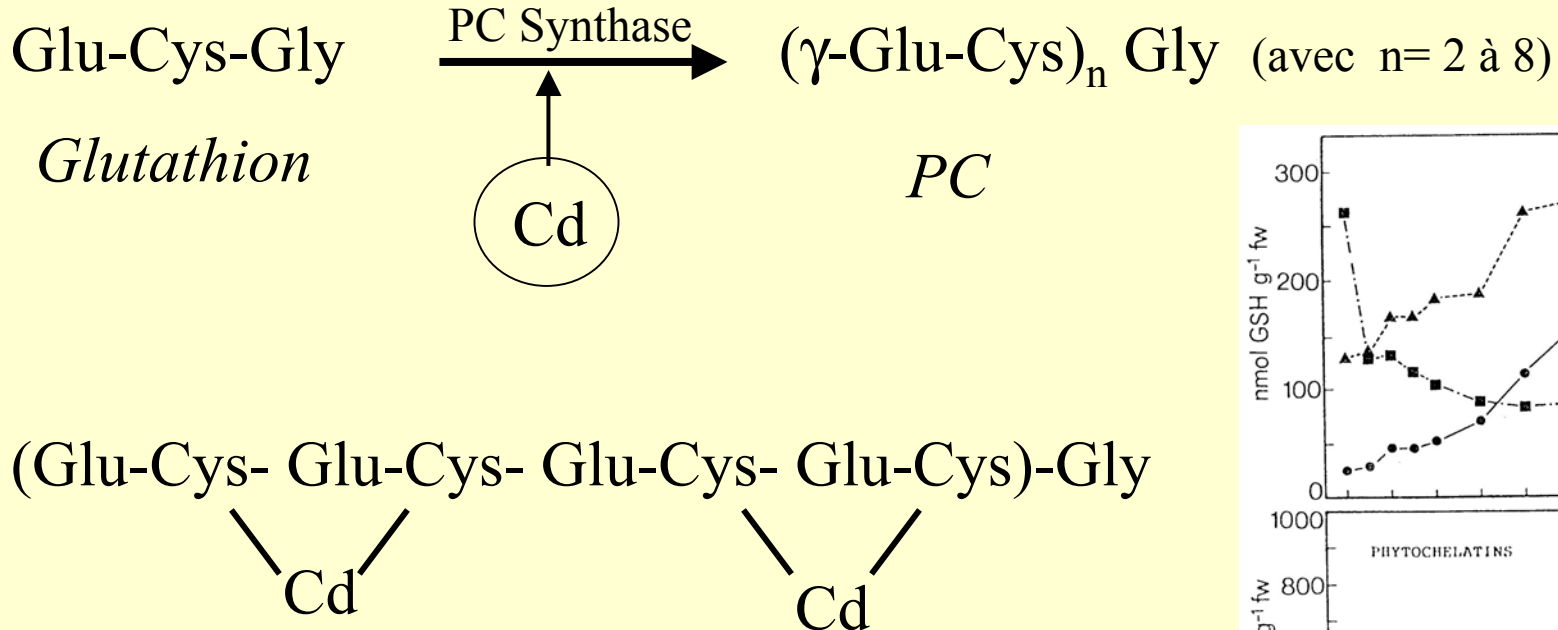


- 1- Cystathionine γ -synthase
- 2- Cystathionine β -lyase
- 3- Méthionine synthase
- 4- AdoMét synthétase
- 5- Méthylase AdoMét-dépendant
- 6- AdoHcy hydrolase
- 7- 1-Aminocyclopropane-1 carboxylique (ACC) acide synthase
- 8- AdoMét décarboxylase
- 9- Thréonine synthase

Rem. AVG inhibiteur de 2 enzymes

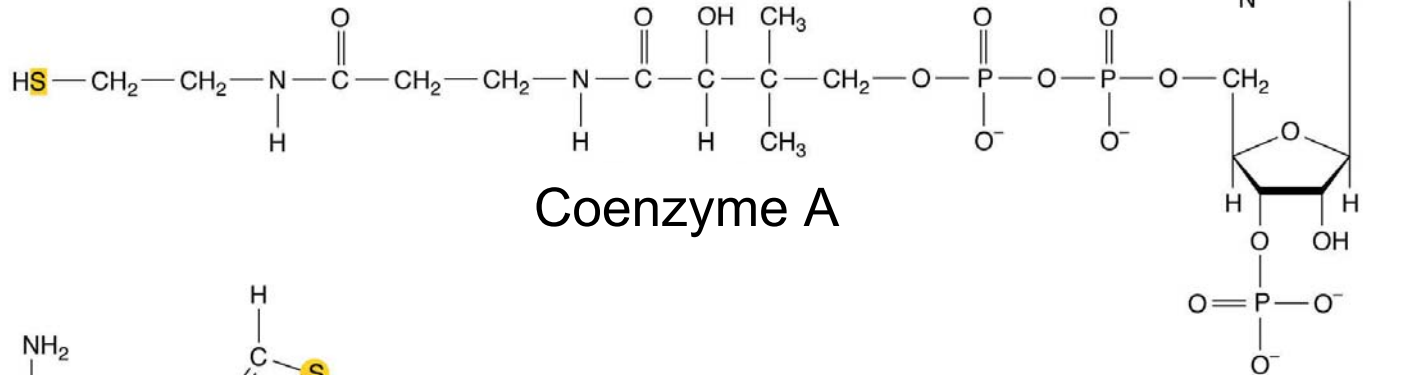
Glutathion et Phytochélatines (PC)

Synthèse de PC en réponse à la présence de cadmium (Cd)
(Synthèse peptidique Non ribosomique)

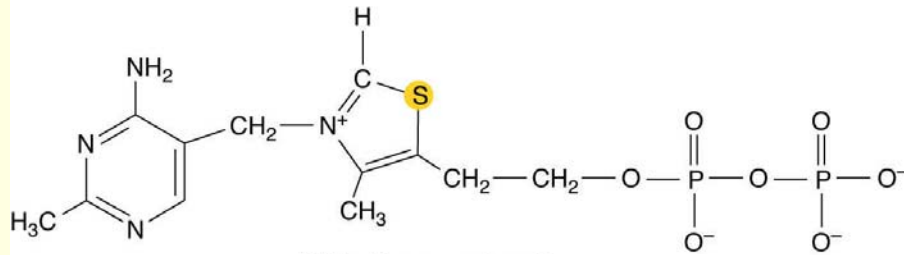


**Les PC-Cd s'accumulent dans les vacuoles :
→ séquestration des métaux lourds**

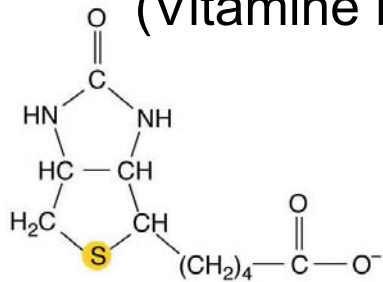
Soufre / Méthionine et Vitamines



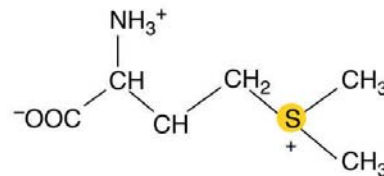
Coenzyme A



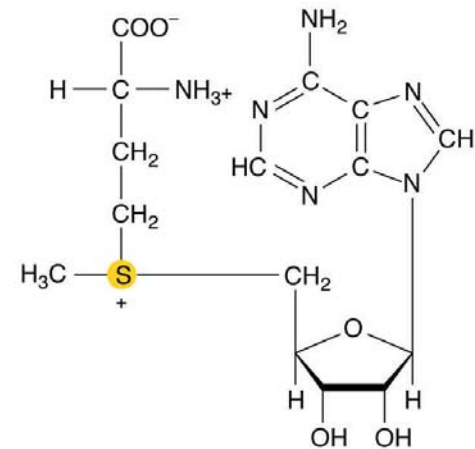
Thiamine Pyrophosphate
(Vitamine B-1)



Biotine



S-Méthylméthionine
(Vitamine U)



S-Adénosylméthionine
(SAM)