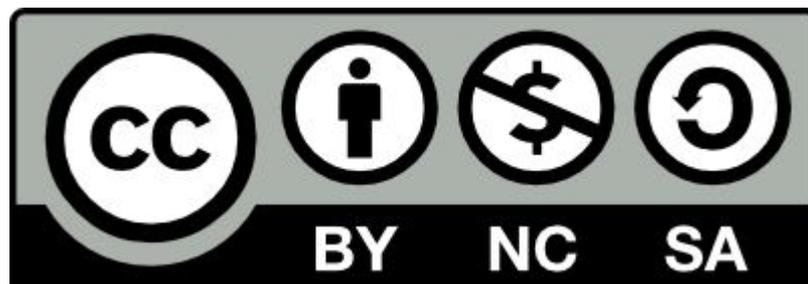


Ce document est autorisé sous la Licence CC BY-NC-SA 4.0.

Pour obtenir une copie de cette License, veuillez consulter :

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Pour les documents traduits, nous vous suggérons de donner crédit à l'auteur(s) original(s) et au(x) traducteur(s).





Théorie des instruments des échanges gazeux foliaires

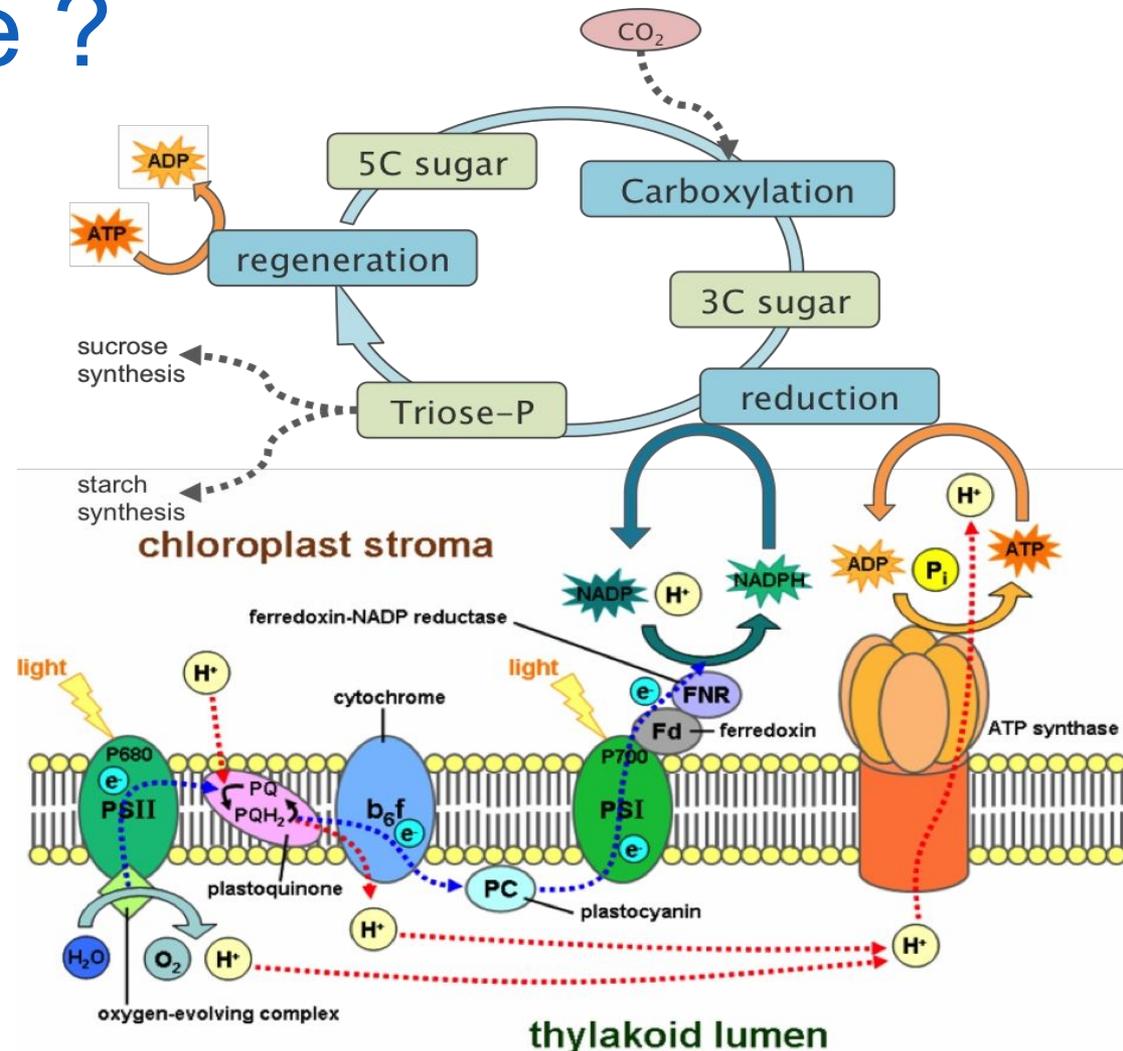
Comment le LI-6800 fonctionne
et ce qu'il peut vous renseigner

Copyright © 2019 LI-COR, Inc. Tous droits réservés.
Veuillez contacter LI-COR pour obtenir l'autorisation de
redistribution.

LI-COR[®]

Comment mesure-t-on la photosynthèse ?

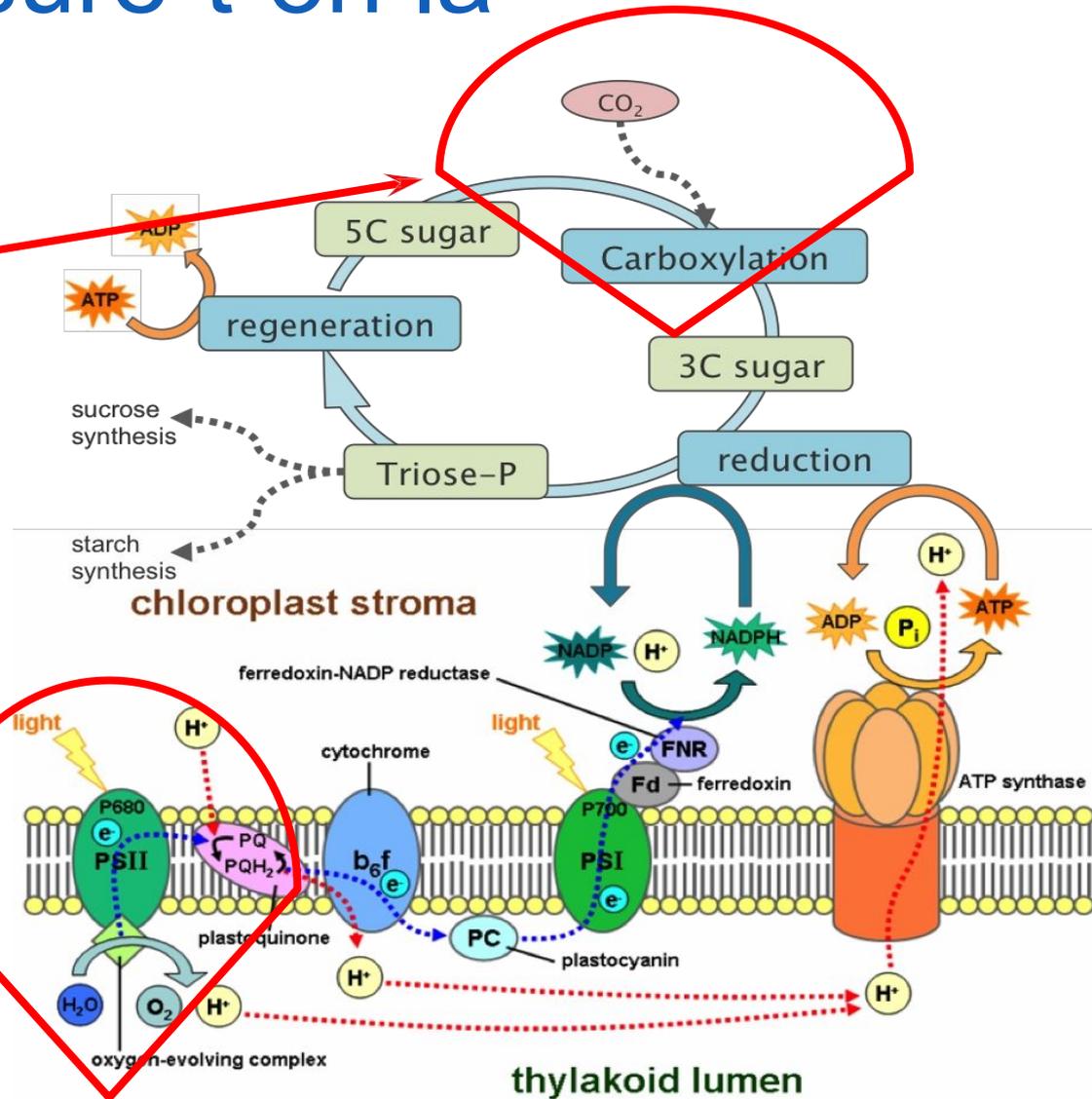
- Photosynthèse
- Échange de gaz
- Assimilation



Comment mesure-t-on la photochimie ?

Échange de gaz

Fluorescence de la chlorophylle



Comment mesure-t-on les échanges gazeux ?

- Il faut d'abord mesurer la concentration d'un ou de plusieurs gaz

$$A'_{(\nu)} = 1 - e^{-k_{(\nu)}wl}$$

w = densité de l'absorbeur

l = longueur du chemin

ν = longueur d'onde

A' = absorption de la lumière

$k(\nu)$ = coefficient d'absorption

Comment l'échange gazeux est-il mesuré ?

- Absorption infrarouge par les gaz

$$\alpha + T = 1$$

$$\alpha = 1 - T$$

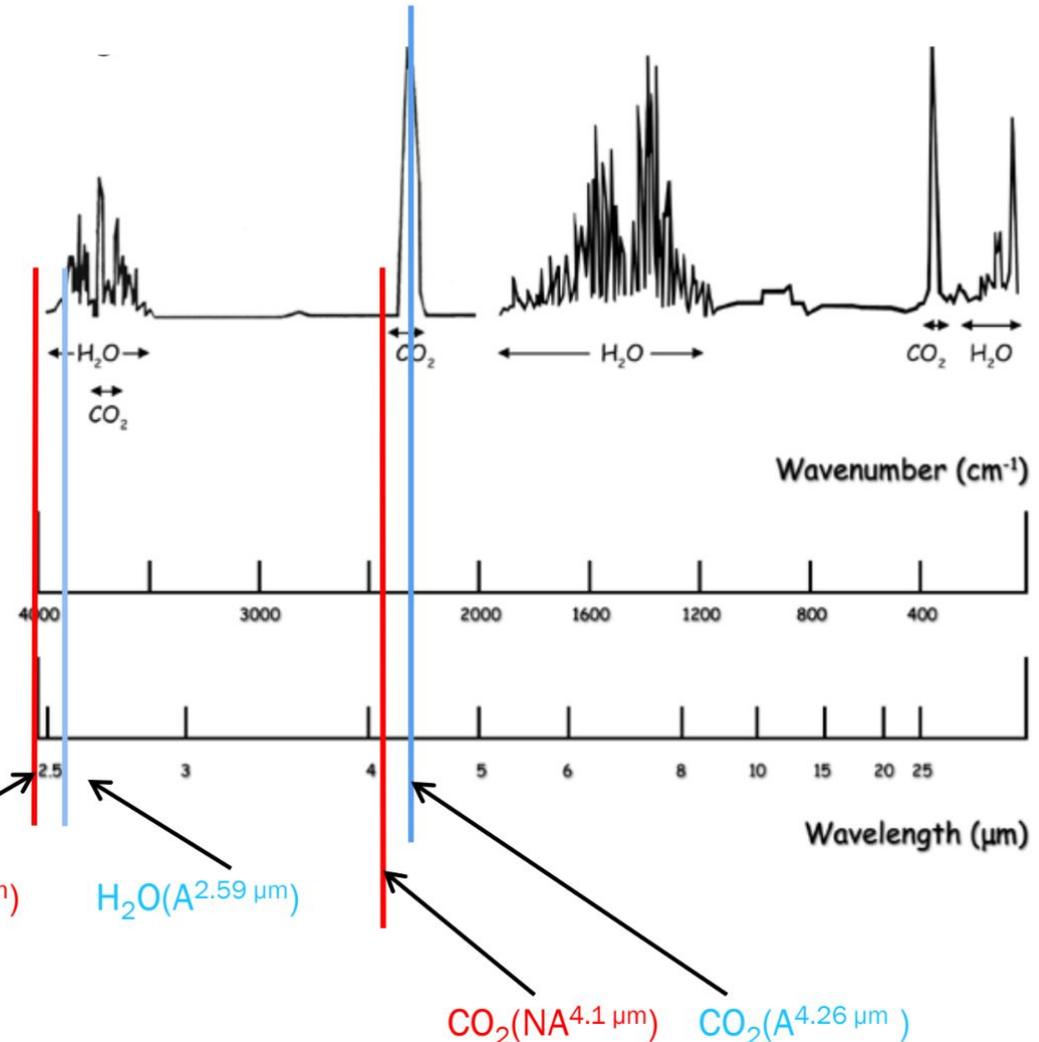
$$\alpha = 1 - \frac{\Phi_A}{\Phi_{NA}}$$

α = absorbance

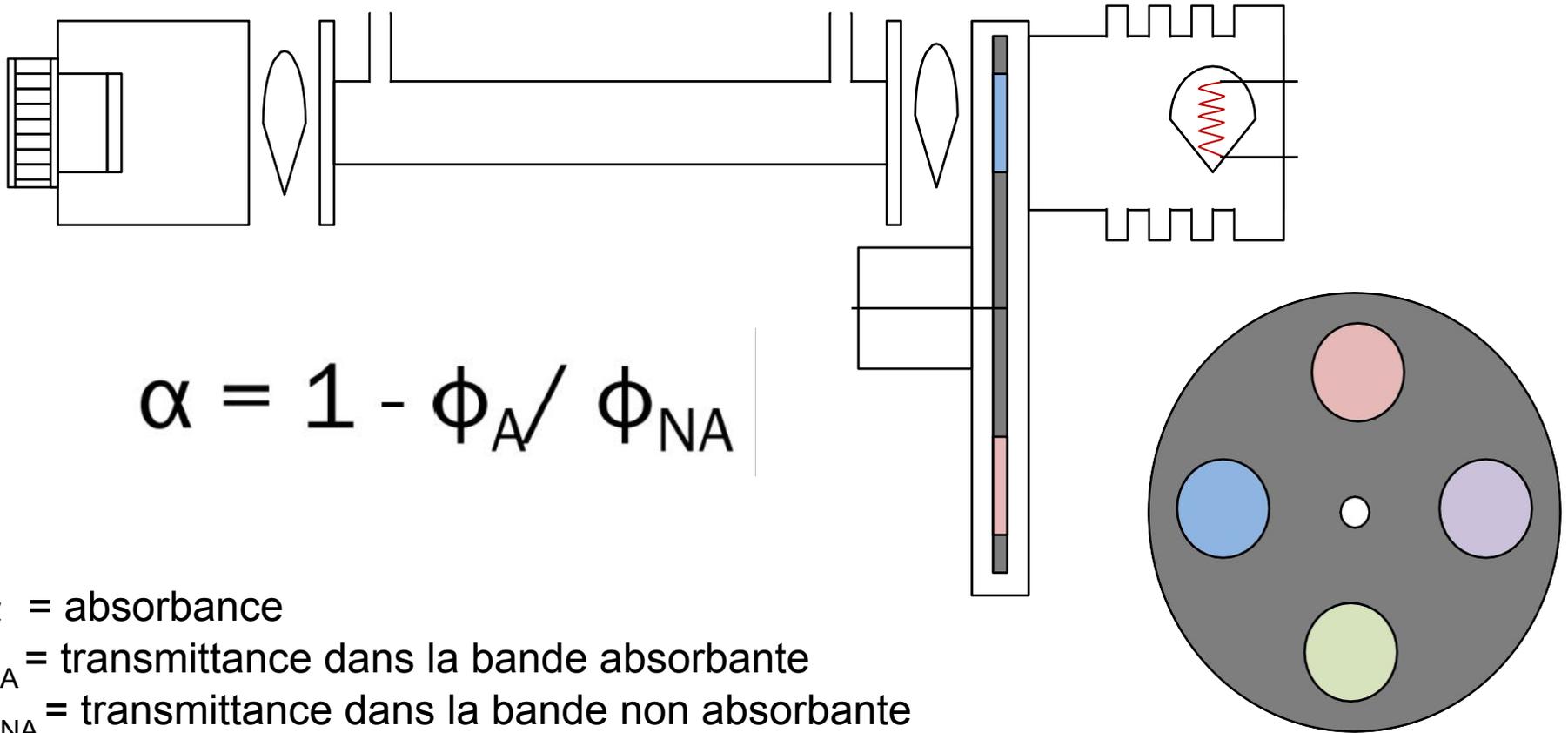
T = transmittance

Φ_A = transmittance dans la région absorbante

Φ_{NA} = transmittance dans la région non absorbante



Différentiel optique de base IRGA



$$\alpha = 1 - \frac{\phi_A}{\phi_{NA}}$$

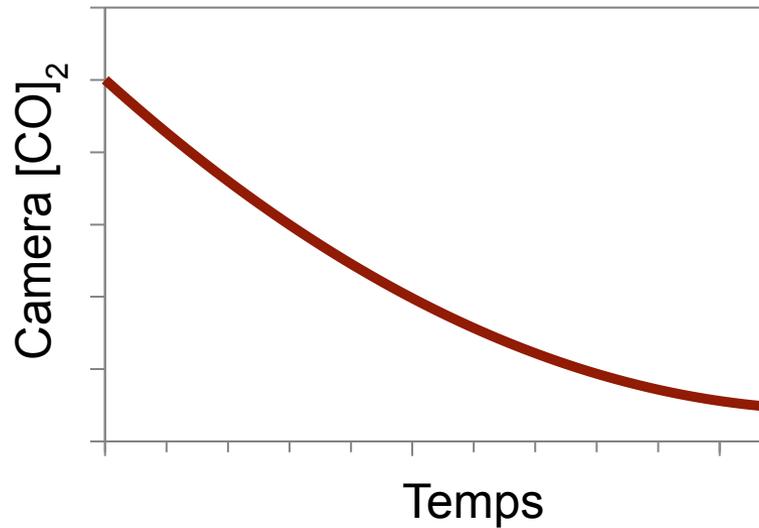
α = absorbance

ϕ_A = transmittance dans la bande absorbante

ϕ_{NA} = transmittance dans la bande non absorbante

Systemes d'echanges de gaz

- Transfert ferme
- Compensation



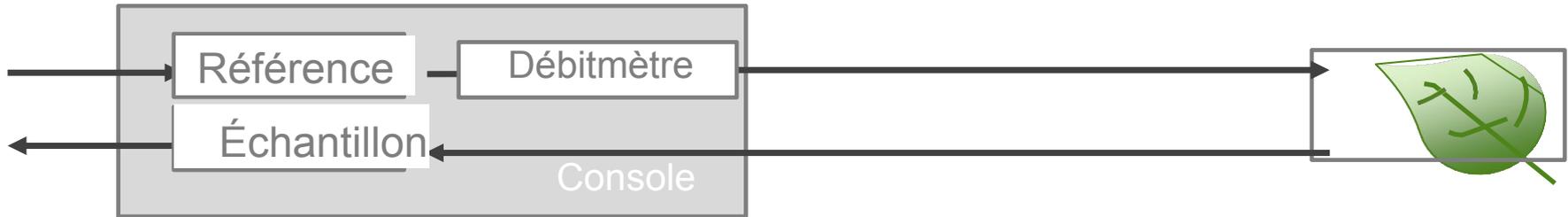
Systemes d'echanges de gaz

- Transfer ferme
- Compensation
- Flux ouvert
« traversant »

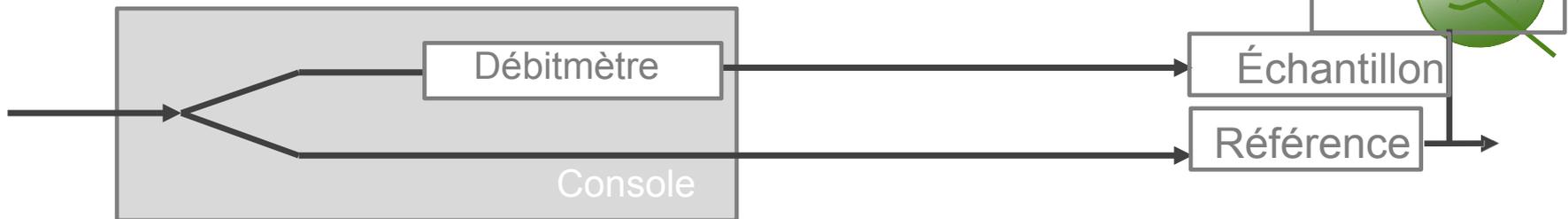


Débit du système

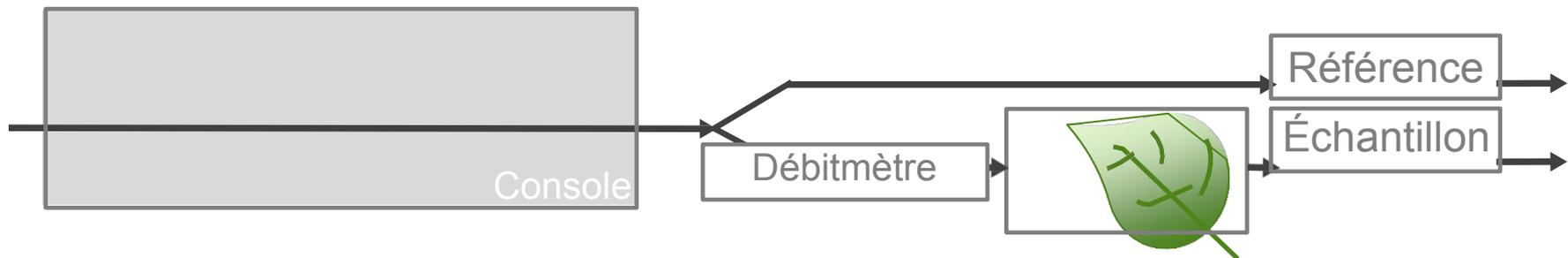
Système ouvert traditionnel



LI- 6400/XT



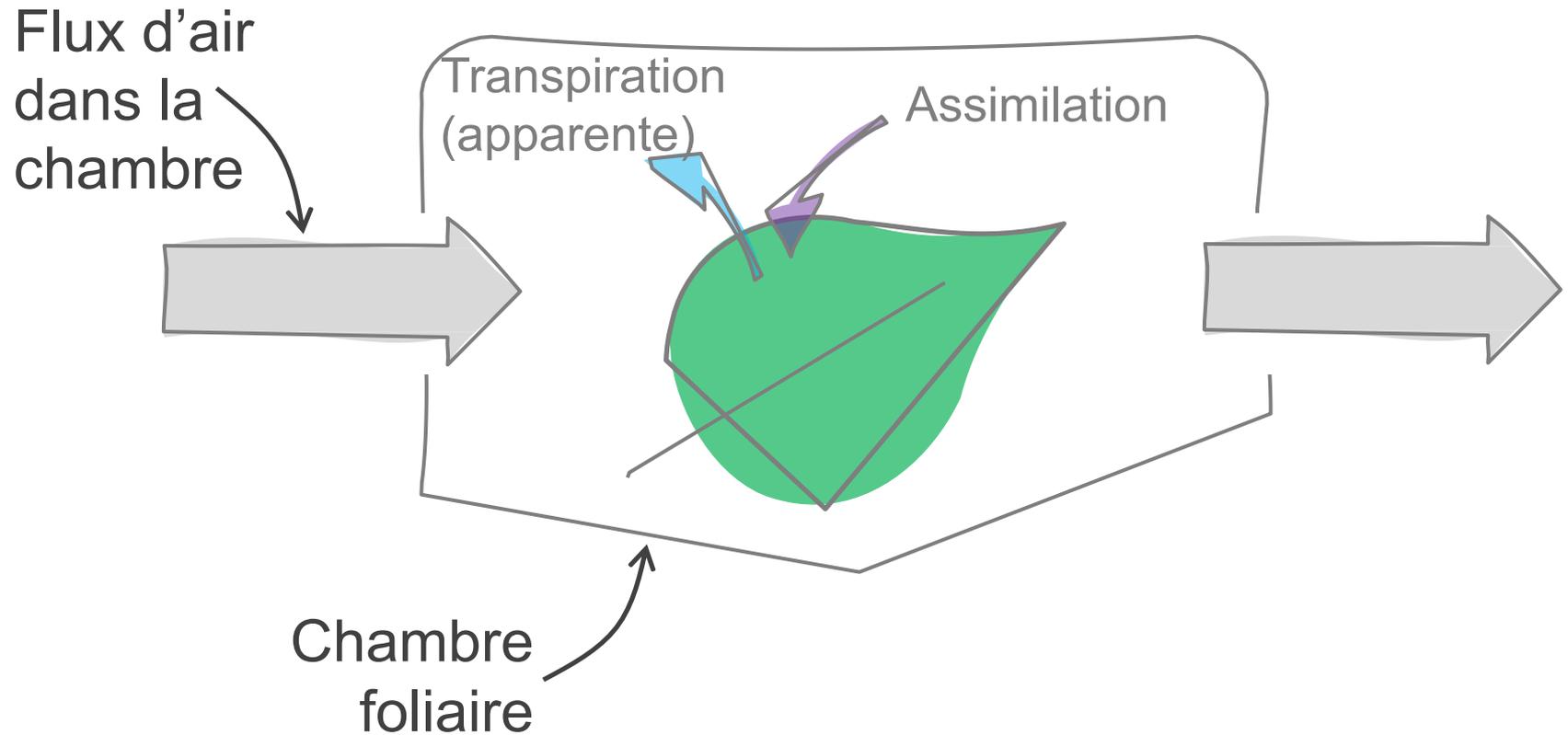
LI-6800



Paramètres de base *calculés*

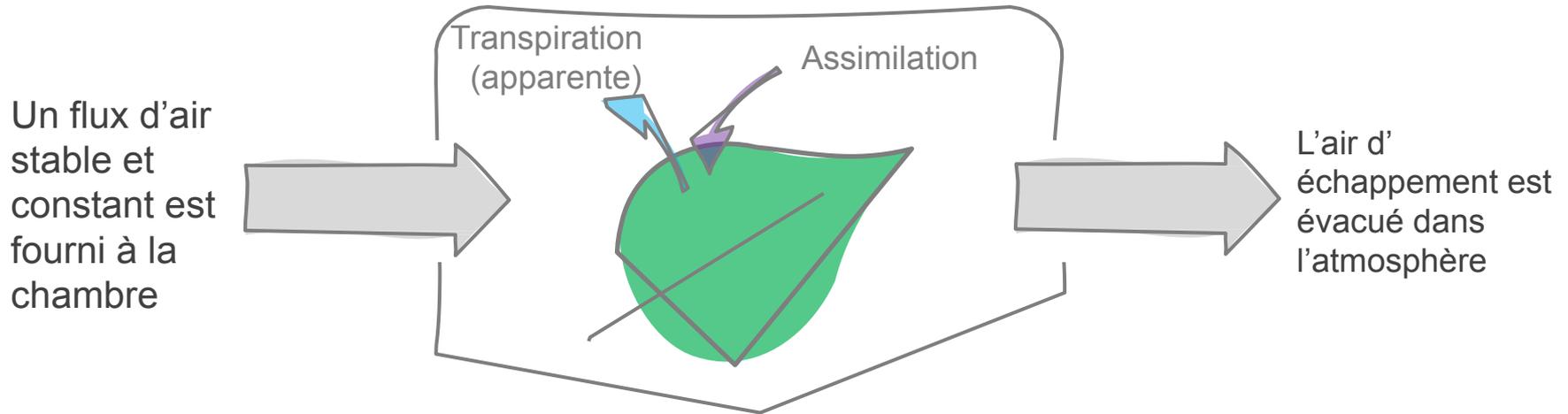
- Flux à partir du bilan massique
 - A – Taux d'assimilation
 - E – Taux de transpiration apparent
- Paramètres supplémentaires
 - g_{sw} – Conductance stomatique à la vapeur d'eau
 - C_i – Concentration intercellulaire de CO_2

Bilan massique dans un système ouvert



Bilan massique pour l'échange de gaz

Modèle d'échange de gaz à l'état d'équilibre



$$sf_x = u_{out}x_{out} - u_{in}x_{in}$$

s = Surface de la feuille

f_x = Flux de gaz « x »

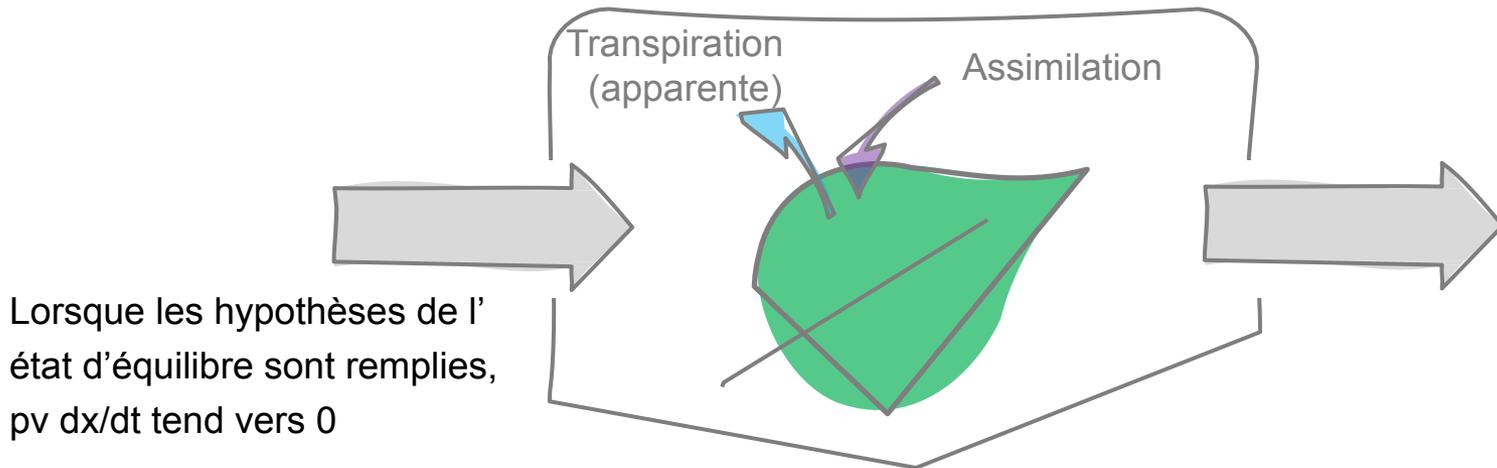
U_{in} = Débit d'air molaire entrant dans la chambre.

U_{out} = Débit d'air molaire sortant de la chambre.

X_{in} = Fraction molaire de « x » entrant dans la chambre

X_{out} = Fraction molaire de « x » sortant de la chambre.

Bilan massique pour l'échange de gaz



Lorsque les hypothèses de l'état d'équilibre sont remplies, $\rho v \frac{dx}{dt}$ tend vers 0

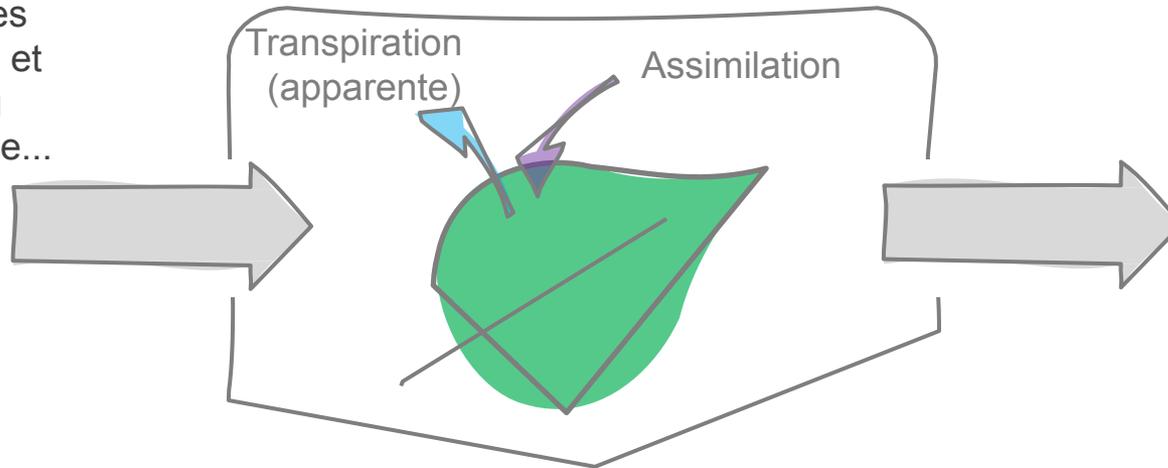
$$Sf_x = u_{out}x_{out} - u_{in}x_{in} \quad \text{Modèle de gaz à l'état d'équilibre}$$

$$Sf_x = u_{out}x_{out} - u_{in}x_{in} + \rho v \frac{dx}{dt} \quad \text{Modèle dynamique}$$

Bilan massique pour l'échange de gaz

Modèle dynamique d'échange de gaz

Remplacement des valeurs mesurées et réarrangement du modèle dynamique...



Le débit sortant de la chambre n'est pas mesuré. Il est comptabilisé en supposant que $u_{out} = u_{in} + sK$, et E est le seul débit significatif. E est généralement 10^3 ou $10^4 > A$.

$$E = \frac{u_{in}}{s(1 - w_{out})} \left(w_{out} - w_{in} + \frac{\rho v}{u_{in}} \frac{dw_{out}}{dt} \right) \quad A = \frac{u_{in}(1 - w_{in})}{s} \left(c'_{in} - c'_{out} + \frac{\rho v}{u_{in}} \frac{dc'_{out}}{dt} \right)$$

E = Transpiration apparente

A = Assimilation du carbone

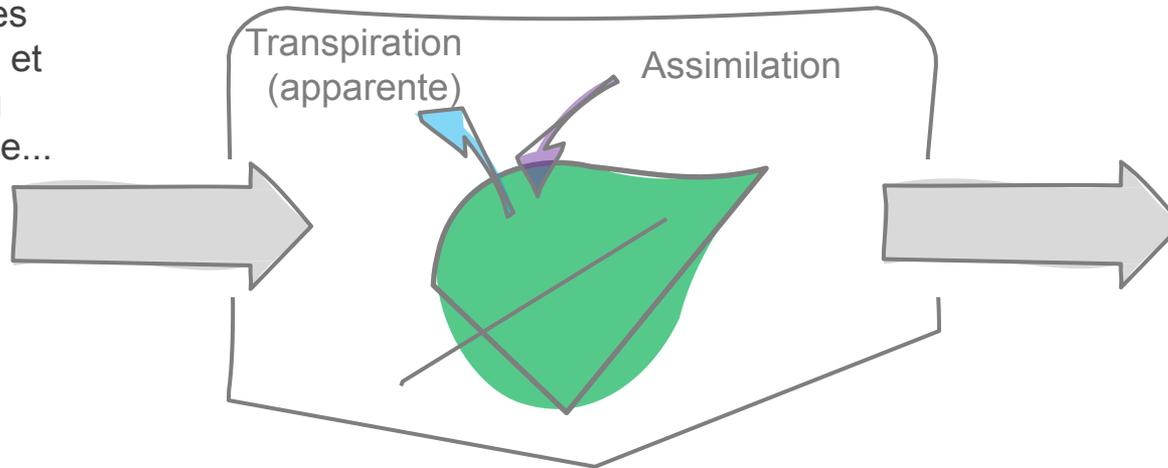
w_x = Fraction mole de vapeur d'eau

c'_x = rapport de mélange CO_2 sec = $c_x / (1 - w_x)$

Bilan massique pour l'échange de gaz

Modèle dynamique d'échange de gaz

Remplacement des valeurs mesurées et réarrangement du modèle dynamique...



Le débit sortant de la chambre n'est pas mesuré. Il est comptabilisé en supposant que $u_{out} = u_{in} + sK$, et E est le seul débit significatif. E est généralement 10^3 ou $10^4 > A$.

$$E = \frac{u_{in}}{s(1 - w_{out})} \left(w_{out} - w_{in} + \frac{\rho v}{u_{in}} \frac{dw_{out}}{dt} \right) \quad A = \frac{u_{in}(1 - w_{in})}{s} \left(c'_{in} - c'_{out} + \frac{\rho v}{u_{in}} \frac{dc'_{out}}{dt} \right)$$

E = Transpiration apparent

A = Assimilation du carbone

w_x = Fraction mole de vapeur d'eau

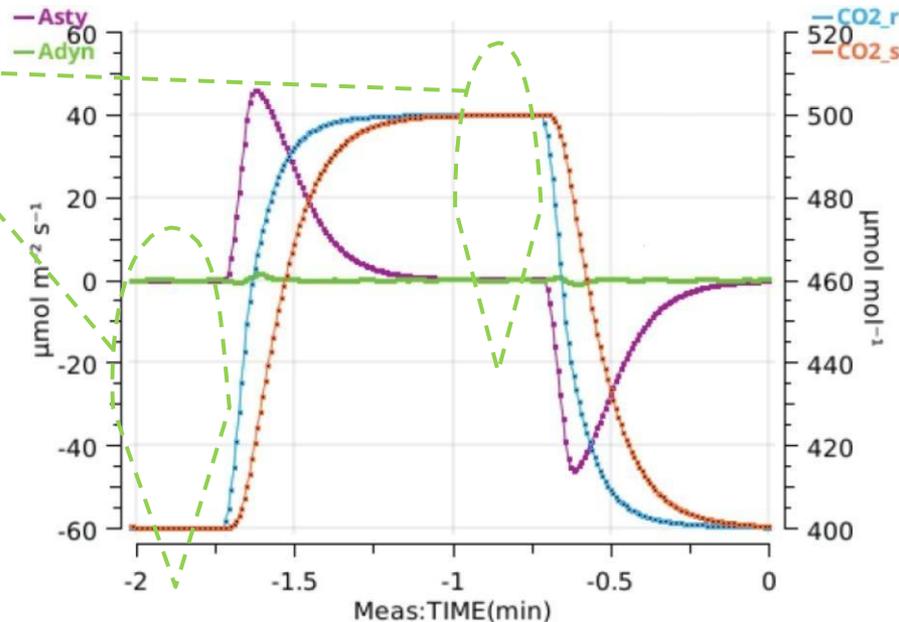
c'_x = rapport de mélange CO_2 sec = $c_x / (1 - w_x)$

A l'état d'équilibre, les termes transitoires sont nuls et les équations sont équivalentes à celles qui ont toujours été utilisées dans le LI-6400/XT et le LI-6800.

L'état d'équilibre *versus* le dynamique

Exemple de données d'une chambre vide (Assimilation = 0)

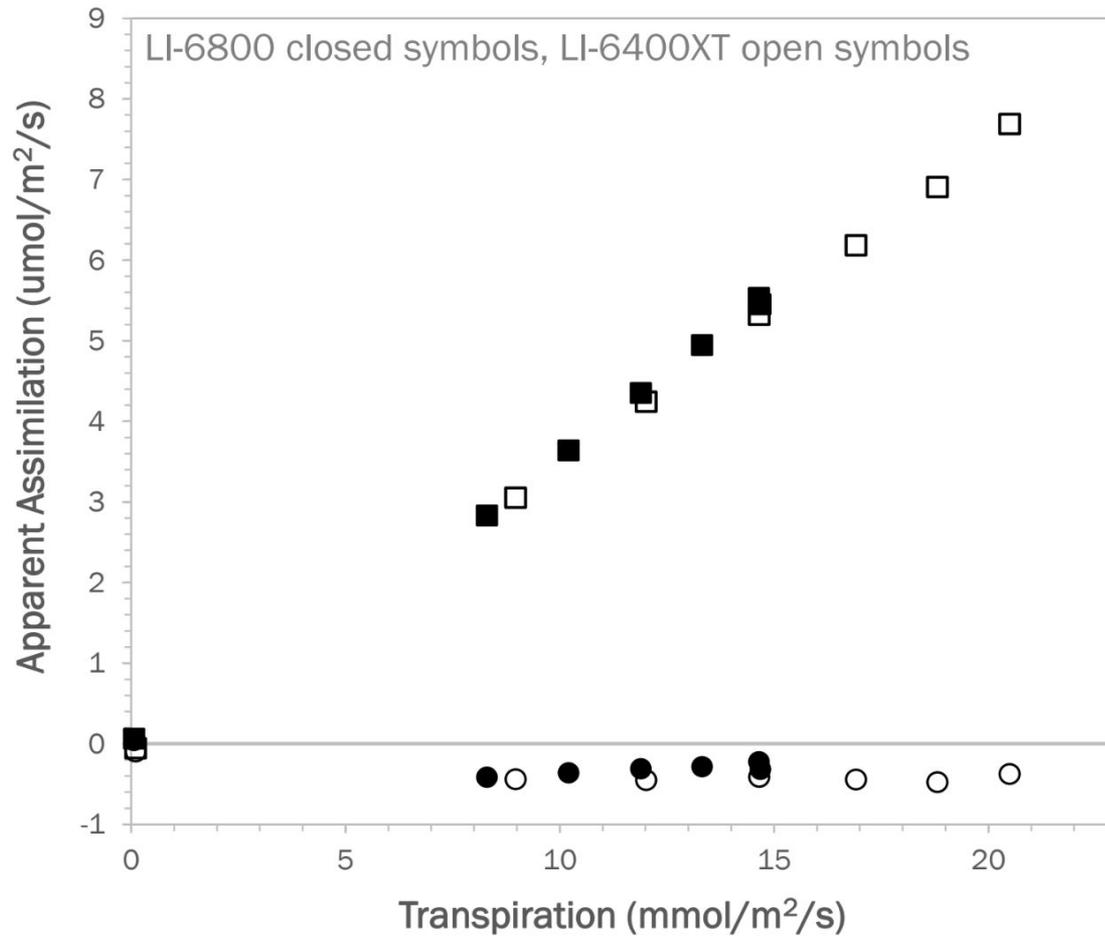
À l'état d'équilibre, le terme transitoire est nul et les flux coïncident



Après un changement brusque du CO_2 , le modèle à l'état d'équilibre donne un faux flux entraîné par le lavage.

Le modèle dynamique tient compte de cela et montre toujours une assimilation nulle

Comptabilisation de la dilution



$$A = \frac{F(C_r - C_s)}{100S}$$

$$A = \frac{\overline{F} \overline{C}_r - C_s \overline{C}}{\overline{e} \overline{1000 - W_r} \overline{\omega}} - \frac{W_s}{100S}$$

Plus sur les corrections de l'eau...



APPLICATION NOTE

The Importance of Water Vapor Measurements and Corrections

Application Note #129

Water vapor is known to influence the measurement of carbon dioxide by infrared gas analysis in several ways, which can lead to significant measurement errors. Spectral cross-sensitivity due to absorption band broadening, and inherent instrument cross-sensitivity can both cause overestimations of CO₂ mole fraction in samples containing water vapor when their effects are not accounted for. Dilution of samples by the addition of water vapor may not be important when measuring actual CO₂ mole fractions, but can lead to significant errors in flux measurements. In this note we describe the basis of each of these three processes and discuss how each can affect the measurement of CO₂.

Infrared Absorption by Gases and Absorption Band Broadening

At the sub-molecular scale the positions of atoms within molecules are not entirely fixed. As they move they stretch and bend their bonds, creating vibrations within the molecule. Energy differences between the possible vibrational states that result from this movement make it possible for the molecule to absorb infrared radiation. Changes in angular momentum as the molecule rotates about its axis can also cause infrared radiation to be absorbed. The energy differences resulting from changes in the vibrational and rotational states of the molecule cause fluctuations in its dipole moment. These oscillations interact with the alternating electrical field of electromagnetic radiation and if the frequencies of oscillation match, the radiation will be absorbed by the molecule.

Since the frequency of oscillation for electromagnetic radiation (ν) is the inverse of its wavelength ($\lambda=1/\nu$) and the various energy states that lead to its absorption by a molecule are the result of the molecule's structure, the absorption of infrared radiation is both wavelength and absorber species dependent. For a given molecular species, absorption of infrared radiation will occur in bands at various wavelengths across the infrared region of the spectrum (Figure 1A). Each of these absorption bands is comprised of individual absorption lines (Figure 1B) that result from rotational transitions, and have a generally Lorentzian line shape described by

$$k(\nu) = \frac{S}{\pi} \frac{\alpha}{(\nu - \nu_0)^2 + \alpha^2} \quad (1)$$

where $k(\nu)$ is the absorption coefficient k of radiation at frequency ν , S is the line strength, $(\nu - \nu_0)$ is the change in frequency across the absorption line and α is the absorption line half width.

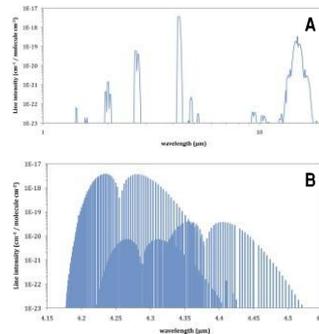


Figure 1: Absorption spectrum of CO₂. Carbon dioxide absorption data from HITRAN96 (Rothman et al. 1998). A. The absorption spectrum of CO₂ in the infrared region of the electromagnetic spectrum. B. The absorption of CO₂ in the 4.2 μ m region.

For infrared gas analysis with LI-COR gas analyzers, we are interested in measuring the total absorption of infrared light across a given waveband to determine absorber species concentration. The total absorption measured by the analyzer, A is in principle the result of integrating the absorption across the entire band as shown by

$$A = \int A'(\nu) d\nu \quad (2)$$

where $A'(\nu)$ is the absorption of infrared radiation at a given radiation frequency, and is given by Beer-Lambert's Law

$$A'(\nu) = 1 - \exp[-k(\nu)wl] \quad (3)$$

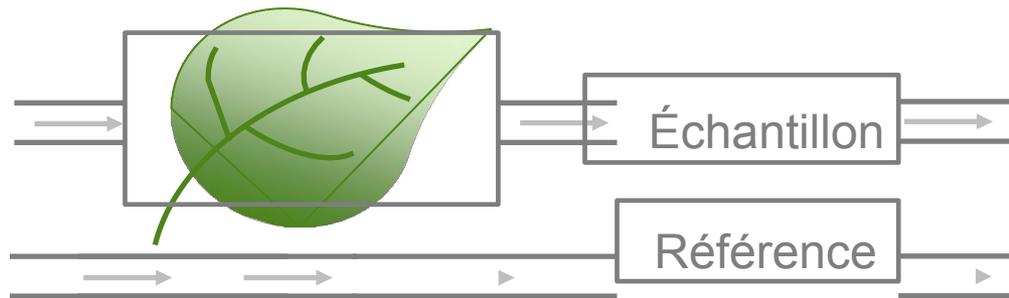
where w is the absorber concentration and l is the optical path length (Burch and Williams 1964). These relationships form the basic principles behind

- Explique la base de l'élargissement et la pression effective
- Dérive les corrections de dilution
- Fonctionnement des IRGA

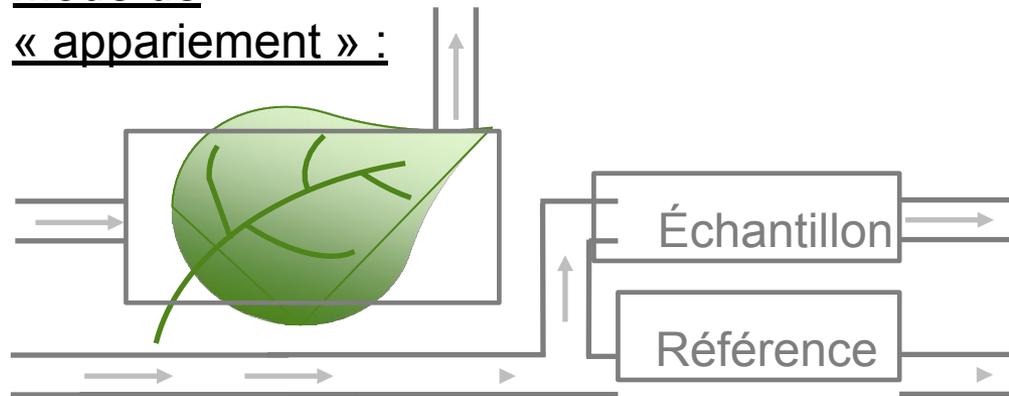
Appariement de l'IRGA

LI-6800

Mode de fonctionnement normal :



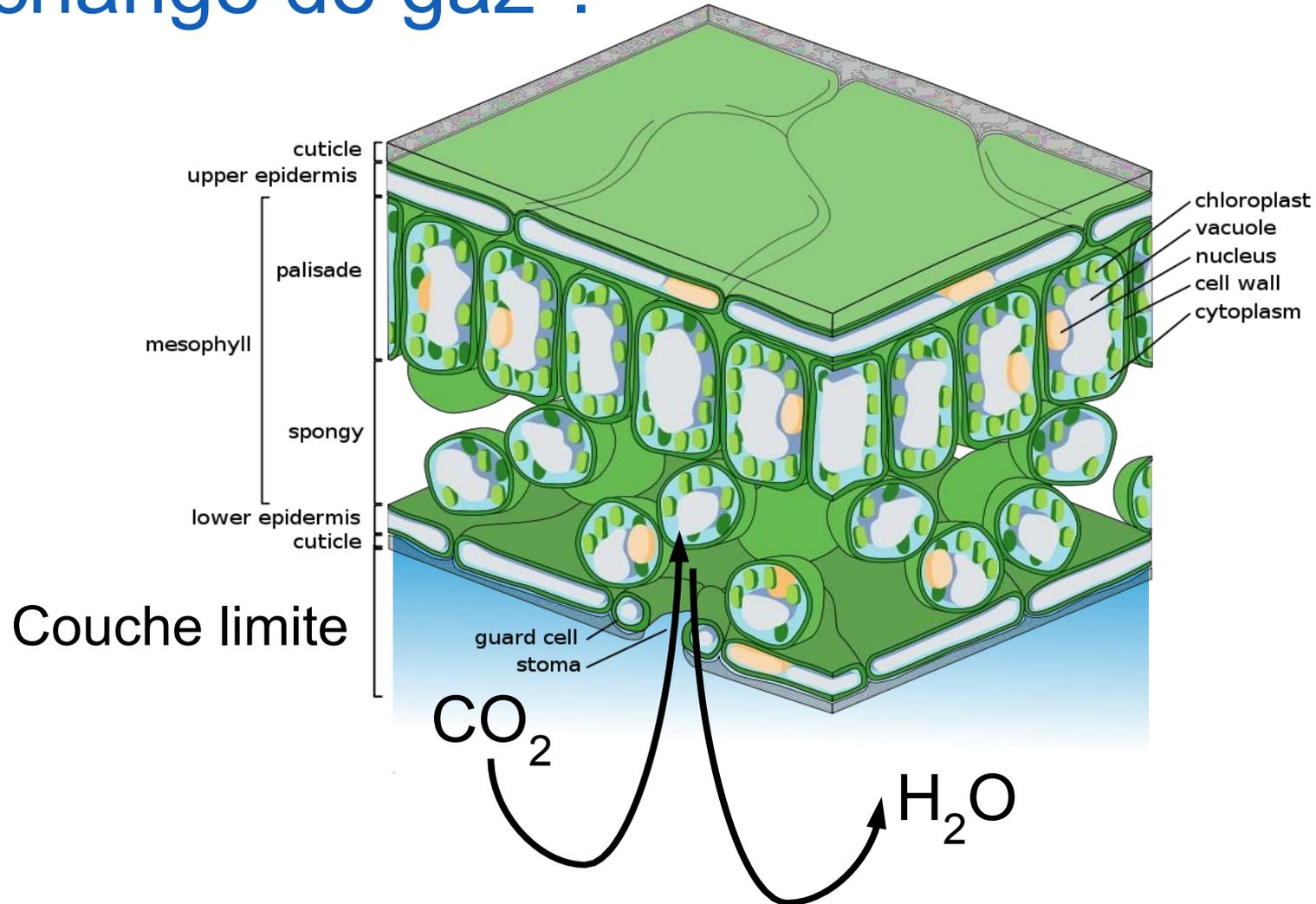
Mode de « appariement » :



Paramètres de base *calculés*

- Flux à partir du bilan massique
 - A – Taux d'assimilation
 - E – Taux de transpiration apparent
- Paramètres supplémentaires
 - g_{sw} – Conductance stomatique à la vapeur d'eau
 - C_i – Concentration intercellulaire de CO_2

Que peut-on déterminer d'autre avec l'échange de gaz ?



Que peut-on déterminer d'autre avec l'échange de gaz ?

- La première loi de Fick

$$J_j = -D_j \frac{\partial c_j}{\partial x} = g_j \Delta c_j$$

J_j = flux

D_j = coefficient de diffusivité

$\delta c / \delta x$ = changement de concentration

g_j = conductance

Δc_j = différence de concentration

Que peut-on déterminer d'autre avec l'échange de gaz ?

$$\cancel{E} \approx g_{total}^{H_2O} (\cancel{W}_i - \cancel{W}_a)$$

$$\cancel{A} \approx g_{total}^{CO_2} (\cancel{C}_a - C_i)$$

- Mesurer E et W_a ($W_a = W_s$)
- Mesurer la température des feuilles
- Calculer le W_i
- Résoudre pour $g_{H_2O}^{total}$
- Mesurer A et C_a ($C_a = C_s$)
- $g^{CO_2} = g^{H_2O} / 1.6$
- Résoudre pour C_i

Que peut-on déterminer d'autre avec l'échange de gaz ?

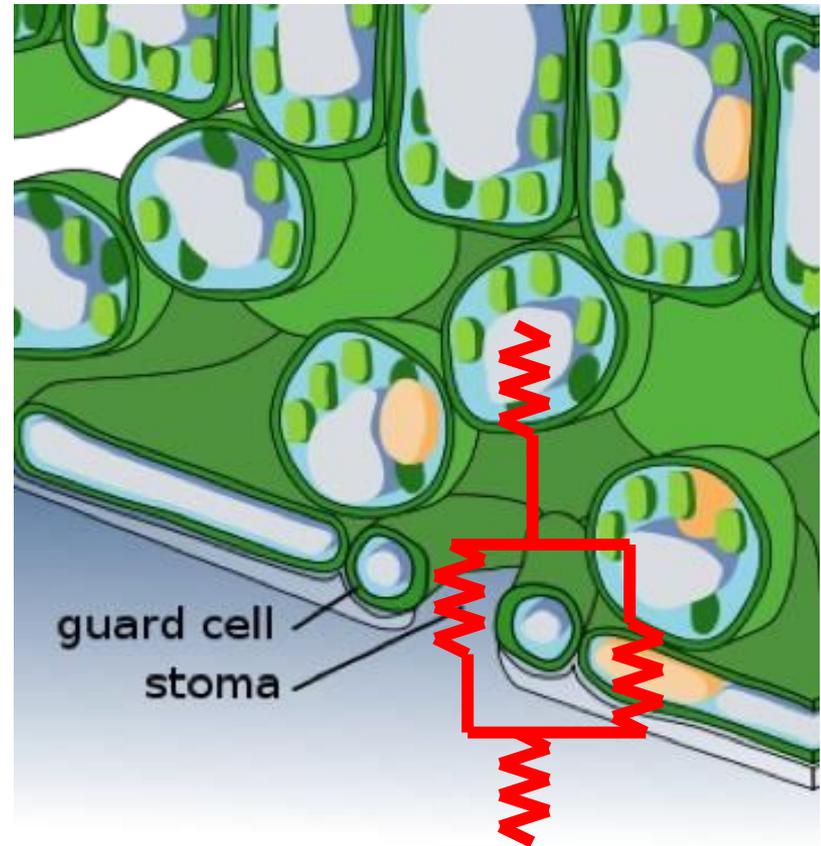
Analogie de la loi d'Ohm

$$r_{total} = r_{bl} + \left(\frac{1}{r_s} + \frac{1}{r_c} \right)^{-1} + r_{mes}$$

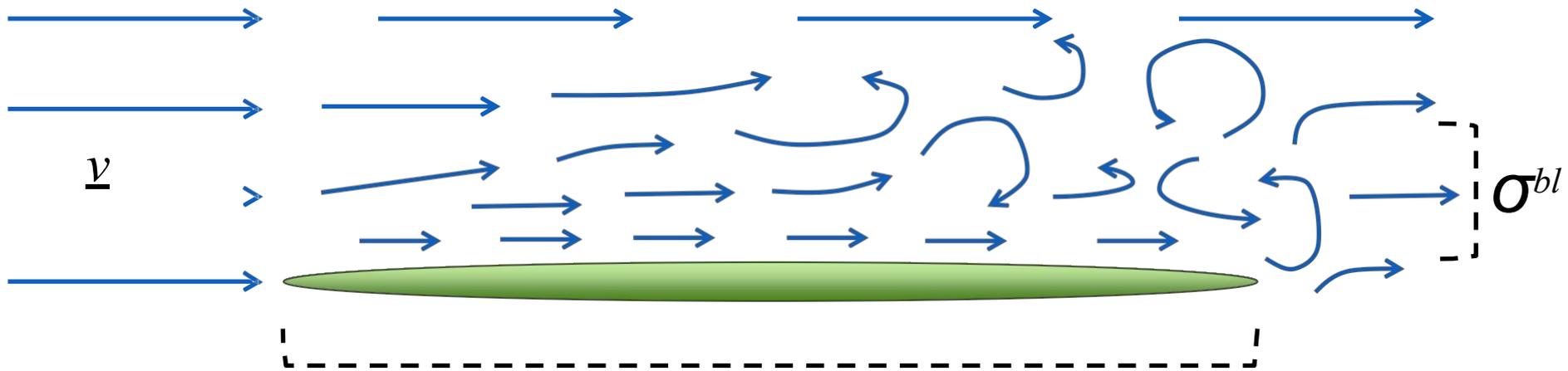
Suppositions :

- Le point final de la voie de diffusion est la surface du mésophile
- La résistance de la cuticule est presque infinie

$$r_{total} \approx r_{bl} + r_s$$



Couche limite de la feuille



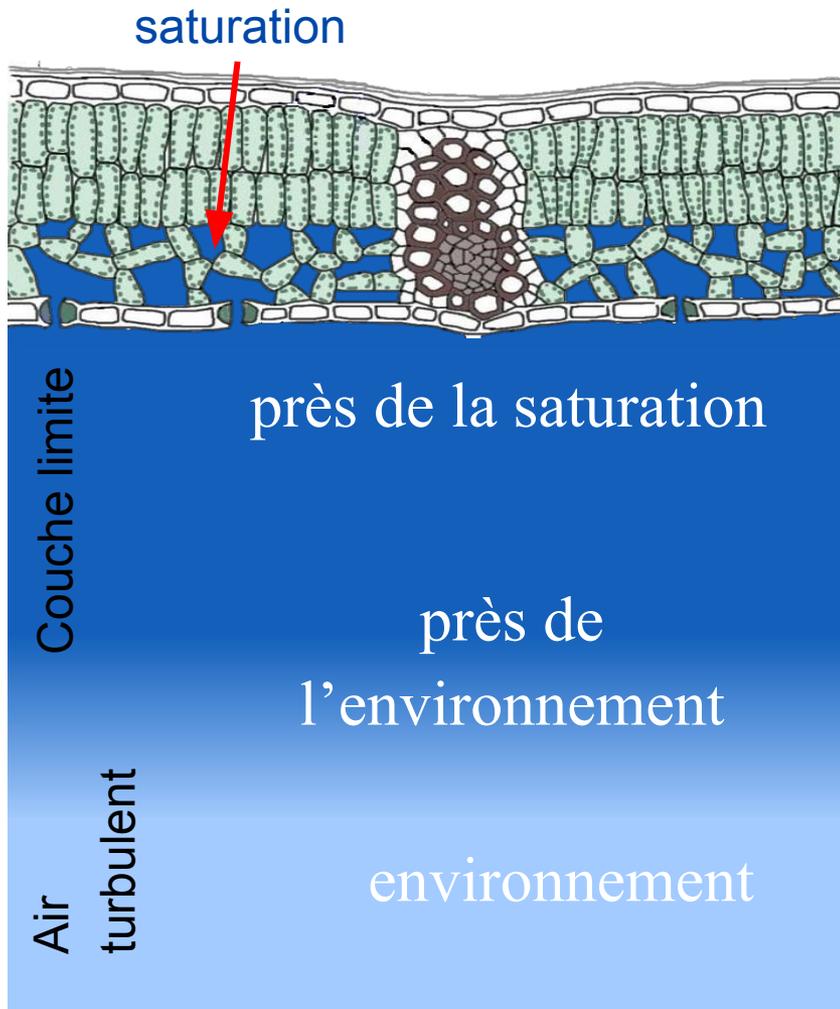
$$\sigma^{bl} = 4 \sqrt{\frac{l}{v}}$$

σ^{bl} = épaisseur de la couche limite

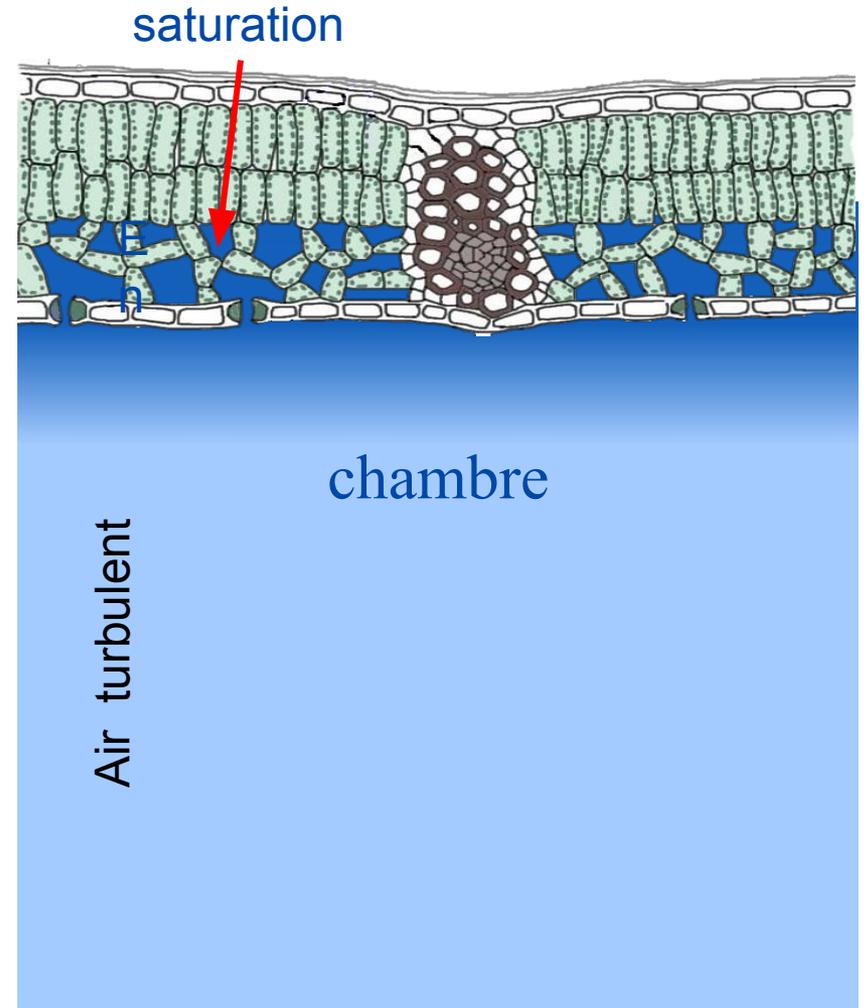
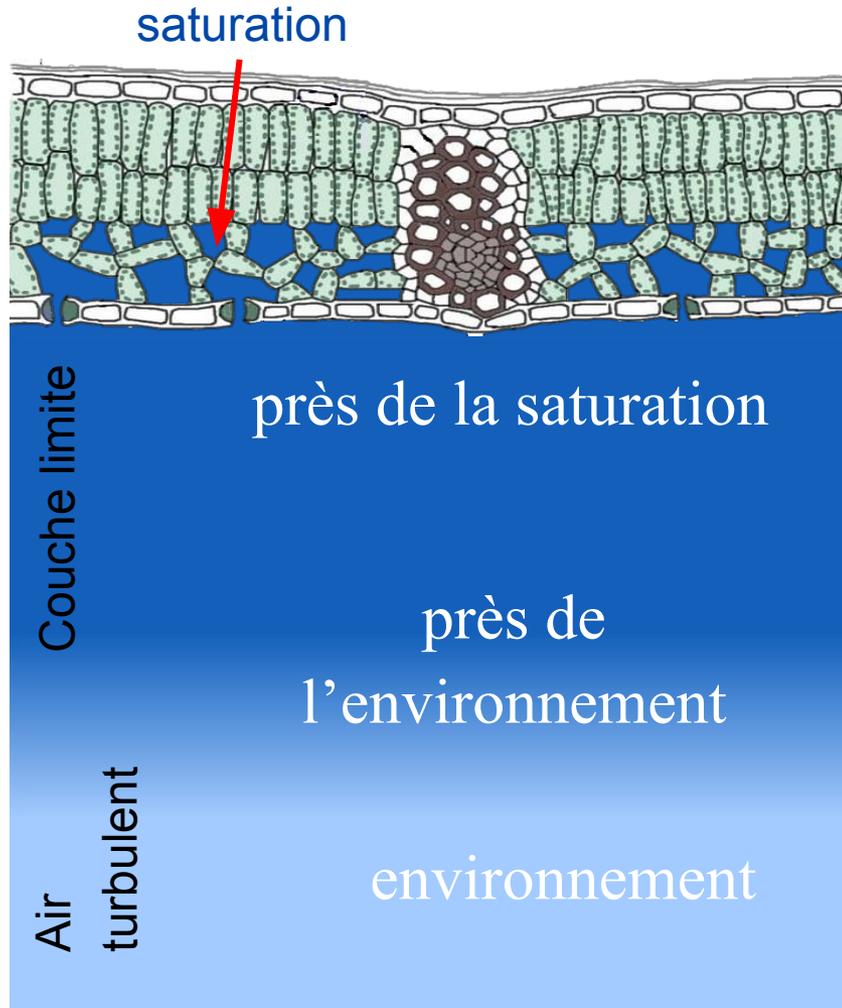
v = vitesse de l'air

l = largeur de la feuille

Conditions de la couche limite



Conditions de la couche limite



Qu'est-ce que cela signifie pour la prise de mesures ?

- Pour l'H₂O: conditions ambiantes de la couche limite cible !

$$RH (\%) = \frac{e_c}{e_{T_{air}}} * 100$$

$$e_c (kPa) = W_s P$$

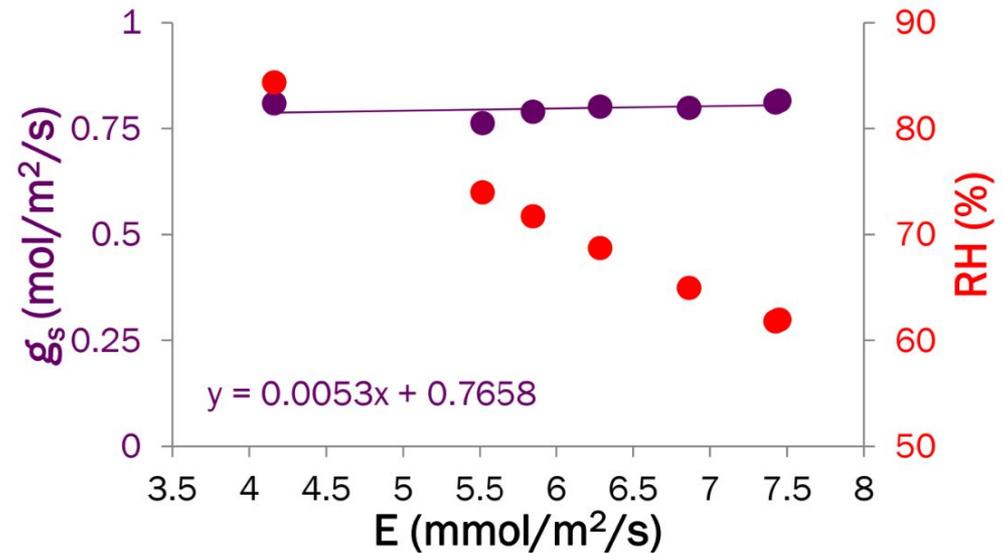
$$VPD_{leaf} (kPa) = e(T_{leaf}) - e_c$$

Sur le LI-6800, utilisez la valeur constante de VPD (1 à 1,5 kPa)

Qu'est-ce que cela signifie pour l'interprétation des données?

- E = Nombre réel de molécules d'H₂O sortant de la feuille

$$g_s = \frac{E}{(w_i - w_a)}$$



Qu'est-ce que cela signifie pour l'interprétation des données?

- Efficacité d'utilisation de l'eau
- Instantanée *versus* intrinsèque

$$W_t = \frac{A}{E} = \frac{A}{g_s (w_i - w_a)} = \frac{A}{g_s D_a} = W_g D_a$$

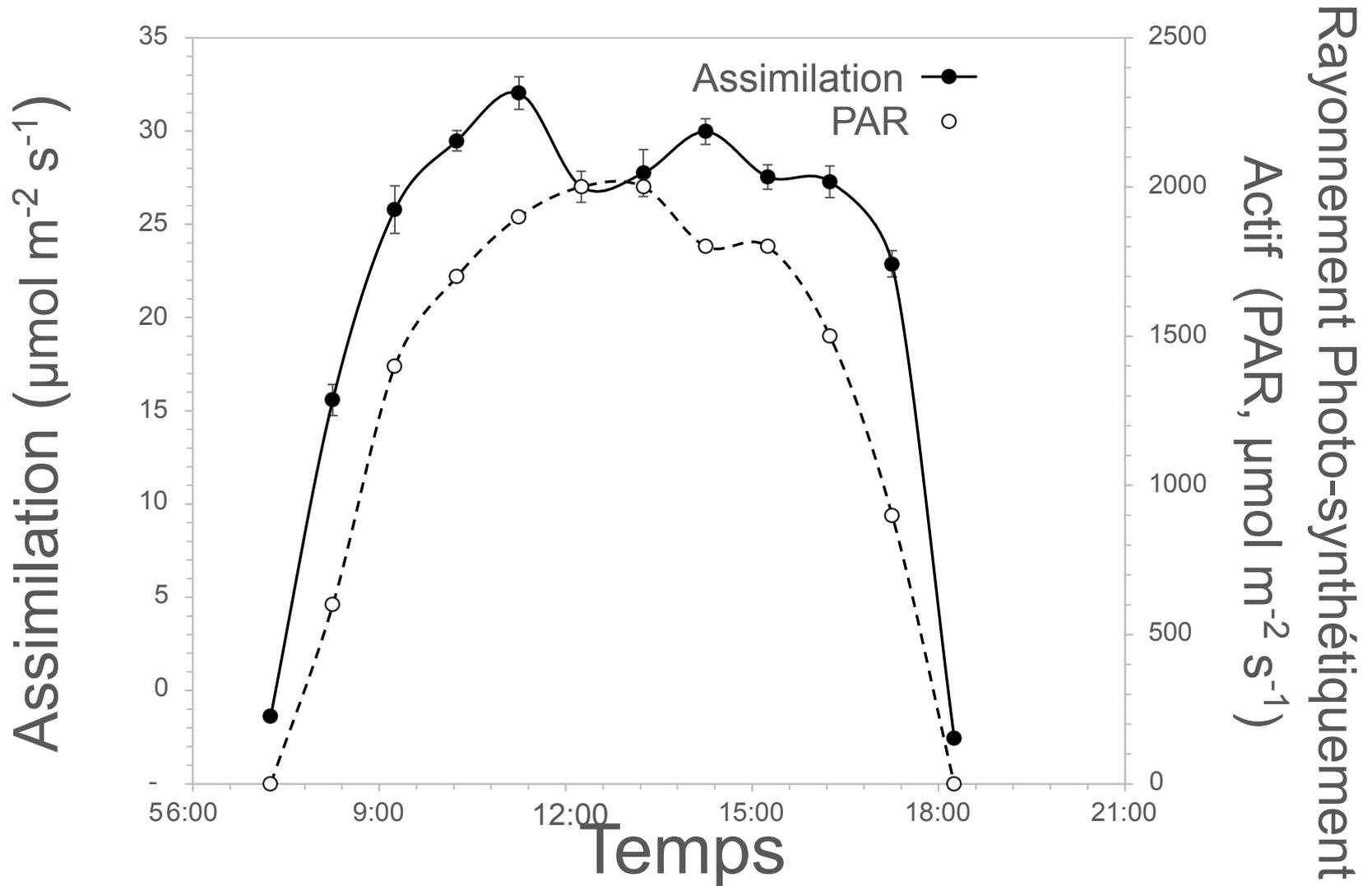
$$W_g = \frac{A}{g_s}$$

Seibt *et al.* 2008. *Carbon isotopes and water use efficiency: sense and sensitivity.* *Oecologia*

Les mesures se répartissent en deux catégories

- Courbe de réponse – conditions imposées
 - Courbe de réponse à la lumière
 - Courbe de réponse au CO₂
- Enquête
 - Image *in situ* sous conditions ambiantes

Quand peut-on prendre des mesures ?

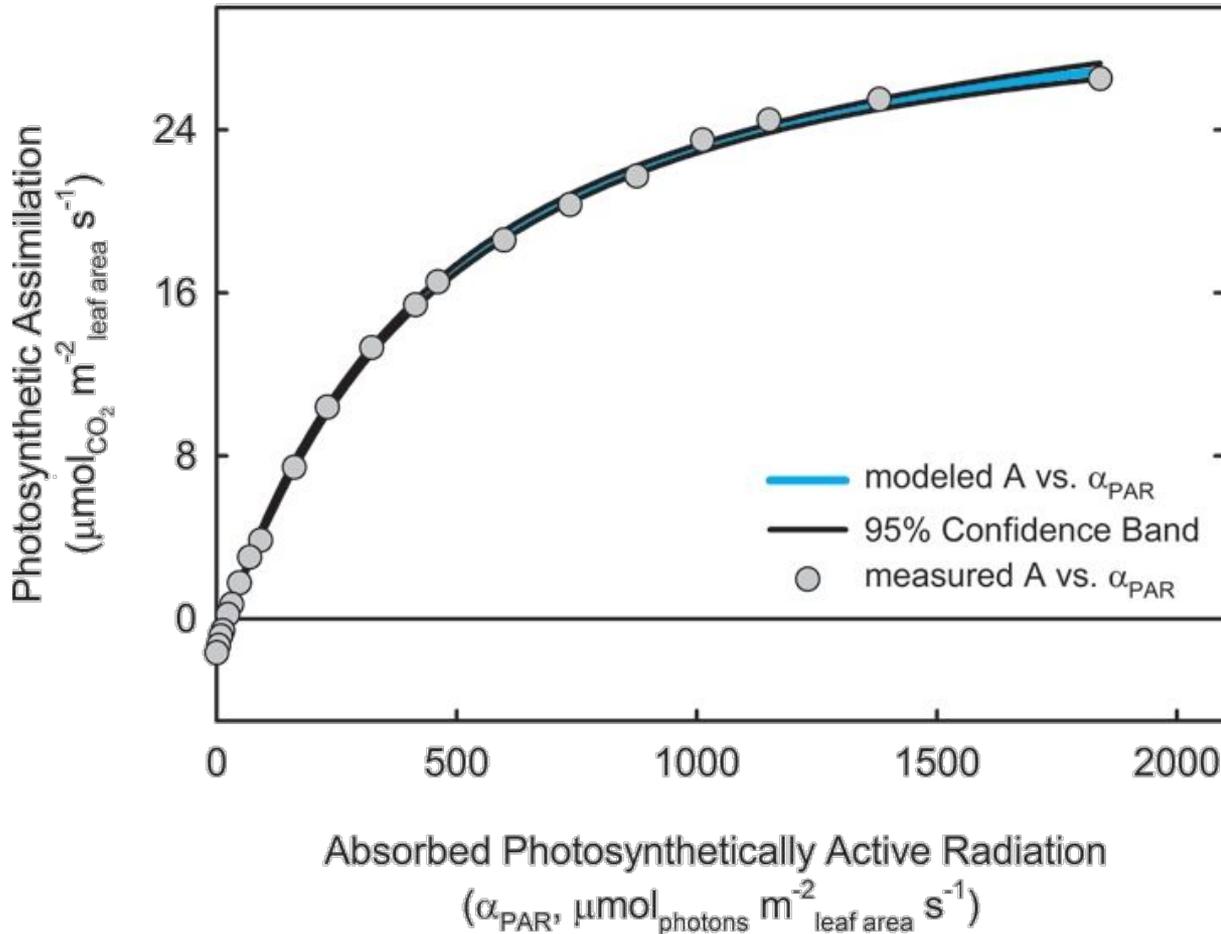


Courbes A-C_i et AQ

- Réponse au [CO]₂
- Réponse à la lumière

Paramètres de la réponse AQ

$$A_{\text{sat}} = 34.28 \pm 0.778 \quad r^2 = 0.9995$$
$$R_d = -1.492 \pm 0.117$$



A_{sat} – photosynthèse à la lumière saturante

R_d – Taux de respiration dans l'obscurité

LCP - Point de compensation de lumière

Φ – Rendement quantique

Paramètres de la réponse A-C_i

V_{c,max} – vitesse de carboxylation

J_{max} – transport d'électrons pour la régénération du RuBP

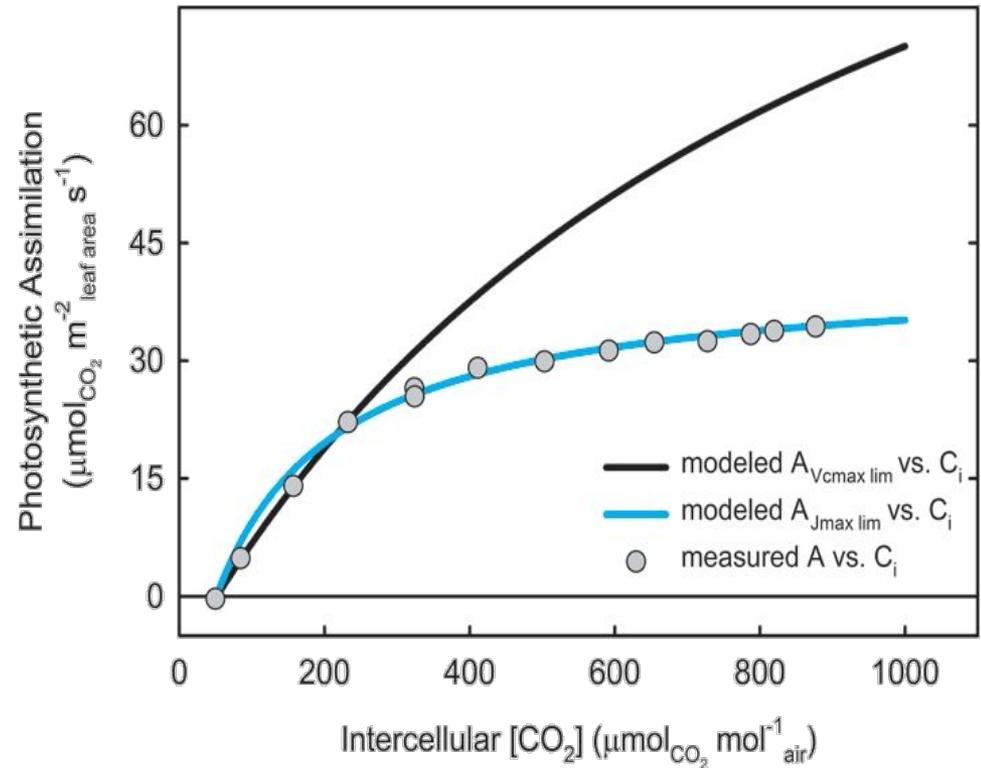
Inflection C_i – transition de V_{c,max} à J_{max}

I – limitation des stomates de la photosynthèse

g_m – conductance mésophylle

Γ* – point de compensation du CO₂

TPU – utilisation de trios-phosphate

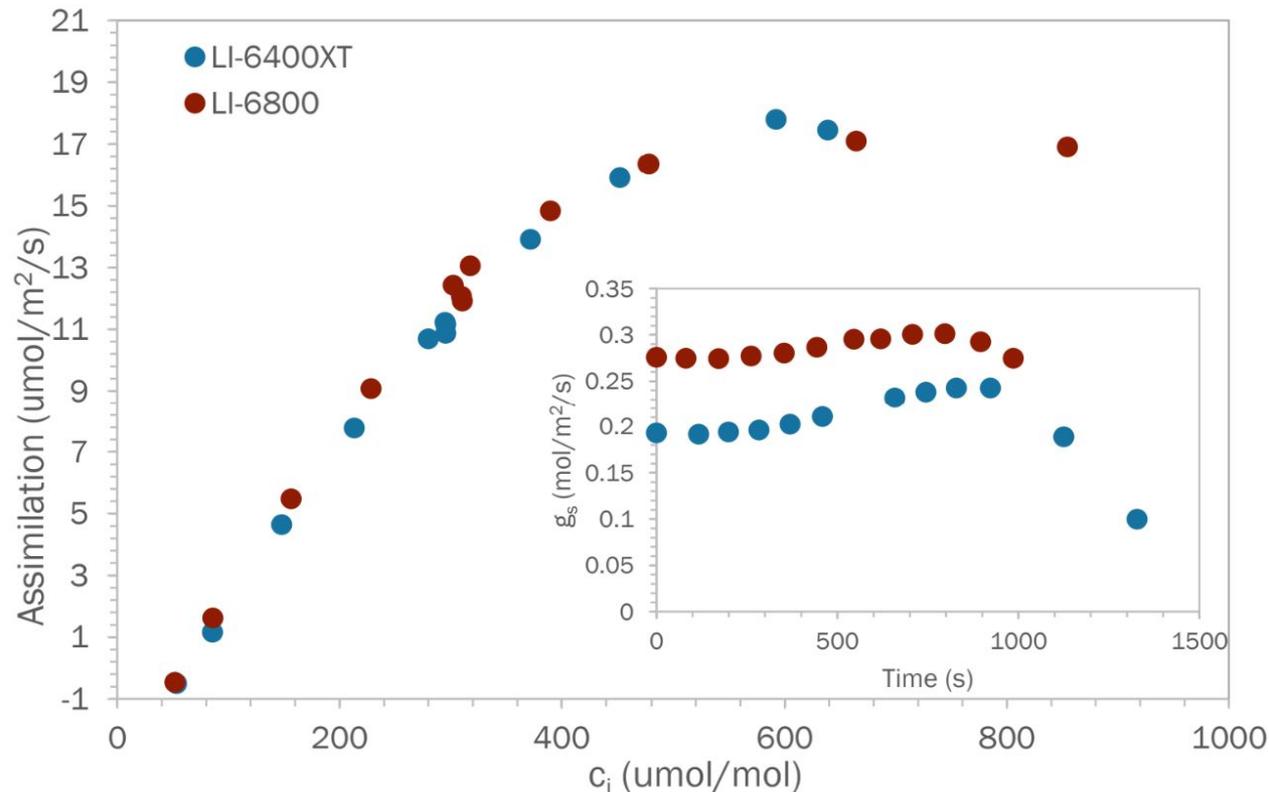


Considérations pour les mesures d'A-C_i

- Lumière saturante
 - L'effet du CO₂ sur la photosynthèse sera confondu avec les effets de la lumière
- Contrôle de l'environnement
 - Référence vs. échantillon
 - L'humidité va modifier l'ouverture des stomates
 - Contrôle de la température pour la cinétique des enzymes
- Match à chaque point

Il est important d'utiliser des étapes de courte durée

- Désactivation de Rubisco
- Fermeture des stomates



Outils de réglage des courbes A-C_i

PCE_1710_ACi curve fitting model.xls

Home Layout Tables Charts SmartArt Formulas Data Review

Edit Font Alignment Number Format Cells Themes

Fill Arial 10 Wrap Text General Normal Bad Insert Delete Format Themes

C4 28

A/Ci curve fitting utility version 2007.1

Instructions for use
 1. Enter data in white cells, delete any extra "A" values
 2. Estimate limiting factors (1= rubisco, 2= RuBP regeneration, 3= TPU)
 (assign at least one point to limitation 3, enter 0 to exclude points)
 3. Press the "Solve" button
 4. Adjust limiting factor if needed (use 0 to disregard a data pair)
 5. Press the "Save" button to save to you computer and or
 6. Cut and paste outputs if desired

Please enter your values
 T leaf 28 °C
 Patm 101 kPa
 O₂ 21 kPa

Estimate Limiting Enter A Enter either c, ppm* C, Pa

Estimate Limiting	Enter A	Enter either c, ppm*	C, Pa
1	-3.27	20.7	2.09
1	3.49	77.5	7.93
1	10.8	135	13.64
1	17.8	197	19.90
0	23.5	266	26.87
0	27.6	344	34.74
2	30.5	428	43.23
2	31.7	517	52.22
2	33	606	61.21
3	33.3	698	70.50
3	33.3	791	79.89

Make no changes here

Calculated Cc	A ₀	A ₁	A ₂	Error terms 0.480 0.110 0.000
2.40	-8.62	-7.70	33.30	0.125
7.50	-4.63	8.01	33.30	0.291
12.61	-0.87	16.07	33.30	0.005
18.21	-17.86	-21.32	33.30	0.059
24.64	24.36	25.14	33.30	
32.12	31.31	-28.06	33.30	
40.33	37.95	30.23	33.30	0.073
49.21	44.18	31.87	33.30	0.031
58.07	49.62	33.08	33.30	0.006
67.34	54.60	34.04	33.30	0.000
76.73	59.06	34.79	33.30	0.000

* If you enter c, C_i will be calculated, do not delete equations in the C_i column

Use solver to minimize this sum of squares **0.590**

Outputs

	@ T leaf	@ 25 °C
V _c max	130	100 μmol m ⁻² s ⁻¹
J	167	140 μmol m ⁻² s ⁻¹
TPU	11.4	9.7 μmol m ⁻² s ⁻¹
R _g	0.93	0.77 μmol m ⁻² s ⁻¹
g _m *	10.53	8.64 μmol m ⁻² s ⁻¹ Pa ⁻¹

* R_g is constrained to be >0 and g_m* is constrained to be 30 or less

To cite this estimating utility:
 Sharkey, T.D., Bernacchi, C.J., Farquhar, G.D., Singaas, E.L. (2007) In Practice: Fitting photosynthetic carbon dioxide response curves for C₃ leaves. Plant, Cell & Environment 30:XXX-XXX
 Version 2007.1
[Link to paper](#)

To refresh your copy and for updates to this application please visit www.blackwellpublishing.com/plantsci/pcecalculation/

A/C_i curve

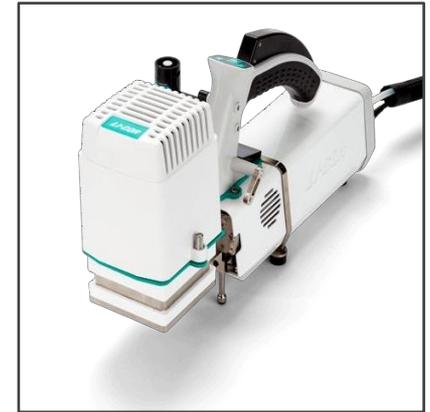
Sharkey *et al.* 2015. What gas exchange data can tell us about photosynthesis. Plant, Cell and Environment

Outils de réglage des courbes A-C_i

- Leafweb.ornl.gov
 - Plateforme de réglage et de partage des données des courbes A-C_i
 - Développé et hébergé par le Laboratoire National d'Oak Ridge
- Plantecophys R package
 - Duursma RA. 2015. Plantecophys - *An R package for analysing and modeling leaf gas exchange data*. PLoS ONE

Autres options de chambre pour le LI-6800

Notre discussion de g_s et c_i jusqu'à présent a été basée sur des hypothèses qui se décomposent à l'échelle de la plante entière / canopée !



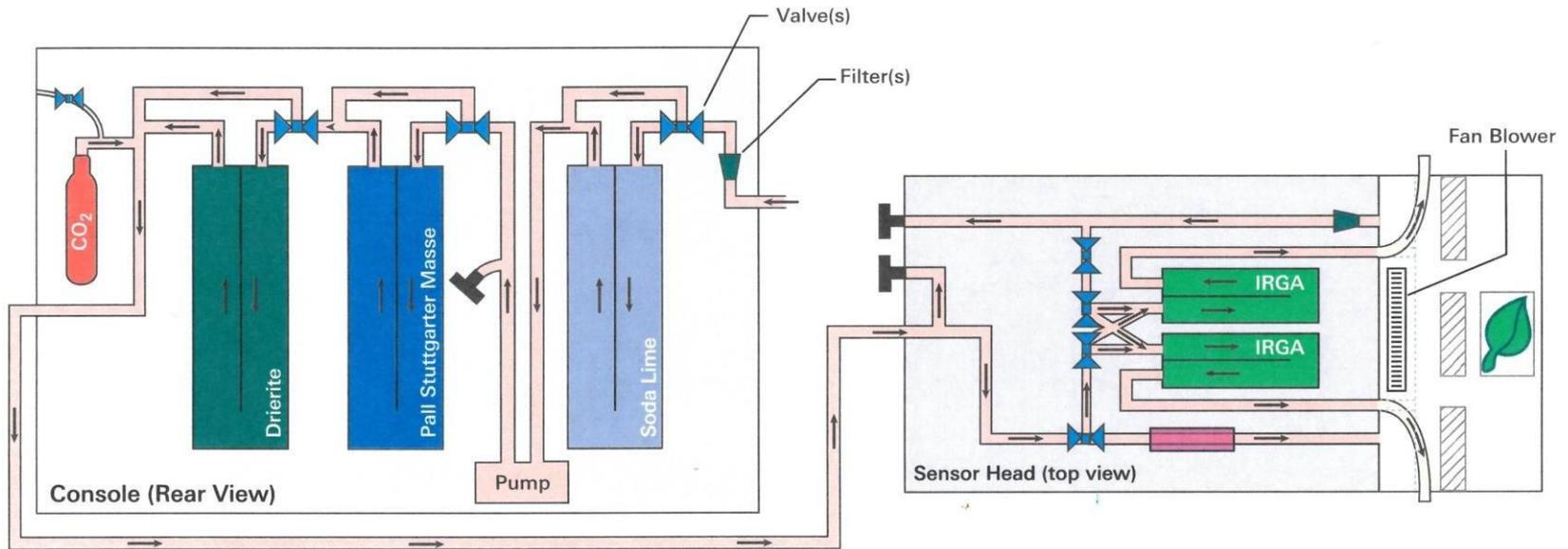
Comment choisir la bonne chambre ?

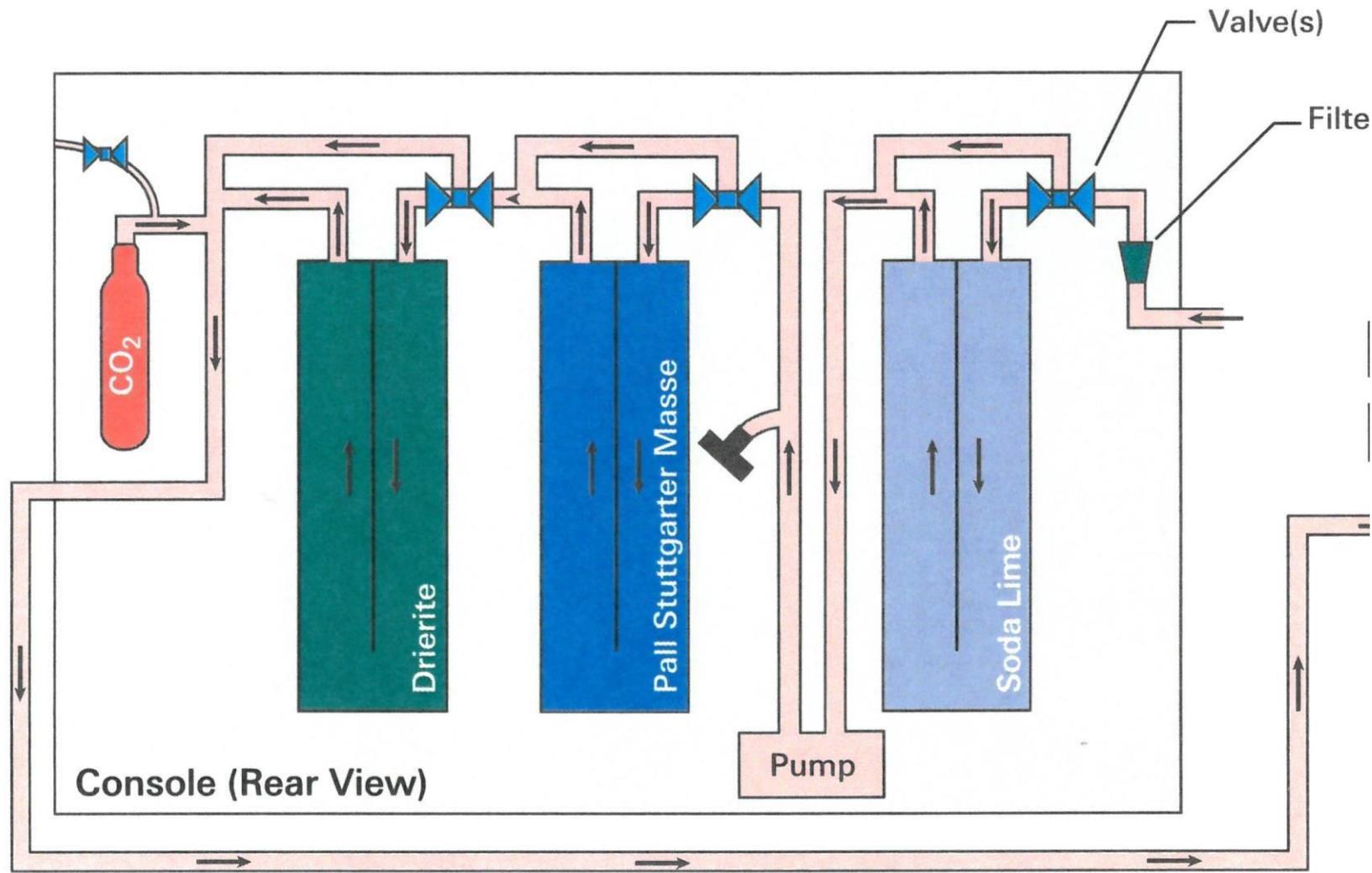
- Ouverture de la chambre – Plus c'est grand, mieux c'est !
- Contrôle de l'intensité lumineuse
- De quelles données avez-vous besoin ?

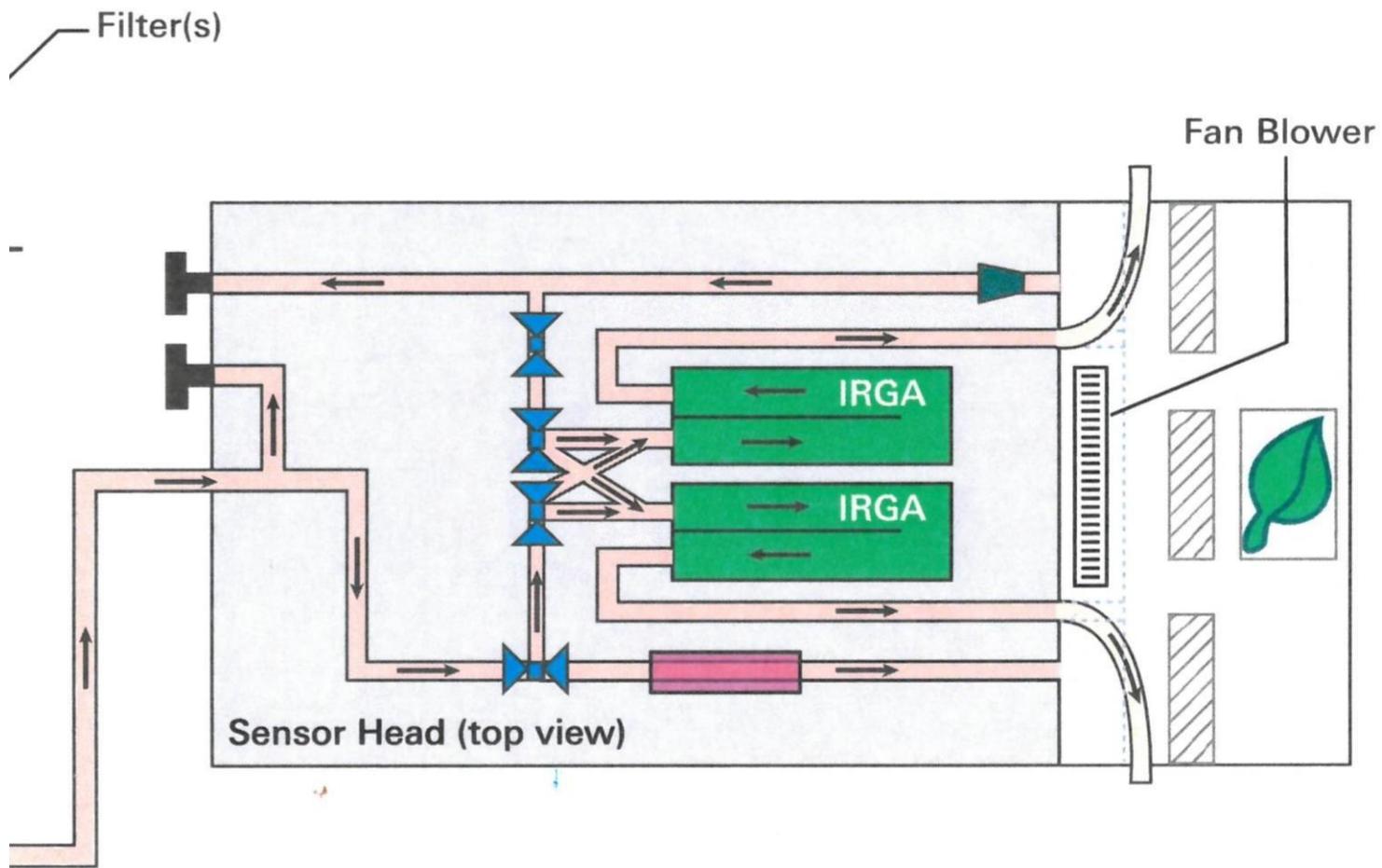


Voie de flux dans la console LI-6800 :

Contrôle logiciel rapide et équilibré du CO_2 et de l' H_2O







Leaf photosynthesis and carbohydrate dynamics of soybeans grown throughout their life-cycle under Free-Air Carbon dioxide Enrichment

A. ROGERS^{1,4}, D. J. ALLEN^{2,3,*}, P. A. DAVEY^{1,2,†}, P. B. MORGAN², E. A. AINSWORTH¹, C. J. BERNACCHI^{2,3}, G. CORNIC⁵, O. DERMODY², F. G. DOHLEMAN¹, E. A. HEATON¹, J. MAHONEY⁴, X.-G. ZHU², E. H. DELUCIA², D. R. ORT^{1,2,3} & S. P. LONG^{1,2}

