

CHAP. 1 – LA NUTRITION MINERALE

1. Les besoins nutritifs des végétaux

2. Rôle biologique des minéraux

3. Besoins quantitatifs

4. L'absorption minérale

4.1. Modalités, cinétique et facteurs de variation

4.2. Mécanisme

EAU



80 à 95% du poids frais

MATIERE SECHE



**Macro-éléments
organiques**

**Macro-éléments
minéraux**

en % du poids sec

6 essentiels

C : 40 à 50 %

O : 42 à 45 %

H : 6 à 7 %

N : 1 à 3 %

K : 2 à 4 %

Ca : 1 à 2 %

Mg : 0,1 à 0,7 %

S : 0,1 à 0,6 %

P : 0,1 à 0,5 %

N : 1 à 3 %

≈ 90% du résidu sec

obtenus à partir de

H_2O , O_2 et CO_2 atmosphériques ...
sauf l'azote

Oligo-éléments

8 essentiels

8 oligoéléments essentiels

- **Cl** : 10^{-3} g/g MS
- **Fe** : 10^{-6} à 10^{-5} g/g MS
- **Mn, Zn, Cu, B** : 10^{-6} g/g MS
- **Al, Ni, Mo, I, Br, F** : 10^{-9} à 10^{-7} g/g MS
- **Li, Pb, Ti, Rb, Ce, Cr** : doses infinitésimales

Macro-éléments > 100 mg/kg plante
Oligo-éléments < 100 mg/kg plante

Quantités nécessaires : exemple

1 ha de vigne

**200 g de bore
180 g de cuivre
600 g de fer
300 g de manganèse
4 g de molybdène
250 g de zinc**

Oligo-éléments

**80 kg de potasse
ou de calcium**

Macro-éléments

par an

1. Les besoins nutritifs des végétaux

2. Rôle biologique des minéraux

3. Besoins quantitatifs

4. L'absorption minérale

4.1. Modalités, cinétique et facteurs de variation

4.2. Mécanisme

Rôle des éléments minéraux

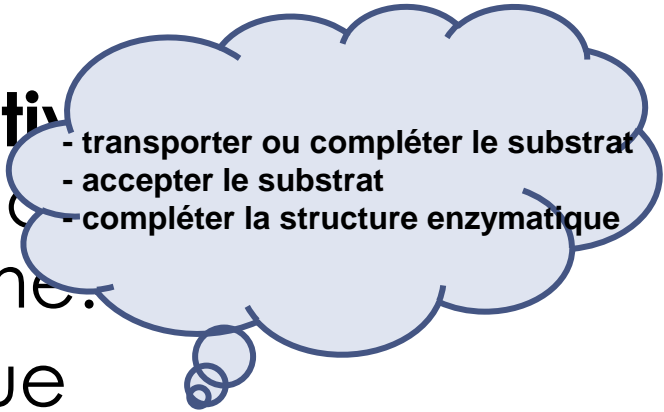
- **Rôle plastique**

ils entrent dans la **constitution des édifices cellulaires** => nécessaires à la synthèse de la matière organique.

- **Rôle catalytique**

ils sont indispensables à l'**activité** **certaines enzymes** et donc au déroulement du métabolisme.

→ cofacteur enzymatique

- 
- transporter ou compléter le substrat
 - accepter le substrat
 - compléter la structure enzymatique

Cas particulier des besoins en azote

- Source d'azote = **N minéral du sol**
- provient de la dégradation de la matière organique qui libère :
 - Les ions ammonium NH_4^+ → ammonisation
 - Les ions nitrates NO_3^- → nitrification

⇒ **Cycle de l'azote**

Les nitrates sont la source d'N préférentielle pour les végétaux.

Cas particulier des besoins en azote

- N = l'un des **constituants majeurs** des végétaux
- N entre dans la **constitution**
 - ✓ de tous les **a.a.** (protéines),
 - ✓ des **bases puriques et pyrimidiques** (A, C, T, G, U = adénine, cytosine, guanine, thymine et uracile),
 - ✓ de **certains pigments** (chlorophylle ...),
 - ✓ des **hormones** (auxines, cytokinines ...),
 - ✓ de plusieurs **vitamines**,
 - ✓ de **nombreux métabolites secondaires** (alcaloïdes ...)

Cas particulier des besoins en azote

- végétaux **incapables de fixer l'N atmosphérique**
- **exception** : végétaux **symbiotiques** de **micro-organismes** fixateurs d'azote → nodosités racinaires
 - Les Fabacées (= Légumineuses) :
pois, trèfle, soja ... + bactérie endophyte = *Rhizobium*
 - D'autres végétaux (familles diverses) :
aulne (Bétulacées) + champignon endophyte = *Frankia*

Fixation de l'N atmosphérique grâce à l'enzyme **nitrogénase**
synthétisée par la bactérie ou le champignon
mais pas par les plantes eucaryotes

Cas particulier des besoins en azote

L'azote est le **principal élément limitant**
la croissance des plantes



Arabidopsis thaliana - Les plantes en A et en B sont au même stade de développement

Les macroéléments métalliques

- Ils sont absorbés **sous forme de cations**.
- Ils interviennent dans la cellule sous cette forme, **libres ou complexés**.

Les macroéléments métalliques

Tableau périodique des éléments

Groupe →	1	2																	18					
Période ↓	IA	IIA																	VIIIA					
1	hydrogène 1 H 1,00794	← nom de l'élément (gaz, liquide ou solide à 0°C et 101,3 kPa) ← numéro atomique ← symbole chimique ← masse atomique relative ou [celle de l'isotope le plus stable]																hélium 2 He 4,002602						
2	lithium 3 Li 6,941	béryllium 4 Be 9,012182																	bore 5 B 10,811	carbone 6 C 12,0107	azote 7 N 14,00674	oxygène 8 O 15,9994	fluor 9 F 18,9984032	néon 10 Ne 20,1797
3	sodium 11 Na 22,98976928	magnésium 12 Mg 24,3050	3 IIIB	4 IVB	5 VB	6 VIB	7 VIIB	8 VIII	9 VIII	10 VIII	11 IB	12 IIB	aluminium 13 Al 26,9815386	silicium 14 Si 28,0855	phosphore 15 P 30,973762	soufre 16 S 32,066	chlore 17 Cl 35,4527	argon 18 Ar 39,948						
4	potassium 19 K 39,0983	calcium 20 Ca 40,078	scandium 21 Sc 44,955912	titane 22 Ti 47,867	vanadium 23 V 50,9415	chrome 24 Cr 51,9961	manganèse 25 Mn 54,938045	fer 26 Fe 55,845	cobalt 27 Co 58,933195	nickel 28 Ni 58,6934	cuivre 29 Cu 63,546	zinc 30 Zn 65,39	gallium 31 Ga 69,723	germanium 32 Ge 72,61	arsenic 33 As 74,92160	sélénium 34 Se 78,96	brome 35 Br 79,904	krypton 36 Kr 83,80						
5	rubidium 37 Rb 85,4678	strontium 38 Sr 87,62	yttrium 39 Y 88,90585	zirconium 40 Zr 91,224	niobium 41 Nb 92,90638	molybdène 42 Mo 95,94	technétium 43 Tc 97,9072	ruthénium 44 Ru 101,07	rhodium 45 Rh 102,90550	palladium 46 Pd 106,42	argent 47 Ag 107,8682	cadmium 48 Cd 112,411	indium 49 In 114,818	étain 50 Sn 118,710	antimoine 51 Sb 121,760	tellure 52 Te 127,60	iode 53 I 126,90447	xénon 54 Xe 131,29						
6	césium 55 Cs 132,9054519	baryum 56 Ba 137,327	lanthanides 57–71		hafnium 72 Hf 178,49	tantale 73 Ta 180,94788	tungstène 74 W 183,84	rhénium 75 Re 186,207	osmium 76 Os 190,23	iridium 77 Ir 192,217	platine 78 Pt 195,084	or 79 Au 196,966569	mercure 80 Hg 200,59	thallium 81 Tl 204,3833	plomb 82 Pb 207,2	bismuth 83 Bi 208,98040	polonium 84 Po [208,9824]	astate 85 At [209,9871]	radon 86 Rn [222,0176]					
7	francium 87 Fr [223,0197]	radium 88 Ra [226,0254]	actinides 89–103		rutherfordium 104 Rf [263,1125]	dubnium 105 Db [262,1144]	seaborgium 106 Sg [266,1219]	bohrium 107 Bh [264,1247]	hassium 108 Hs [269,1341]	meitnérium 109 Mt [268,1388]	darmstadtium 110 Ds [272,1463]	roentgenium 111 Rg [272,1535]	copernicium 112 Cn [277]	ununtrium 113 Uut [284]	flérovium 114 Fl [289]	ununpentium 115 Uup [288]	livermorium 116 Lv [292]	ununseptium 117 Uus [292]	ununoctium 118 Uuo [294]					
					lanthane 57 La 138,90547	cérium 58 Ce 140,116	praseodyme 59 Pr 140,90765	néodyme 60 Nd 144,242	prométhium 61 Pm [144,9127]	samarium 62 Sm 150,36	europium 63 Eu 151,964	gadolinium 64 Gd 157,25	terbium 65 Tb 158,92535	dysprosium 66 Dy 162,500	holmium 67 Ho 164,93032	erbium 68 Er 167,259	thulium 69 Tm 168,93421	ytterbium 70 Yb 173,04	lutécium 71 Lu 174,967					
					actinium 89 Ac [227,0277]	thorium 90 Th 232,03806	protactinium 91 Pa 231,03588	uranium 92 U 238,02891	neptunium 93 Np [237,0482]	plutonium 94 Pu [244,0642]	américium 95 Am [243,0614]	curium 96 Cm [247,0703]	berkélium 97 Bk [247,0703]	californium 98 Cf [251,0796]	einsteinium 99 Es [252,0830]	fermium 100 Fm [257,0951]	mendélévium 101 Md [258,0984]	nobélium 102 No [259,1011]	lawrencium 103 Lr [262,110]					
	métaux alcalins	alcalino-terreux	lanthanides	actinides	métaux de transition	métaux pauvres	métalloïdes	non-métaux	halogènes	gaz nobles							primordial	désintégration d'autres éléments	synthétique					

Rôle du calcium : la signalisation cellulaire

- Le calcium est un **ion peu mobile**
- très facilement **adsorbé par les membranes biologiques**
- agent de **cohésion de la paroi squelettique**
pontage entre les fibres de cellulose / hémicellulose et les composés pectiques => assure la résistance tissulaire
rôle important dans la **rigidité des tiges** chez les céréales et la **fermeté des fruits**
assure le rapprochement entre les phospholipides membranaires en se fixant sur leurs sites négatifs
=> **diminue la perméabilité cellulaire**
- **régulation des échanges ioniques sol - racines**

Rôle du potassium : la turgescence cellulaire

- Le potassium est un ion **très mobile**
- cation le plus important pour la **régulation des phénomènes osmotiques**, en particulier pour la régulation stomatique. Sa très grande mobilité est compatible et indispensable avec la rapidité des mouvements de turgescence.
Il favorise la fermeture des stomates => **diminue la transpiration => augmente la résistance à la sécheresse**
- ion principal des **solutions cytoplasmiques**
- **rôle catalytique important**
carence en K => déficience dans la synthèse des protéines ou dans la photosynthèse
- conditionne le bon **déroulement de la mitose**

Rôle du magnésium

- **constituant de la chlorophylle** => sa présence est indispensable au bon déroulement de la **photosynthèse**
- **co-facteur de nombreuses réactions enzymatiques**, en particulier des enzymes intervenant dans le **métabolisme du phosphore** : ATP-ases, kinases ...
Il permet sans doute la liaison entre l'enzyme et son substrat.

Les macroéléments non métaux

- Ils sont absorbés **sous forme d'anions**.
- forte électronégativité
- ni métaux, ni halogènes, ni gaz rares

Les macroéléments non métaux

Tableau périodique des éléments

Groupe →	1	2																	18					
Période ↓	IA	IIA																	VIIIA					
1	hydrogène 1 H 1,00794	<div>← nom de l'élément (gaz, liquide ou solide à 0°C et 101,3 kPa)</div> <div>← numéro atomique</div> <div>← symbole chimique</div> <div>← masse atomique relative ou [celle de l'isotope le plus stable]</div>																hélium 2 He 4,002602						
2	lithium 3 Li 6,941	béryllium 4 Be 9,012182																	bore 5 B 10,811	carbone 6 C 12,0107	azote 7 N 14,00644	oxygène 8 O 15,9994	fluor 9 F 18,9984032	néon 10 Ne 20,1797
3	sodium 11 Na 22,98976928	magnésium 12 Mg 24,3050	3 IIIB	4 IVB	5 VB	6 VIB	7 VIIB	8	9	10	11 IB	12 IIB	aluminium 13 Al 26,9815386	silicium 14 Si 28,0855	phosphore 15 P 30,973762	soufre 16 S 32,066	chlore 17 Cl 35,4527	argon 18 Ar 39,948						
4	potassium 19 K 39,0983	calcium 20 Ca 40,078	scandium 21 Sc 44,955912	titane 22 Ti 47,867	vanadium 23 V 50,9415	chrome 24 Cr 51,9961	manganèse 25 Mn 54,938045	fer 26 Fe 55,845	cobalt 27 Co 58,933195	nickel 28 Ni 58,6934	cuivre 29 Cu 63,546	zinc 30 Zn 65,39	gallium 31 Ga 69,723	germanium 32 Ge 72,61	arsenic 33 As 74,92160	sélénium 34 Se 78,96	brome 35 Br 79,904	krypton 36 Kr 83,80						
5	rubidium 37 Rb 85,4678	strontium 38 Sr 87,62	yttrium 39 Y 88,90585	zirconium 40 Zr 91,224	niobium 41 Nb 92,90638	molybdène 42 Mo 95,94	technétium 43 Tc 97,9072	ruthénium 44 Ru 101,07	rhodium 45 Rh 102,90550	palladium 46 Pd 106,42	argent 47 Ag 107,8682	cadmium 48 Cd 112,411	indium 49 In 114,818	étain 50 Sn 118,710	antimoine 51 Sb 121,760	tellure 52 Te 127,60	iode 53 I 126,90447	xénon 54 Xe 131,29						
6	césium 55 Cs 132,9054519	baryum 56 Ba 137,327	lanthanides 57–71		hafnium 72 Hf 178,49	tantale 73 Ta 180,94788	tungstène 74 W 183,84	rhénium 75 Re 186,207	osmium 76 Os 190,23	iridium 77 Ir 192,217	platine 78 Pt 195,084	or 79 Au 196,966569	mercure 80 Hg 200,59	thallium 81 Tl 204,3833	plomb 82 Pb 207,2	bismuth 83 Bi 208,98040	polonium 84 Po [208,9824]	astate 85 At [209,9871]	radon 86 Rn [222,0176]					
7	francium 87 Fr [223,0197]	radium 88 Ra [226,0254]	actinides 89–103		rutherfordium 104 Rf [263,1125]	dubnium 105 Db [262,1144]	seaborgium 106 Sg [266,1219]	bohrium 107 Bh [264,1247]	hassium 108 Hs [269,1341]	meitnérium 109 Mt [268,1388]	darmstadtium 110 Ds [272,1463]	roentgenium 111 Rg [272,1535]	copernicium 112 Cn [277]	ununtrium 113 Uut [284]	flérovium 114 Fl [289]	ununpentium 115 Uup [288]	livermorium 116 Lv [292]	ununseptium 117 Uus [292]	ununoctium 118 Uuo [294]					
					lanthane 57 La 138,90547	cérium 58 Ce 140,116	praseodyme 59 Pr 140,90765	néodyme 60 Nd 144,242	prométhium 61 Pm [144,9127]	samarium 62 Sm 150,36	europium 63 Eu 151,964	gadolinium 64 Gd 157,25	terbium 65 Tb 158,92535	dysprosium 66 Dy 162,500	holmium 67 Ho 164,93032	erbium 68 Er 167,259	thulium 69 Tm 168,93421	ytterbium 70 Yb 173,04	lutécium 71 Lu 174,967					
					actinium 89 Ac [227,0277]	thorium 90 Th 232,03806	protactinium 91 Pa 231,03588	uranium 92 U 238,02891	neptunium 93 Np [237,0482]	plutonium 94 Pu [244,0642]	américium 95 Am [243,0614]	curium 96 Cm [247,0703]	berkélium 97 Bk [247,0703]	californium 98 Cf [251,0796]	einsteinium 99 Es [252,0830]	fermium 100 Fm [257,0951]	mendélévium 101 Md [258,0984]	nobélium 102 No [259,1011]	lawrencium 103 Lr [262,110]					

Rôle du soufre

- assimilé et utilisé à **l'état réduit**. La réduction des sulfates est une spécialité des végétaux (et de quelques bactéries).
- présent sous forme de **groupement -SH** (= **groupement thiol**) constituant essentiel de certains aa = les **aa soufrés : cystéine et méthionine**
=> c'est un **élément plastique** des végétaux car il entre dans la constitution de nombreuses **protéines** sous forme de **pont disulfure R-S-S-R** et de nombreuses **vitamines**
- **rôle catalytique** au niveau de nombreux sites enzymatiques (co-enzyme A ...)
- carence en S (sulfates SO_4^{--}) = **carence très sévère**
symptôme : disparition de la chlorophylle (=> **chlorose**) car sa synthèse n'est plus assurée.

Rôle du phosphore

- **élément plastique** : il entre dans la **composition des acides nucléiques et des phospholipides**.
- importance du **radical phosphoryle** qui joue un rôle :
 - **structural : liaison entre groupements organiques** chez les phospholipides ou chez les aa.
 - de **transporteur d'énergie** : constituant des molécules transporteurs d'énergie GTP et UTP mais aussi des molécules de stockage d'énergie ATP
 - **d'activateur de substrat** pour leur permettre d'entrer dans le métabolisme (cas des oses phosphate)

Les oligoéléments

- Ce sont généralement des **co-facteurs enzymatiques**, à **rôle catalytique**

Rôle du fer

- c'est un **élément rédox $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$** .
- il entre dans la **constitution de nombreuses protéines** (cytochromes, ferrédoxine ...) pour lesquels il constitue **l'élément essentiel de leur activité**.
- il joue un rôle capital dans le **transport des électrons lié à la photosynthèse**. Les déficiences en fer des plantes vertes se manifestent par un dysfonctionnement voire un arrêt de la photosynthèse (=> **chloroses**).

Rôle du bore

- **indispensable** au fonctionnement des méristèmes
- rôle important dans **le transport des glucides**.

La carence en B se traduit en effet par un dysfonctionnement des méristèmes du à des perturbations du transport des glucides.

Les glucides constituent avec l'acide borique des complexes qui migreraient beaucoup mieux que les glucides seuls.

Carence en B => accumulation anormale de glucides (amidon)

Rôle du zinc

- co-facteur de nombreuses enzymes d'oxydation, **les déshydrogénases** principalement.
- participe à la **synthèse des auxines** (hormones) (indispensable à la synthèse du tryptophane)

Rôle du manganèse

- il constitue (avec le zinc) le plus **important co-facteur d'enzymes, pour les décarboxylases** notamment.
- les ions Mn^{2+} activent de nombreuses réactions d'oxydo-réduction (notamment lors de la photosynthèse).

Rôle du cuivre

- il agit comme le fer par son changement de valence et **catalyse certaines oxydo-réductions.**
- il est également le **co-facteur des polyphénols-oxydases.**

Rôle du molybdène

- il est nécessaire à des doses infimes (10^{-8} g/l) mais il est absolument indispensable en tant que **cofacteur de la nitrate-réductase** qui ne fonctionne que grâce à lui.

Rôle du nickel

- Le nickel est important pour le **fonctionnement de l'enzyme uréase**.

Cette enzyme empêche que la plante s'enrichisse en urée.

Elle permet la transformation de l'urée $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ en dioxyde de carbone et ammoniac.

Le nickel semble être nécessaire à la germination des graines

Rôle du chlore

- Le chlore intervient dans le **déroulement des réactions productrices d'O₂ de la photosynthèse.**

Il est également très important au niveau des membranes cellulaires pour **le potentiel membranaire et le gradient électrochimique**

1. Les besoins nutritifs des végétaux

2. Rôle biologique des minéraux

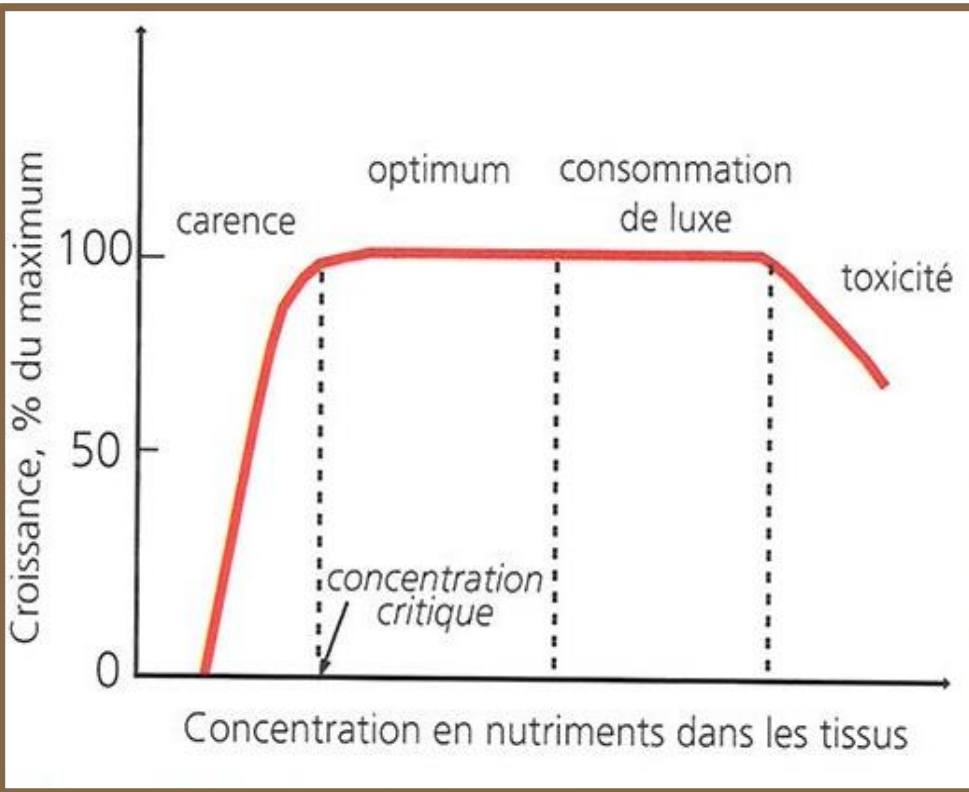
3. Besoins quantitatifs

4. L'absorption minérale

4.1. Modalités, cinétique et facteurs de variation

4.2. Mécanisme

La notion de dose utile



Concentration critique = concentration minimale en nutriments qui permet une croissance optimale

L'optimum correspond aux besoins exacts de la croissance du végétal.

Tout élément même nécessaire devient toxique à forte dose.

La notion de carence

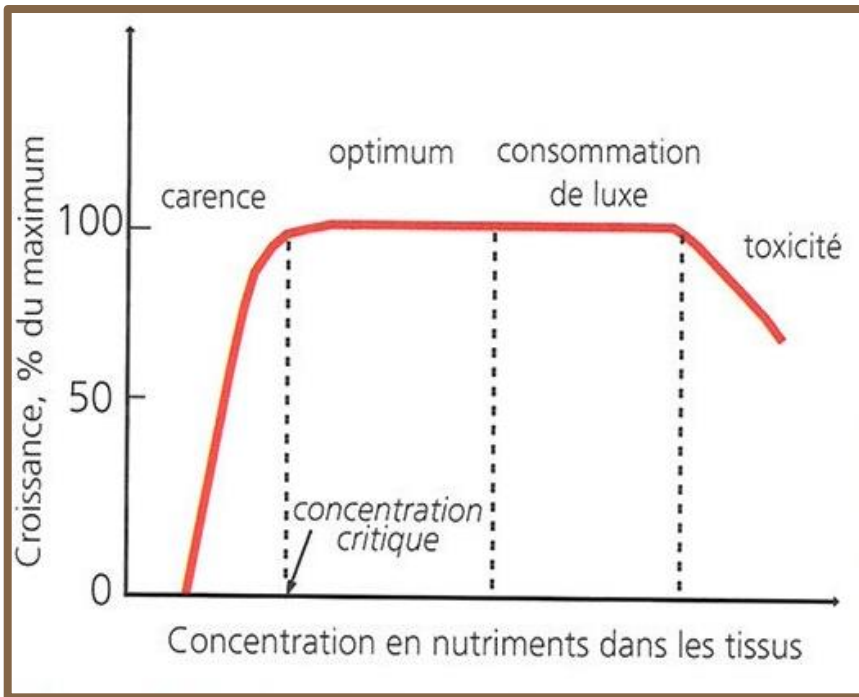


Schéma d'après Epstein 1972 in Botanique
- Biologie et Physiologie végétales, MEYER
S., REEB C. et BOSDEVEIX R. (2008)

nécrose =
dégât cellulaire
qui mène à la
mort prématurée
et non
programmée
des cellules

- **si apport en nutriments en dessous de la concentration critique**

Croissance = $f(\text{concentration})$
=> carence

Conséquences :

- **vitesse de croissance réduite**
- **maladies de carence** qui provoquent des **malformations** ou des **perturbations physiologiques**

Symptômes :

Taille réduite, chlorose, nécrose ...

- Éléments immobiles dans la plante (S, Ca, Fe, Cu, B)
→ 1^{ers} symptômes dans les tissus en croissance
- Éléments mobiles dans la plante (N, K, Mg, P, Cl, Zn, Mo)
→ 1^{ers} symptômes dans les tissus âgés → tissus en croissance restent préservés

La notion de carence

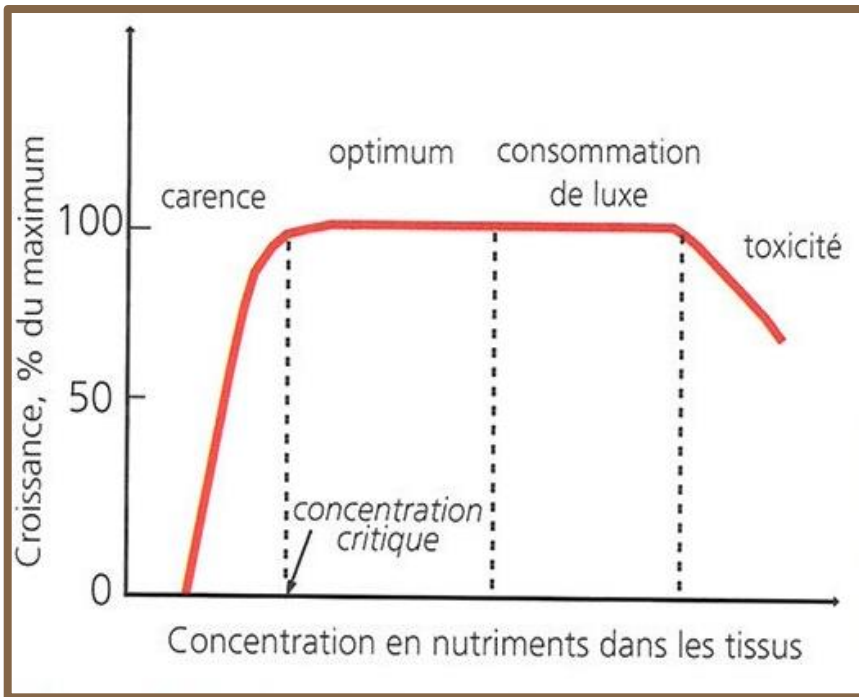
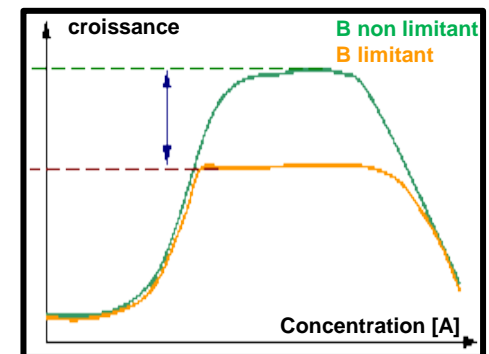


Schéma d'après Epstein 1972 in Botanique - Biologie et Physiologie végétales, MEYER S., REEB C. et BOSDEVEIX R. (2008)

Une carence concernant un oligoélément peut nuire à la production autant qu'une carence concernant un macro-élément.

Loi du minimum

L'élément qui manque totalement ou se trouve en quantité insuffisante **empêche les autres éléments de produire leurs effets ou du moins diminue leurs actions nutritives.**



http://biophile.free.fr/Cours/L2_PhysioV.html

La notion de consommation de luxe

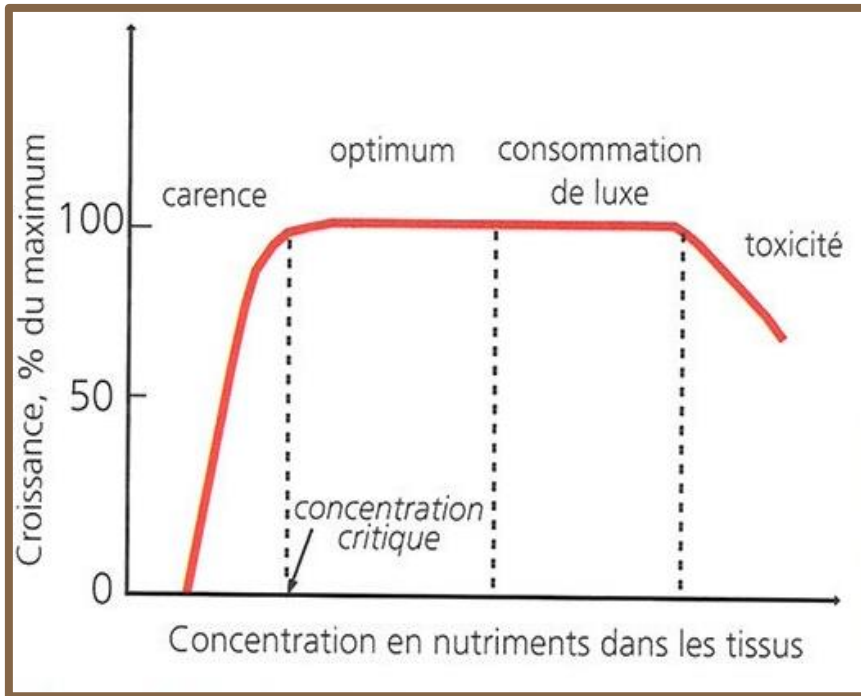


Schéma d'après Epstein 1972 in Botanique - Biologie et Physiologie végétales, MEYER S., REEB C. et BOSDEVEIX R. (2008)

- **au-delà de la concentration critique et pour une gamme de concentrations + ou - large la croissance ne s'améliore pas**

interprétation :

- La plante dépense de l'énergie pour l'absorption d'un élément qui ne lui sert plus à rien.

Conséquence :

- **gaspillage sans bénéfice pour la plante**

Les éléments sont stockés dans la vacuole.

→ Investissement parfois rentable à long terme car la plante peut ainsi constituer des réserves utilisables en cas de nécessité accidentelle.

Toxicité et Résistance aux métaux lourds

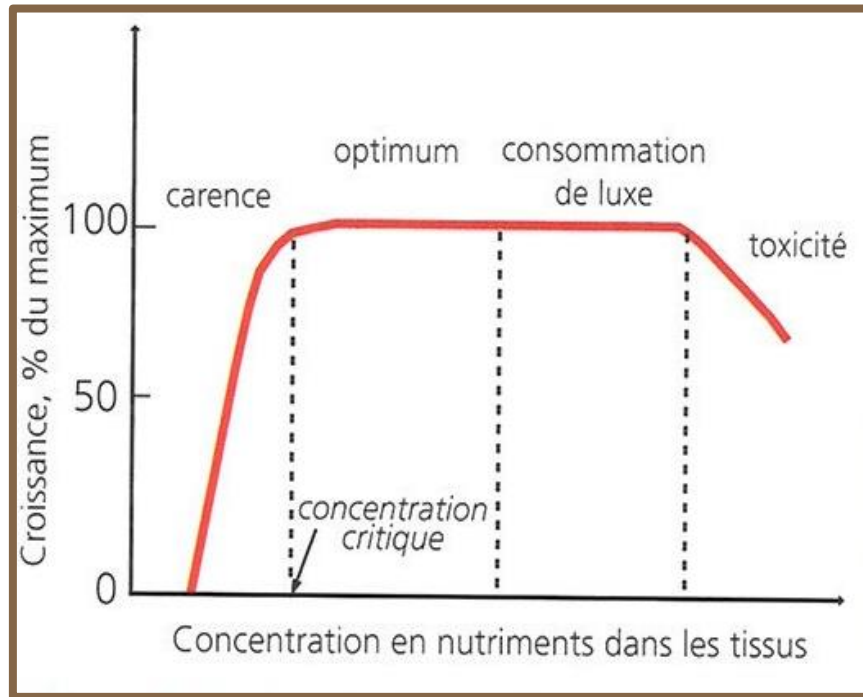


Schéma d'après Epstein 1972 in Botanique - Biologie et Physiologie végétales, MEYER S., REEB C. et BOSDEVEIX R. (2008)

Stratégies de résistance à la toxicité

- stockage dans les parois cellulaires
- imperméabilité de la membrane cytoplasmique
- chélation / complexation à des protéines, à des acides organiques ou à des minéraux dans la vacuole
- résistance génétique : mutants métallo-résistants (métallophytes)

Application : la phytoremédiation

Utiliser les plantes bio-accumulatrices des métaux pour nettoyer les sols ou les eaux contaminés

1. Les besoins nutritifs des végétaux

2. Rôle biologique des minéraux

3. Besoins quantitatifs

4. L'absorption minérale

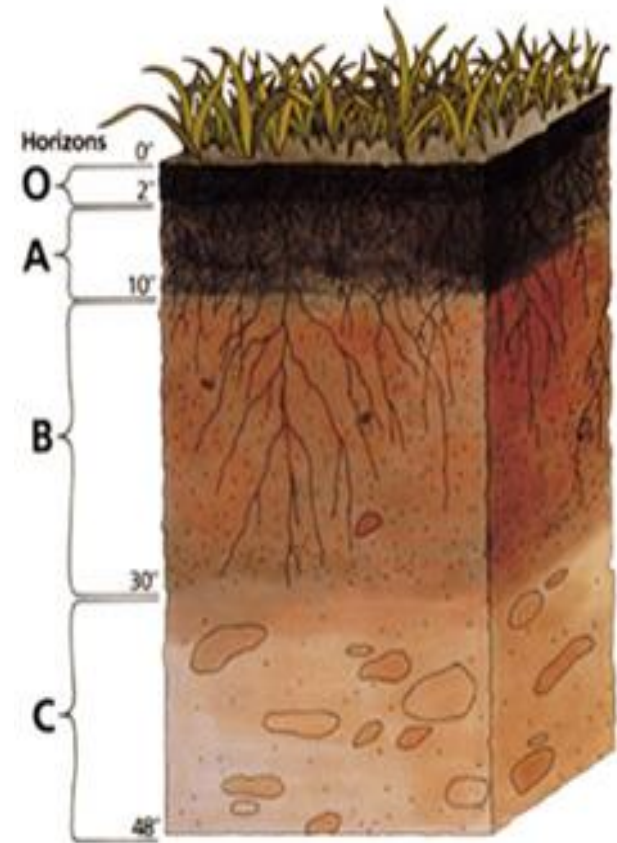
4.1. Modalités, cinétique et facteurs de variation

4.2. Mécanisme

Rappel : les horizons du sol

On distingue de bas en haut :

- **L'horizon profond de la roche-mère (C)**
formant le substrat minéral
- **L'horizon illuvial (B)**
zone d'accumulation des corps
entraînés par le lessivage des eaux
de pluie
- **L'horizon éluvial (A)**
horizon le plus superficiel, c'est celui
qui **présente le maximum d'intérêt
pour les plantes.**

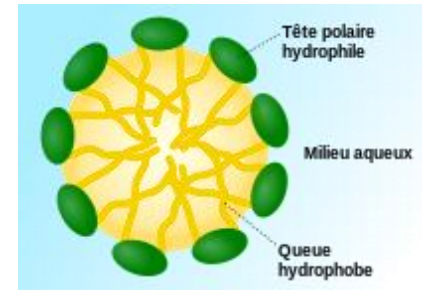


La texture du sol dans les horizons A et B est celle d'un système hétérogène associant :

substance comportant deux phases distinctes. L'une de ces deux phases dite discontinue est constituée de particules très petites et diffusées dans l'autre phase.

Structure d'une micelle

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Micelle>



- des **colloïdes** formées de micelles minérales (argileuses) ou organiques (humiques), dispersées dans **la solution du sol**.
- des **particules minérales** provenant de la roche mère

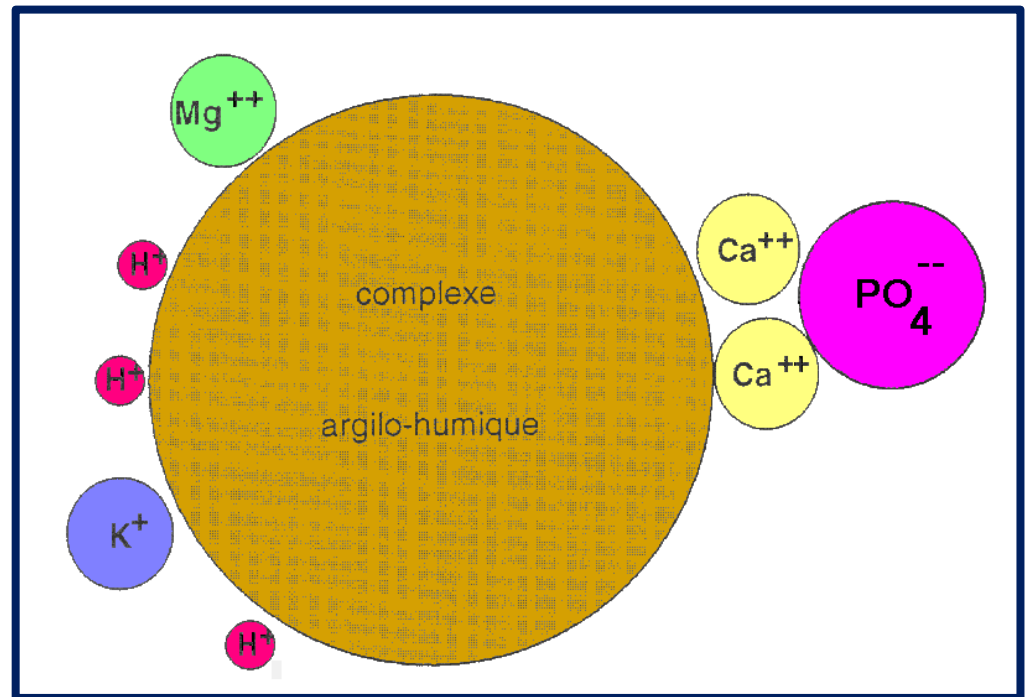
L'ensemble forme ce que l'on appelle le **complexe argilo-humique CAH**.

Rétention des minéraux par le complexe argilo-humique

- **adsorption** = rétention des ions à la surface du CAH en raison de l'existence de charges électriques contraires qui s'attirent
- **pouvoir adsorbant du CAH**
= capacité à retenir à sa surface des cations provenant de la solution du sol

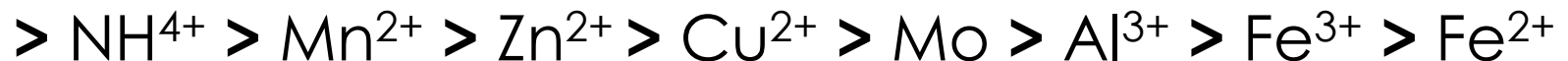
Les **macro-éléments**
Ca, Mg, K, P et S sont
bien représentés **dans**
la solution du sol

A l'inverse,
Si, Fe, Al se solubilisent
très mal.



La fixation des cations est **sélective**.

Par ordre d'adsorption décroissante, on a :



Cette loi se vérifie pour un **équilibre des concentrations**, autrement dit à **iso-concentration** pour les minéraux en compétition.

La fixation des cations est **réversible**.

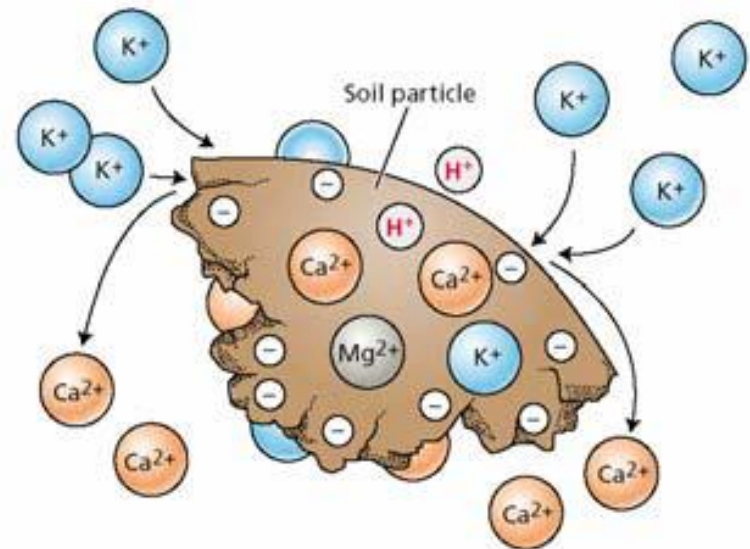
→ échange de cations par désorption

→ notion d'équilibre

adsorption / désorption

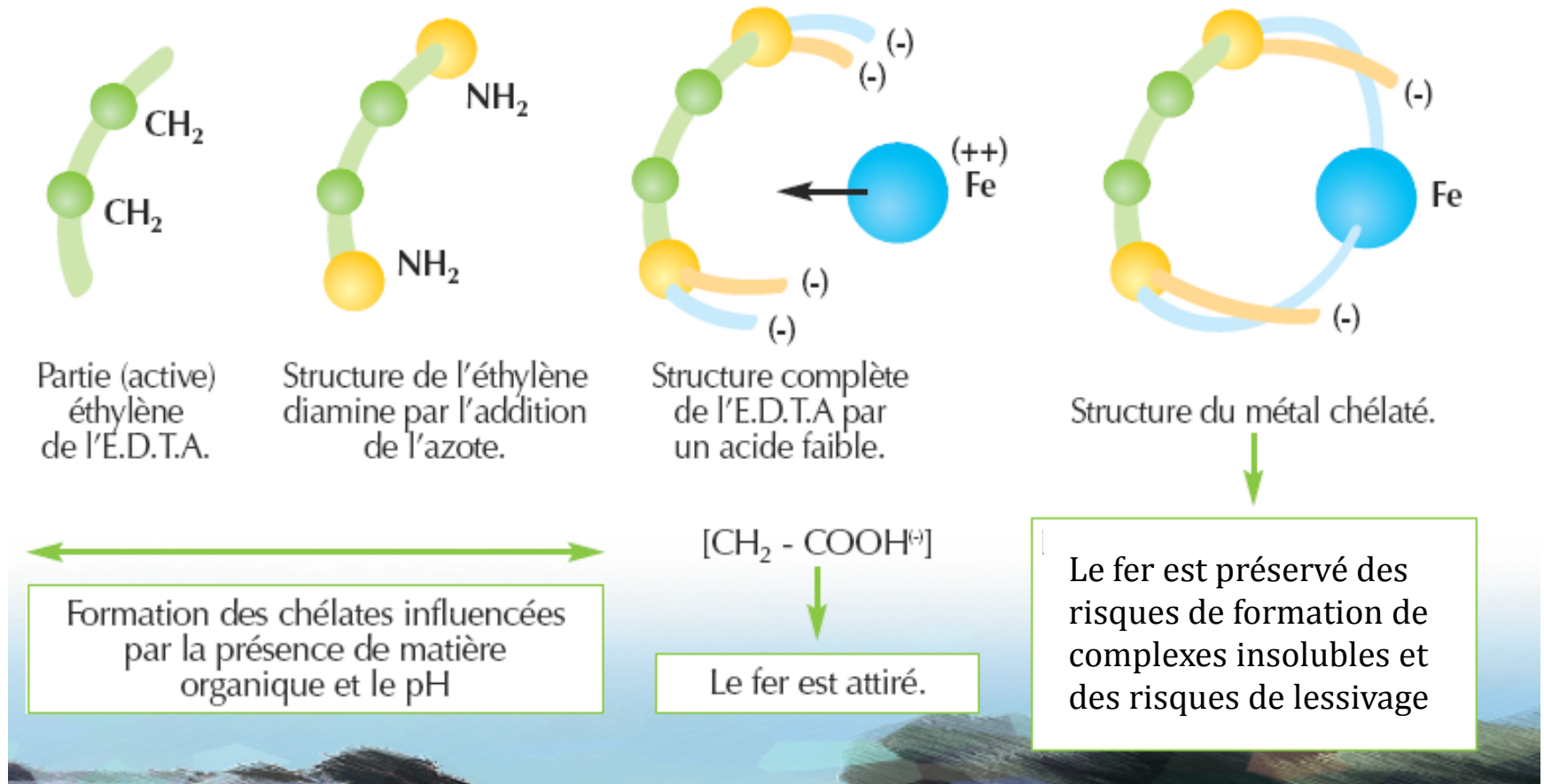
ions libres en solution / ions adsorbés

Equilibre dynamique entre le CAH,
la solution du sol et la racine



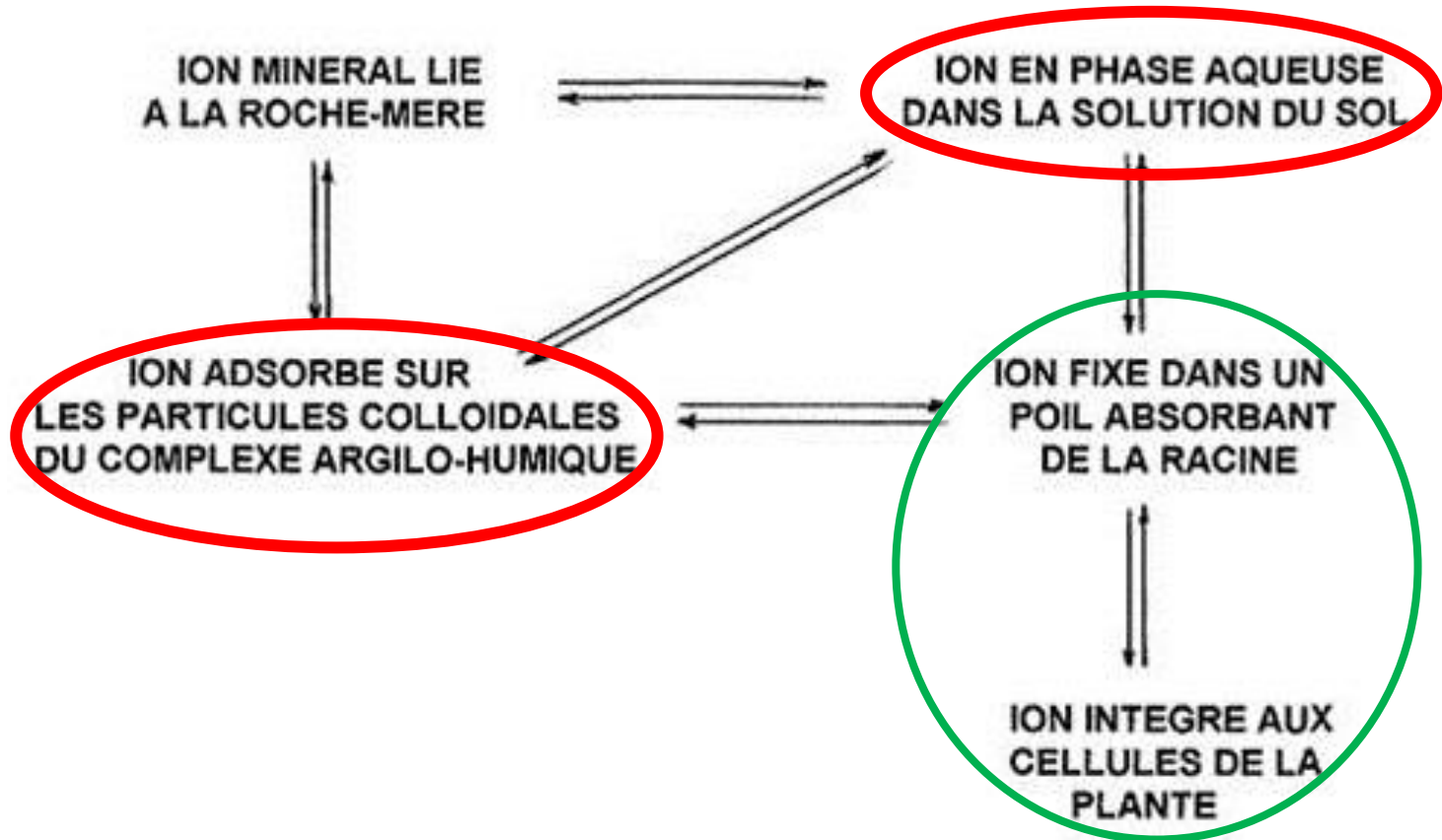
- Chélation = capacité à soustraire les éléments métalliques d'un milieu
= **séquestration**
- **Chélat** = **complexe organo-métallique** très stable où un ion métallique (Fe, Zn, Ca, Mg ...) est inséré dans une molécule organique (= chélateur), recourbé comme une **pince** (en grec *chêle* = pince)
- Les **acides humiques** sont les principaux chélateurs présents dans un sol.

Mécanisme de chélation du fer par l'EDTA



EDTA = Ethylène Diamine Tétra Acétique = acide éthylène diamine tétra acétique = $\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{N}_2\text{O}_8$

Les échanges d'ions minéraux entre le sol et la plante



La collecte des nutriments par les racines

Système racinaire → très dynamique :



https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b5/Roots_of_hedera_helix_and_other_plants_delaminated_from_brick_wall_near_water_Lamiot_2016_07.jpg

- **s'allonge et se ramifie de façon importante**

- **se renouvelle sans cesse**

les racines meurent et se renouvellent beaucoup plus fréquemment que l'appareil aérien

- **explore un très important volume de sol**

(Un chêne rouge adulte a environ 500 millions d'apex racinaires vivants)



[https://fr.wikipedia.org/wiki/Racine_\(botanique\)#/media/File:Exposed_mango_tree_roots.jpg](https://fr.wikipedia.org/wiki/Racine_(botanique)#/media/File:Exposed_mango_tree_roots.jpg)

La collecte des nutriments par les racines

L'**interface sol racine** est déterminante :



- **très grand nombre de poils absorbants**

- contact assuré par **un mucigel**

d'origine végétale (secrété par la coiffe) et d'origine bactérienne
=> faciliter l'absorption d'eau et d'éléments minéraux

- espèces ligneuses : présence de **mycorhizes**

Le champignon **augmente la surface d'absorption** des racines

=> environ 100 fois plus importante

Le champignon **augmente l'exploitation des ressources**
par les racines

La mycorhization : un échange à bénéfice réciproque

Le champignon **améliore l'absorption** :
du K, de l'N, du Zn, du Cu, de l'eau

Le champignon permet **d'exploiter la matière organique** ; il excrète :

- **des enzymes** qui dégradent la matière **organique** en **a. a. et phosphate** qu'il absorbe et transfère à la racine.
- **des protons** qui destabilisent **les particules minérales insolubles**

Le végétal fournit en retour des

glucides issus de la **photosynthèse**

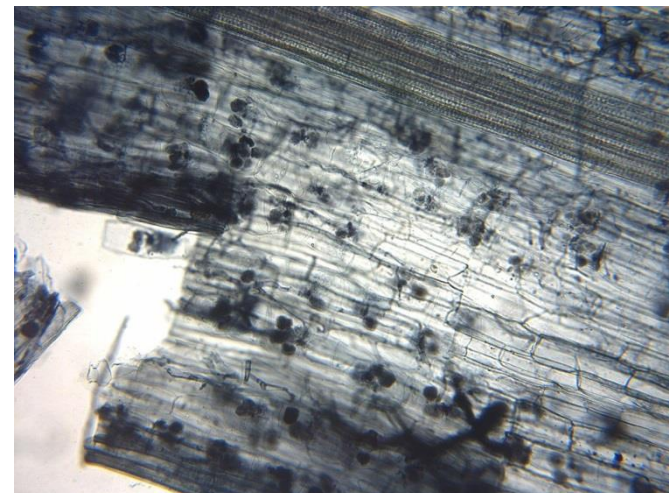
Les deux partenaires échangent aussi des hormones et des vitamines.

manchons mycorhiziens d'amanite gainant un réseau de radicelles



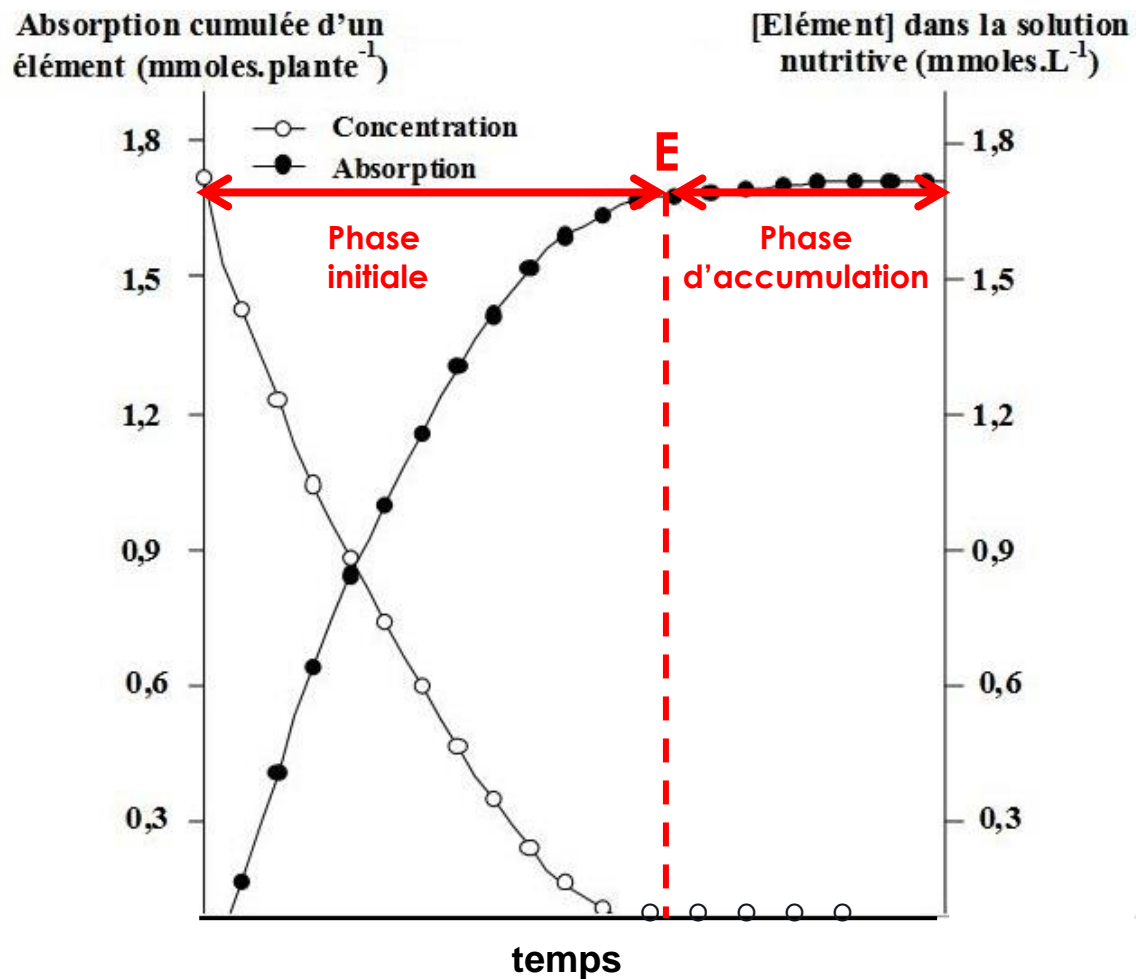
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Mycorhize#/media/File:Mycorrhizal_root_tips_\(amanita\).jpg](https://fr.wikipedia.org/wiki/Mycorhize#/media/File:Mycorrhizal_root_tips_(amanita).jpg)

Endomycorhize ; forme de symbiose très courante chez les plantes (y compris chez des espèces cultivées comme le blé)

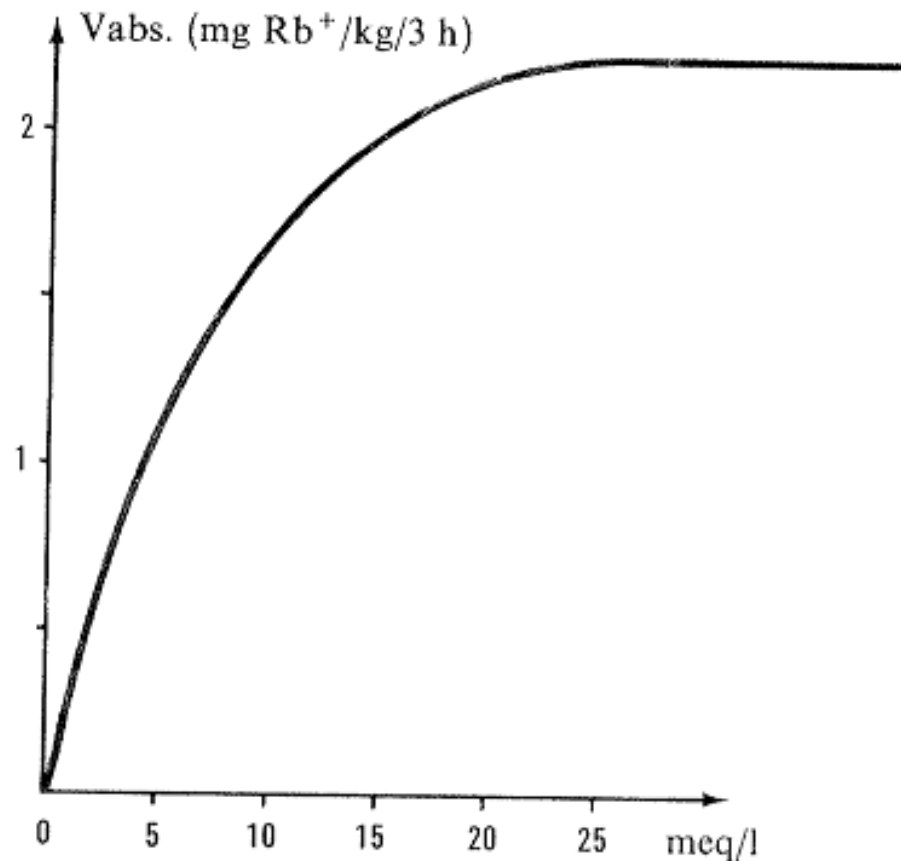


https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Arbuscular_mycorrhiza_microscope.jpg

Cinétique de l'absorption minérale



Facteur de variation : la concentration



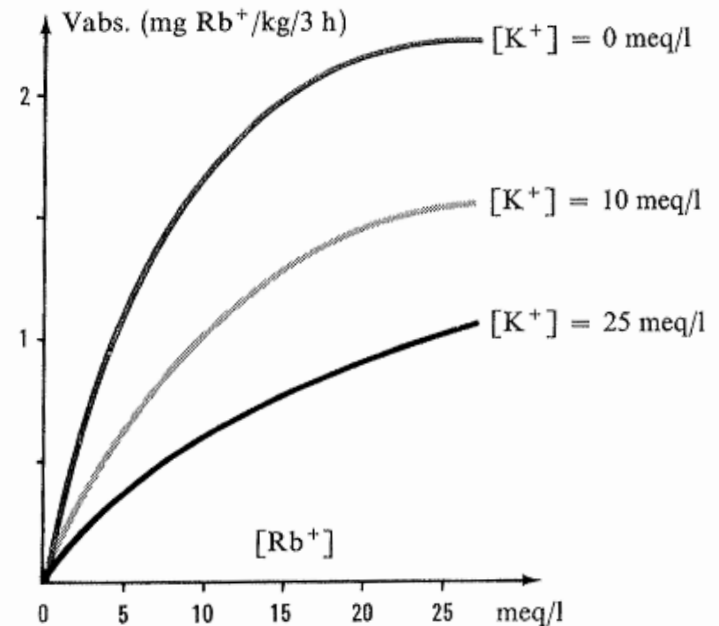
Absorption du rubidium par des racines d'Orge excisées.
Effet concentration.

In MAZLIAK, 1974

Interactions ioniques

ions antagonistes

- si ions de même charge et de taille semblable
- Absorption de l'ion A inhibée par la présence d'un autre ion B
=> augmenter la dose de A pour retrouver l'effet souhaité



Absorption du rubidium par des racines d'Orge excisées.
Inhibition compétitive de l'ion potassium

In MAZLIAK, 1974

Interactions ioniques

ions antagonistes

- Ca^{++} / K^+ ou Mg^{++} ou Fe^{++}
- K^+ / Mg^{++} .

Si absorption K^+ trop importante alors absorption Mg^{++} diminue (tétanie d'herbage pour les herbivores)

/!\ la compétition n'est généralement pas symétrique
... sauf NO_3^- et Cl^-

Interactions ioniques

ions synergistes

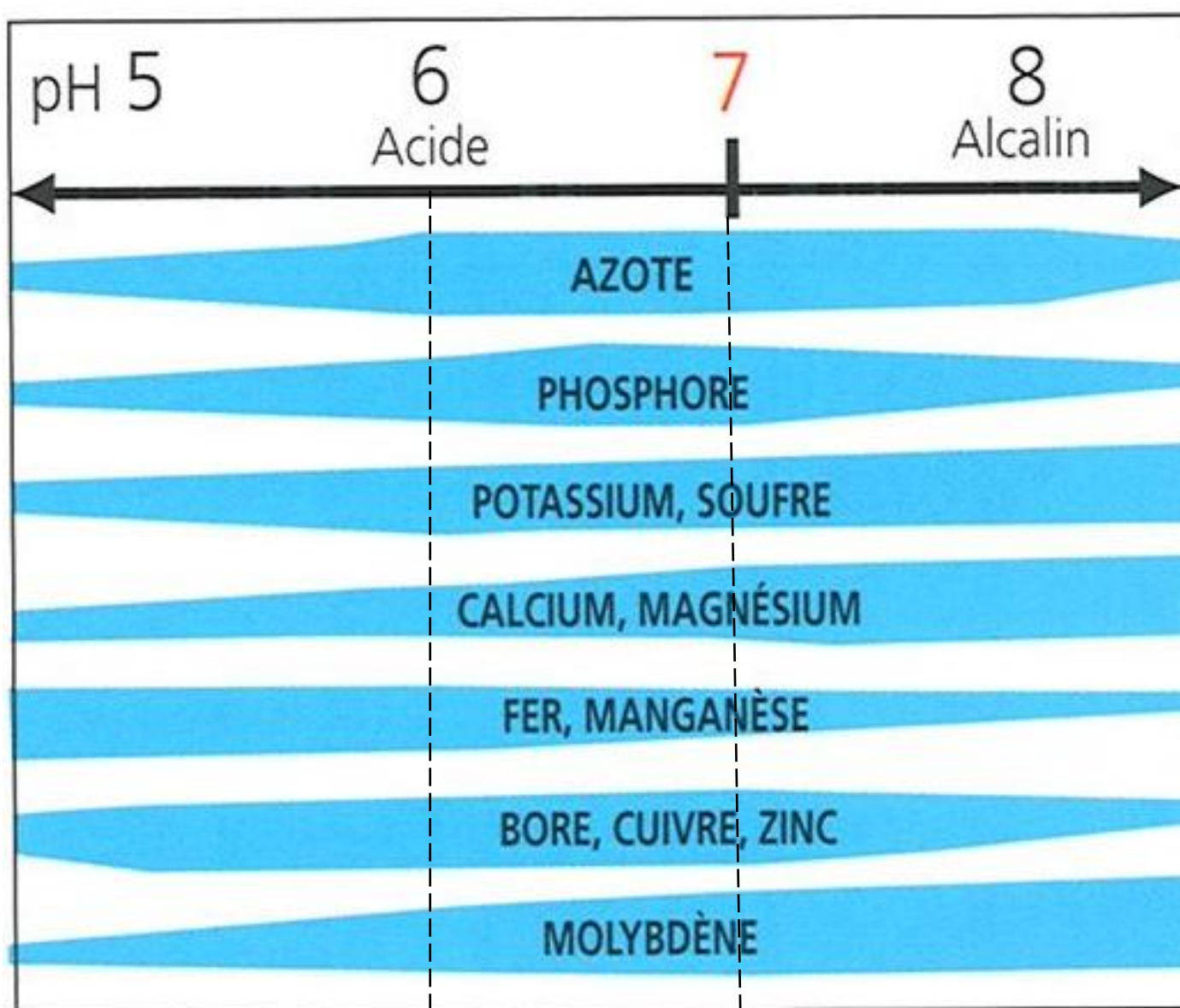
- généralement si ions de charge opposée
- Absorption d'un cation stimulée par la présence d'un anion et inversement
- Explications : nécessité du maintien de l'équilibre des charges, possibilité d'un transport couplé

Interactions ioniques

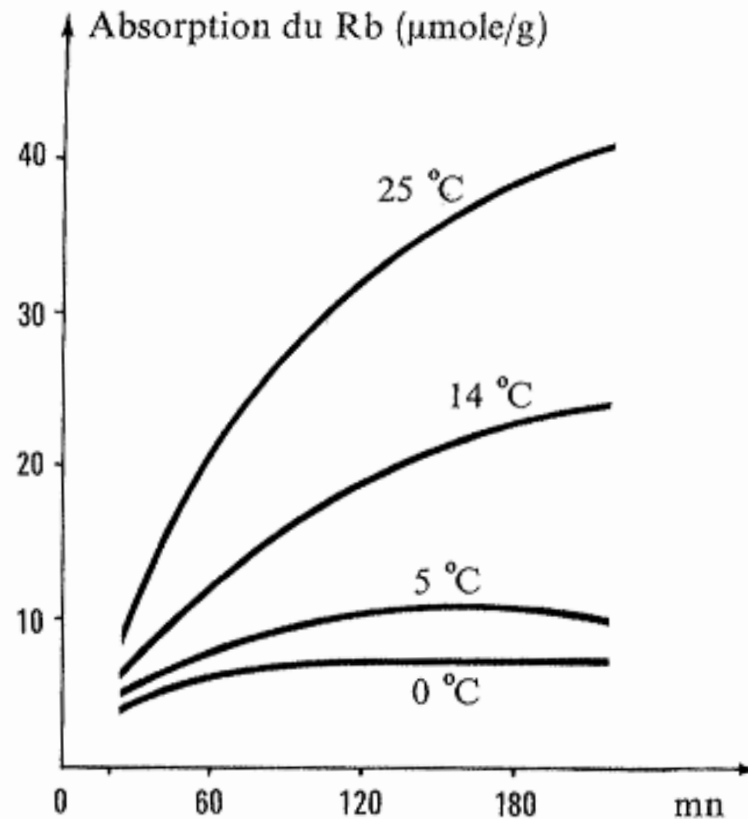
ions synergistes

- Absorption PO_4^{3-} et Mg^{++}
- Absorption K^+ et NO_3^-

Facteur de variation : le pH du sol



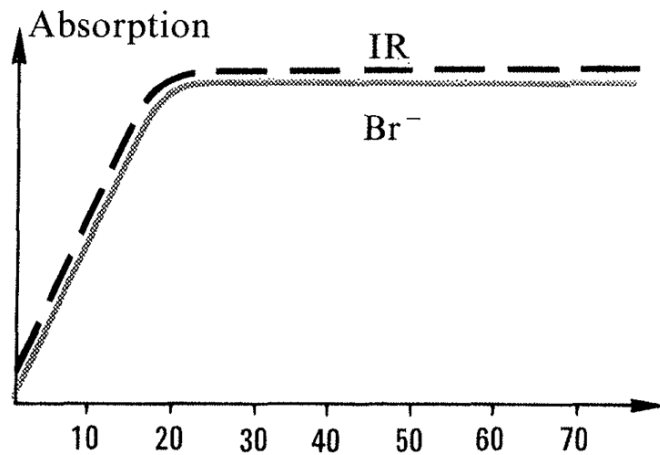
Facteur de variation : la température



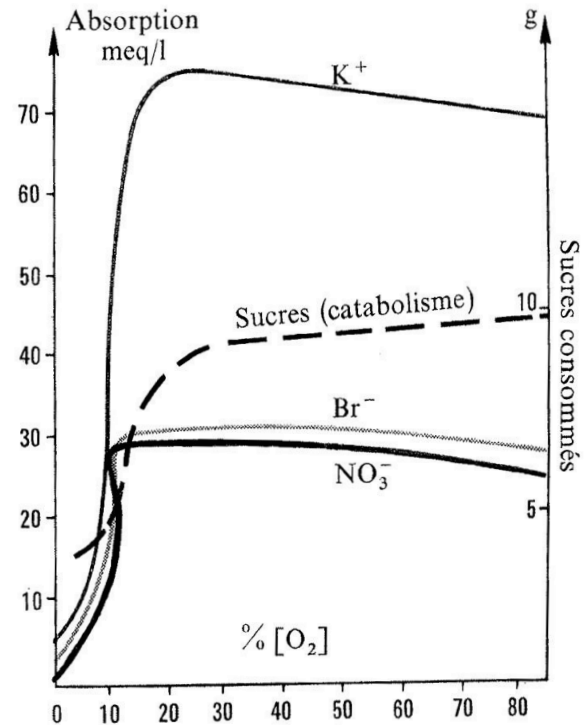
Effet de la température sur l'absorption du rubidium
par des racines d'Orge excisées,

In MAZLIAK, 1974

Facteur de variation : la teneur en oxygène



Absorption d'ions Br^- par des tranches de tubercule de Pomme de terre.
Comparaison avec l'intensité respiratoire.



Effet de la pression partielle d'oxygène sur l'absorption.
Absorption de divers ions par des racines d'Orge excisées.

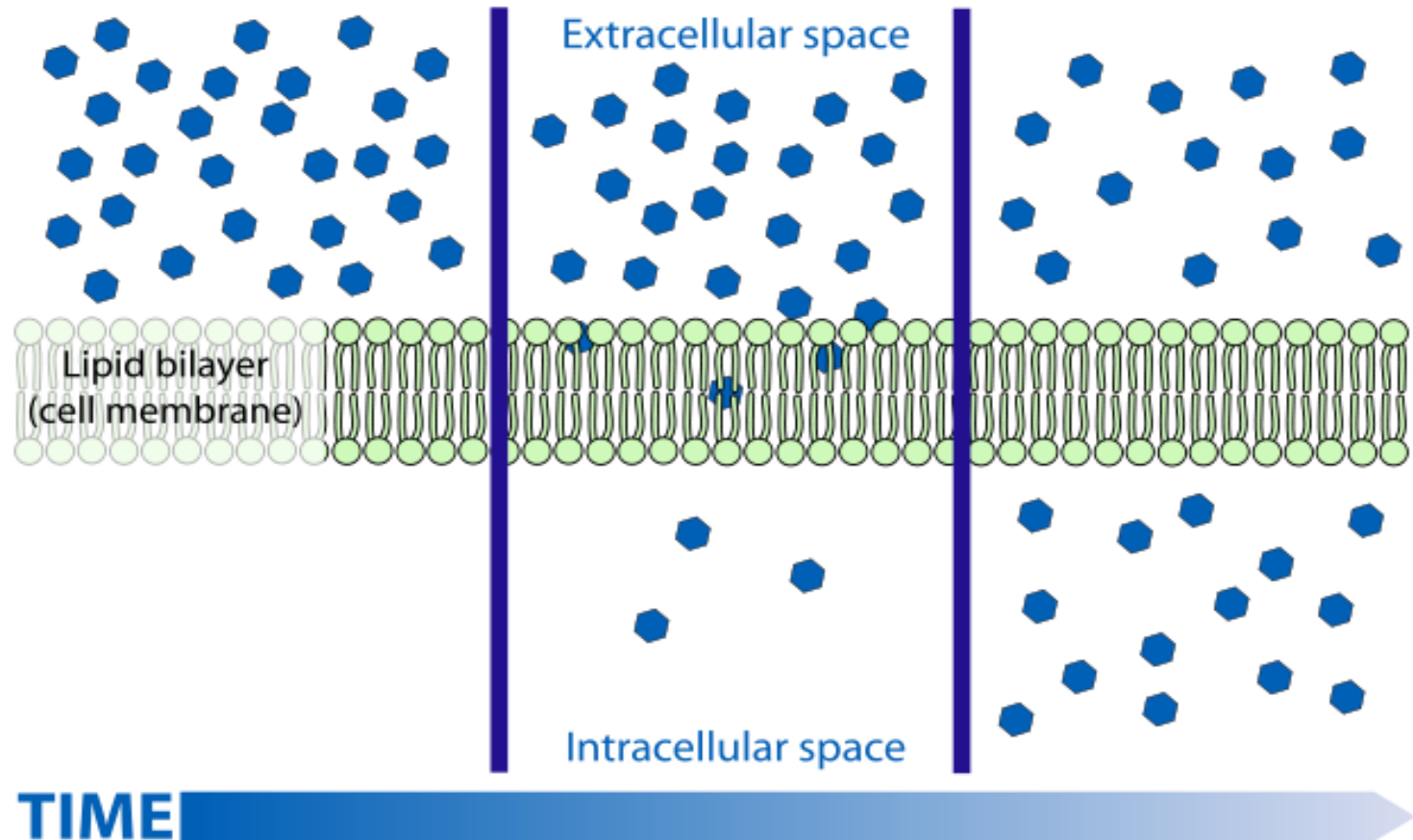
In MAZLIAK, 1974

1. Les besoins nutritifs des végétaux
2. Rôle biologique des minéraux
3. Besoins quantitatifs
4. L'absorption minérale
 - 4.1. Modalités, cinétique et facteurs de variation

4.2. Mécanisme

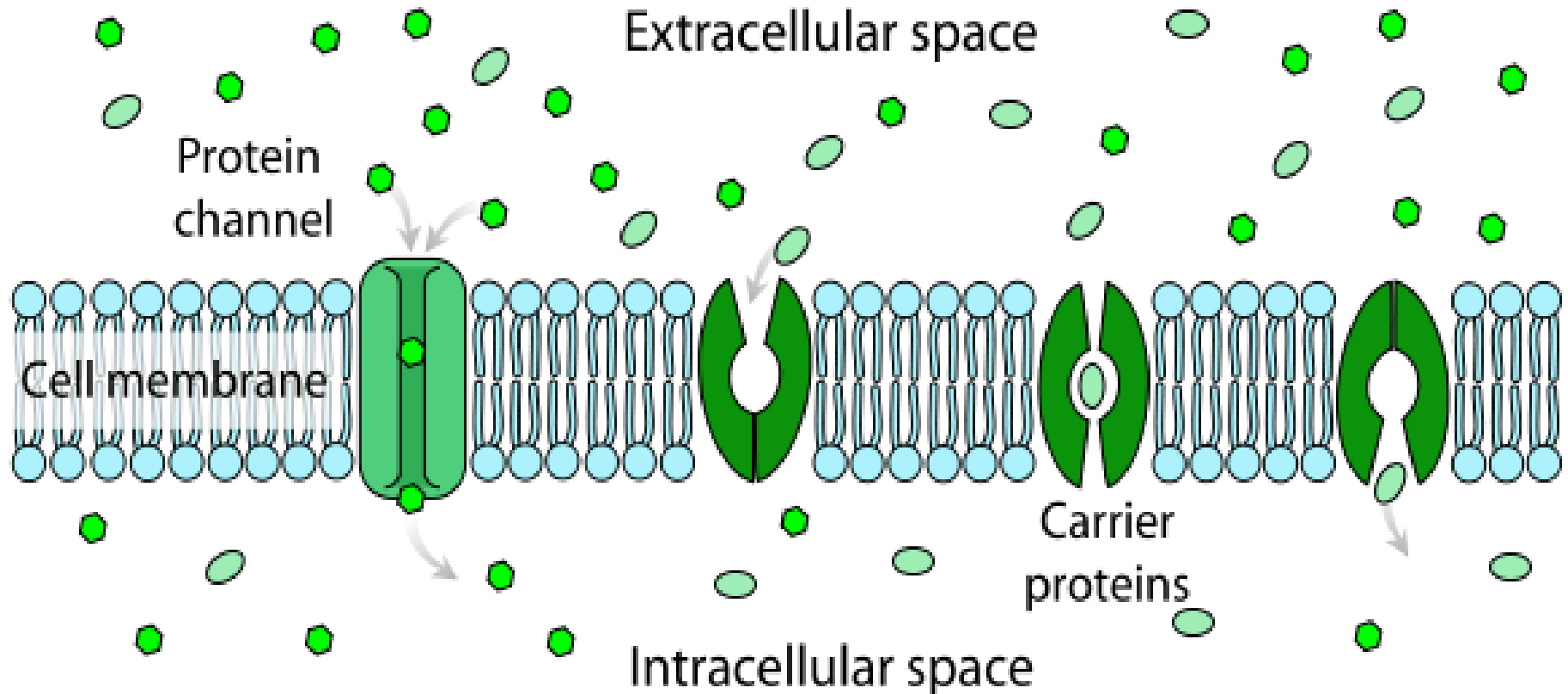
Diffusion simple

- entre les phospholipides => composé hydrophobe = lipophile donc apolaire
- flux proportionnel à la surface de la membrane traversée (loi de Fick) = $k \cdot a \cdot \Delta C$

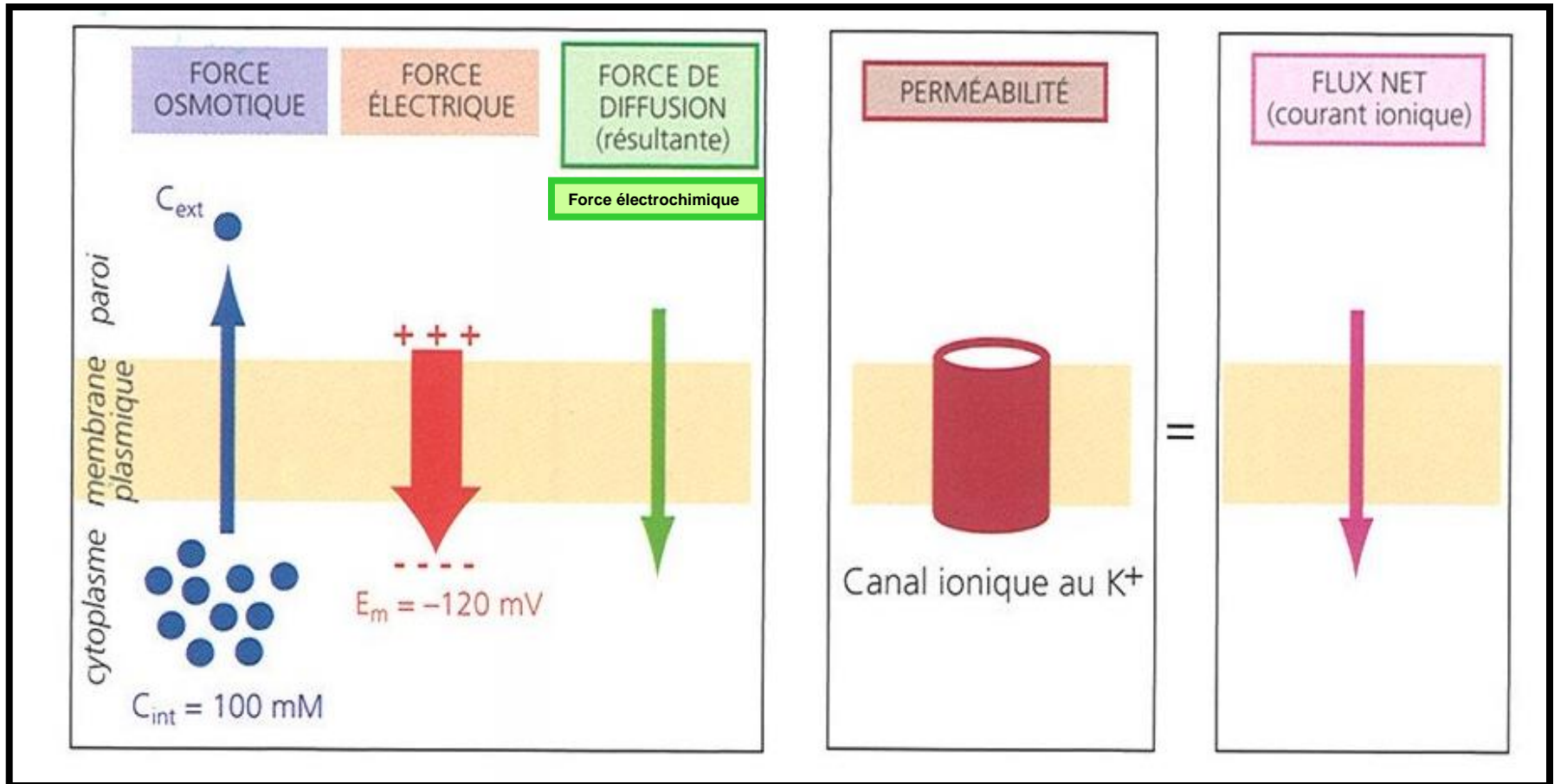


Diffusion facilitée

- moteur du transport = la différence de concentrations
- grâce à des canaux protéiques
- grâce à des protéines de transport
- flux proportionnel à la surface de la membrane traversée limité par le nombre de perméases => risque saturation



Les composantes du transport passif à travers la membrane plasmique exemple du K^+



d'après Botanique - Biologie et Physiologie végétales, MEYER S., REEB C. et BOSDEVEIX R. (2008)

Franchissement des membranes biologiques

vitesse cations > vitesse anions

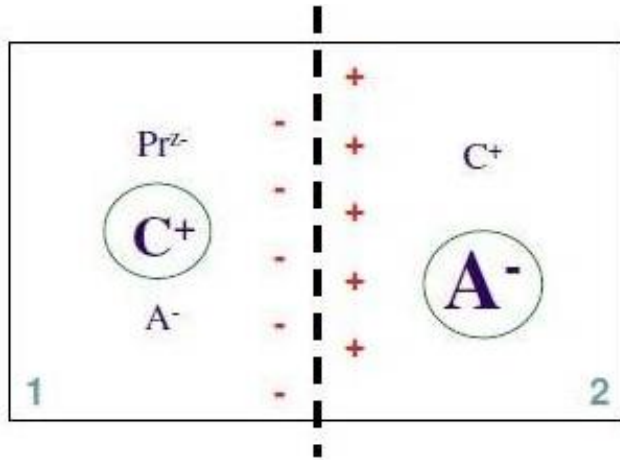


Propriétés de la membrane cellulaire

- une **perméabilité sélective**
- **semi-perméable**
- se comporte comme **une membrane dialysante**

→ membrane dialysante = membrane dont les pores ont un diamètre de l'ordre du nanomètre

Equilibre de Donnan



Aux pH physiologiques, les protéines sont chargées négativement et ont une certaine valence Pr^{z-} .

- Lorsque la protéine est chargée négativement, elle impose un potentiel négatif du côté où elle se trouve
- Les cations diffusibles s'accumulent alors du côté négatif et inversement pour les anions diffusibles
- La protéine ionisée non diffusible est responsable de la **différence de potentiel**:

$$\Delta V = V_1 - V_2$$

Le potentiel de Donnan

C'est l'effet Donnan

Equilibre de Donnan

Les concentrations en ions diffusibles de part et d'autre de la membrane **ne peuvent s'équilibrer** en raison de la présence des macromolécules chargées qui ne diffusent pas.

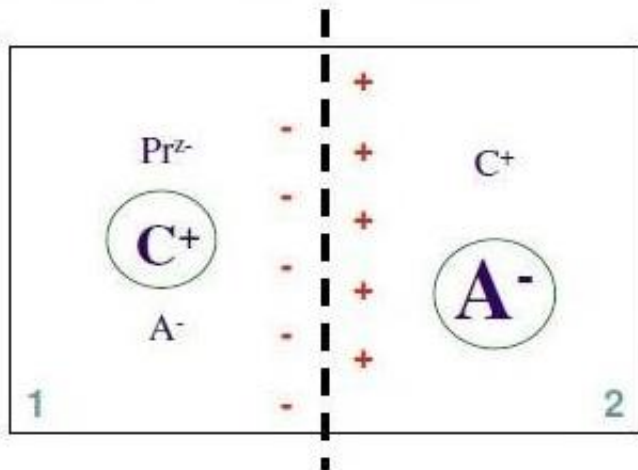
→ **inégalité des concentrations ioniques**

Les ions diffusent de part et d'autre de la membrane jusqu'à **équilibrer les charges.**

→ **électroneutralité**

Equilibre de Donnan

Equations de Donnan :



A l'équilibre, l'électro-neutralité est vérifiée dans les deux compartiments.

$$[C^+]_1[A^-]_1 = [C^+]_2[A^-]_2$$

$$R = \frac{[\text{Côté le plus concentré}]}{[\text{Côté le moins concentré}]} = \frac{[C^+]_1}{[C^+]_2} = \frac{[A^-]_2}{[A^-]_1}$$

Transport actif

- contre le gradient électrochimique
- au prix d'une dépense énergétique
- couplage avec une réaction exergonique

généralement l'hydrolyse de l'ATP



pompe à Na^+ K^+
pompe à protons

Transport actif primaire

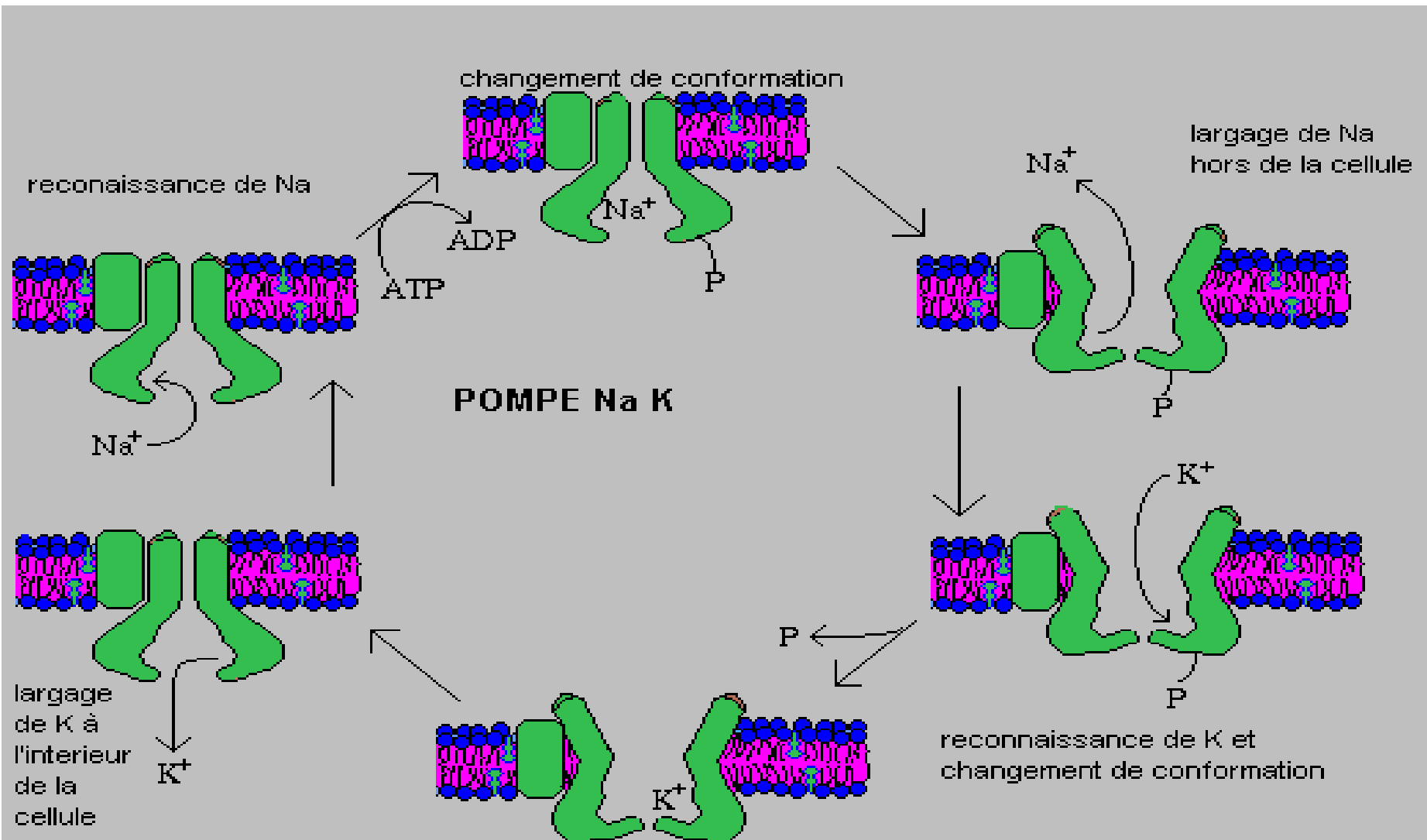
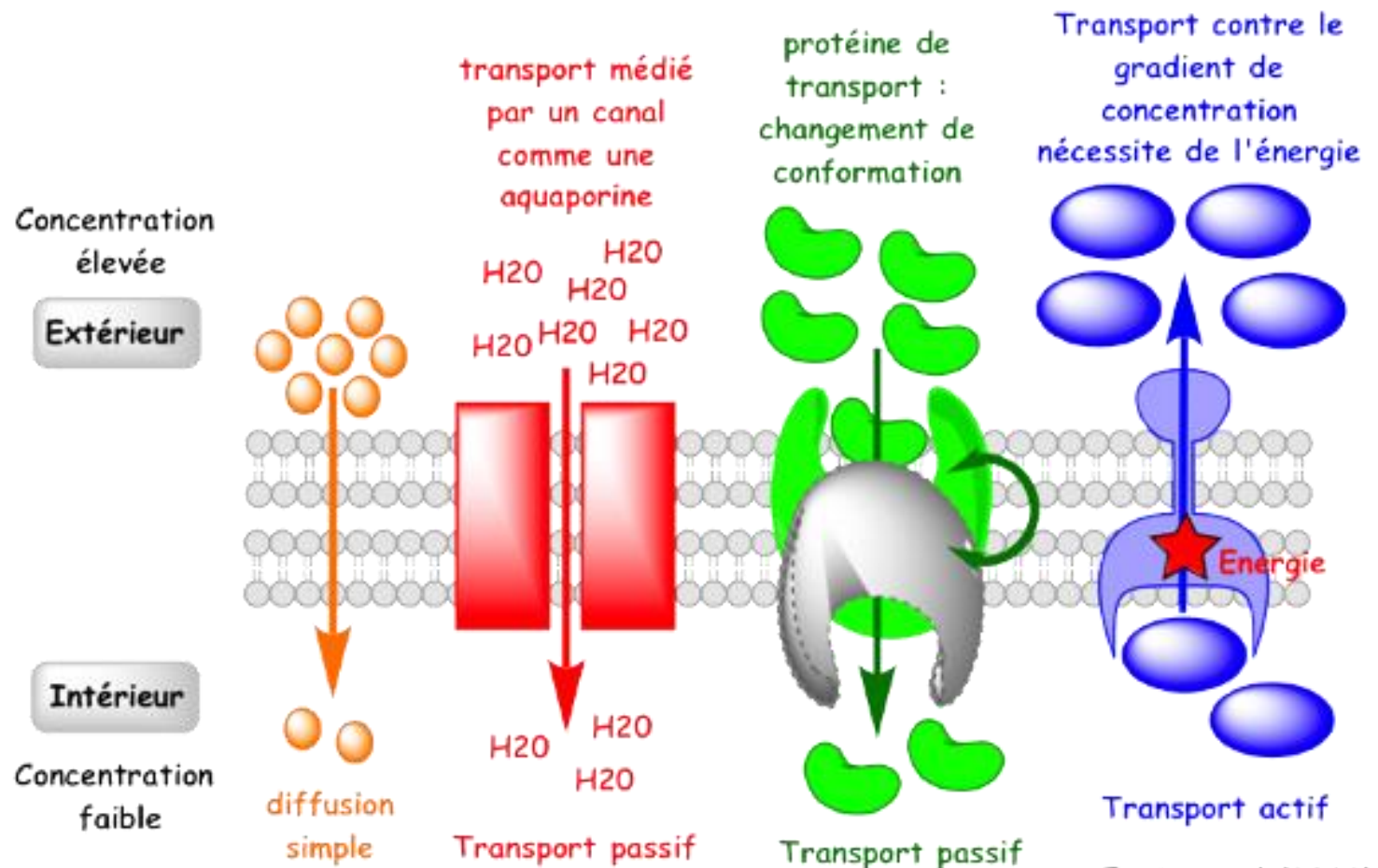
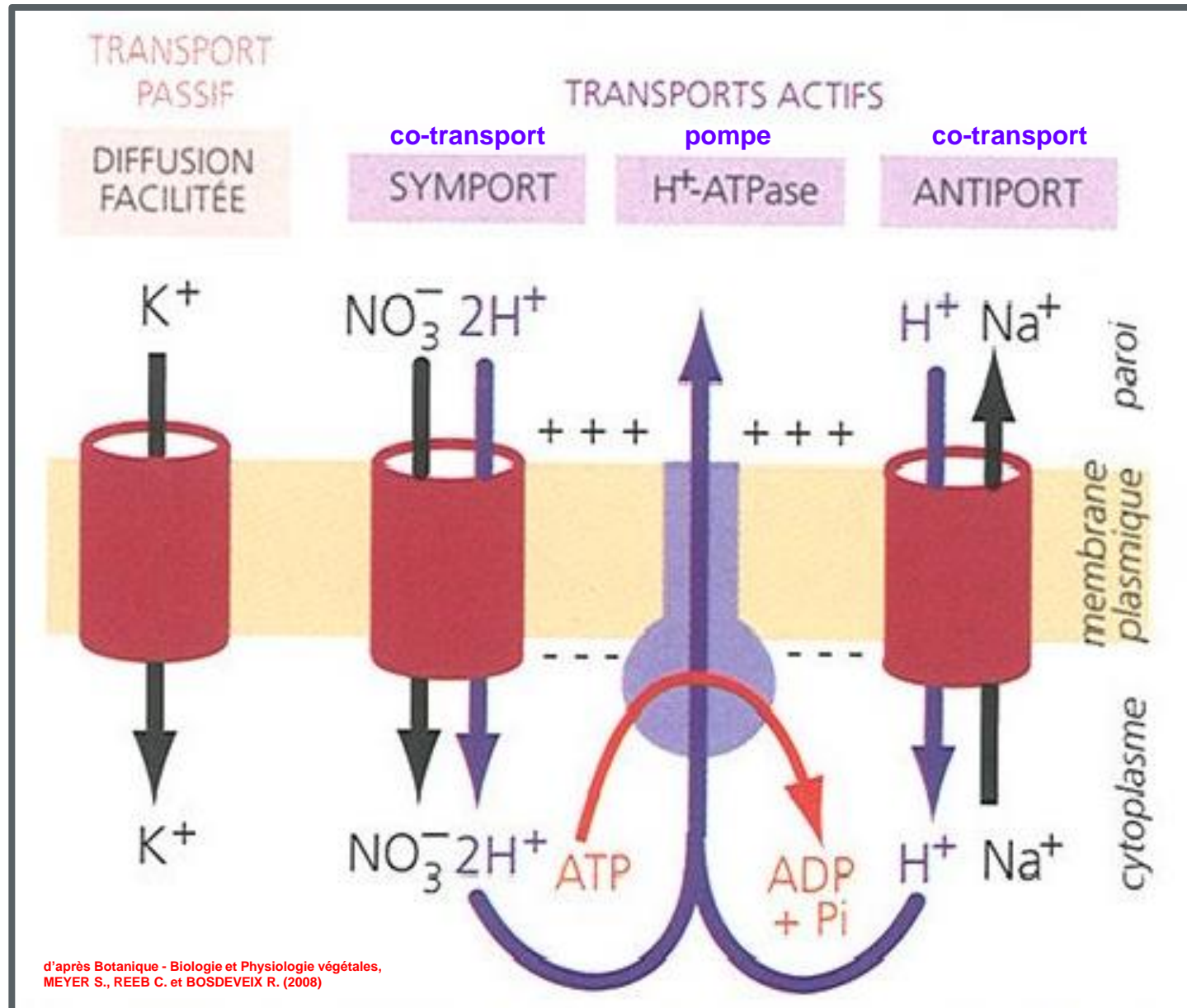


Schéma général des transports actif et passif



E. Jaspard (2012)

Schéma général des transports actif et passif



Destinée des ions absorbés

- **Rétention au niveau des membranes cellulaires :**
cas du Ca^{++} ou Na^+
- **Migration vers l'intérieur des cellules :** cas du K^+ , Cl^- ,
des NO_3^- , H_2PO_4^- ...
→ rôle plastique ou rôle catalytique
- **Sortie :** cas des ions exsorbables et des ions échangeables