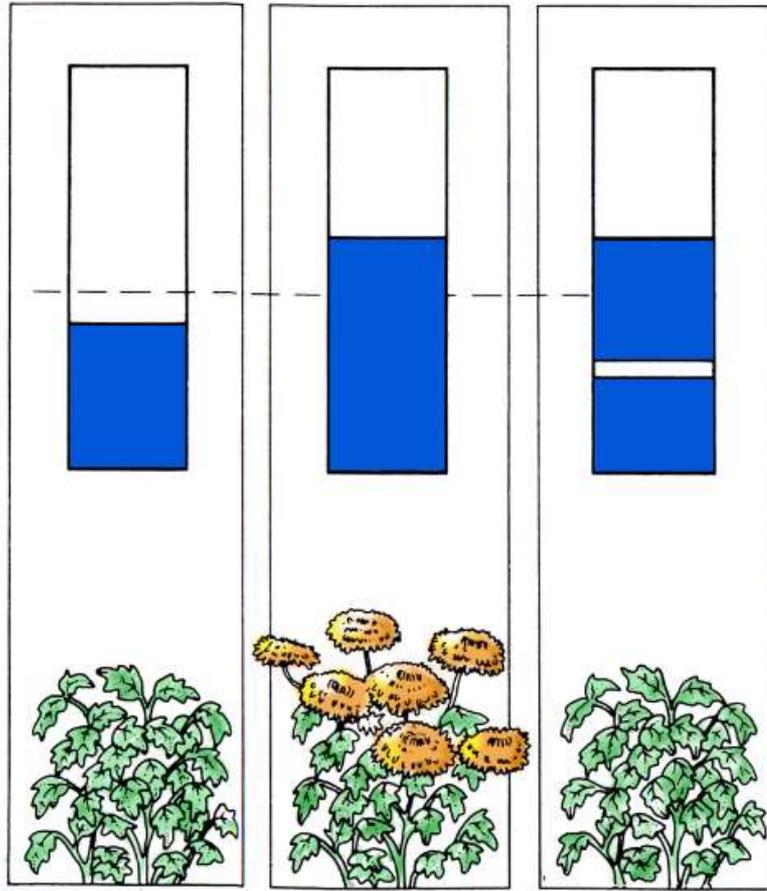


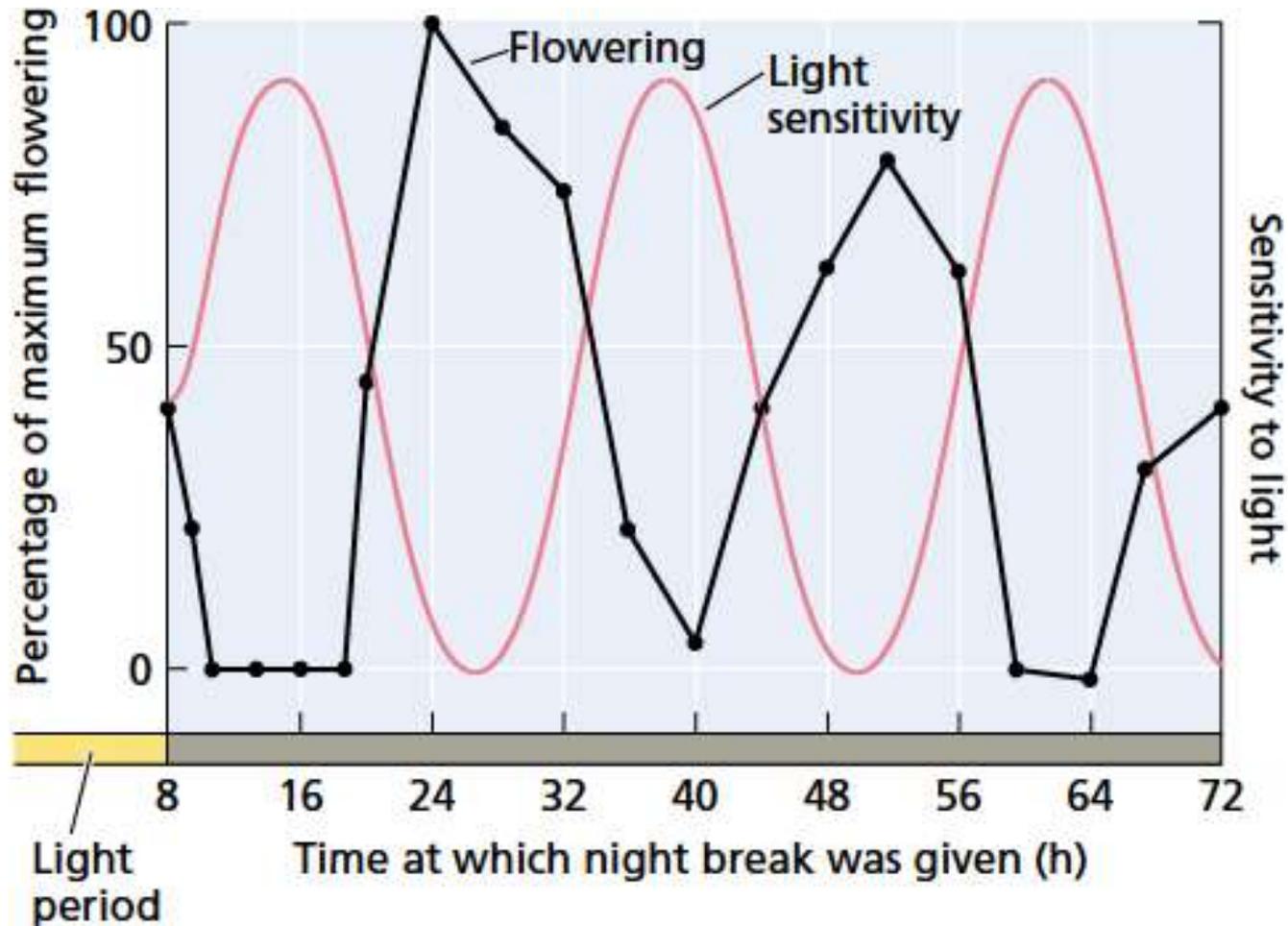
➔ Expérience de « Free Run » pour la floraison avec des plantes de jours courts



Short-day plants

Plante de jours courts exposée à 8h de lumière et 72h de nuit.

→ En fonction de la période à laquelle la nuit est interrompu, la réponse n'est pas la même alors **que la nuit est continue**

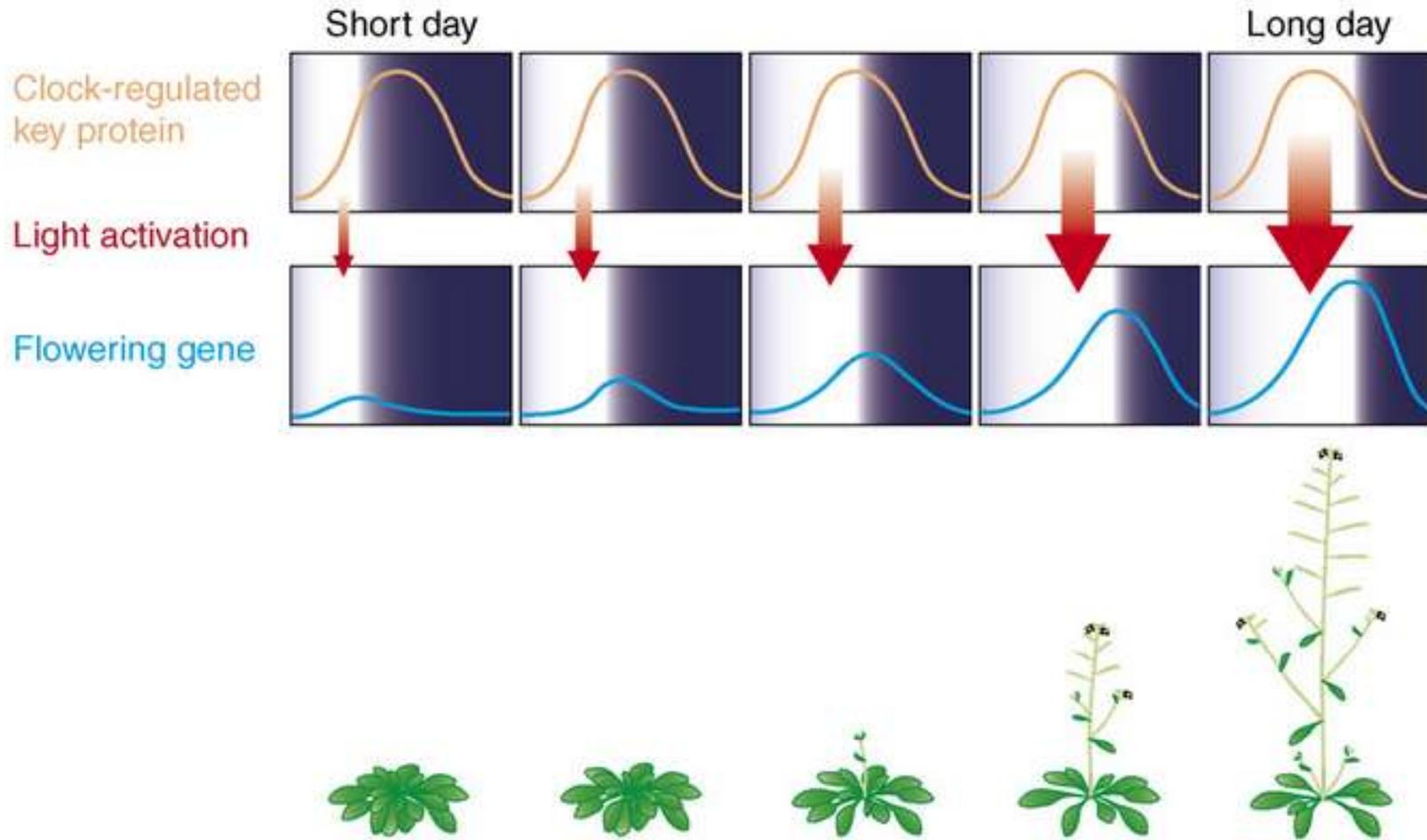


Donc la sensibilité à la lumière est soumise à un rythme circadien

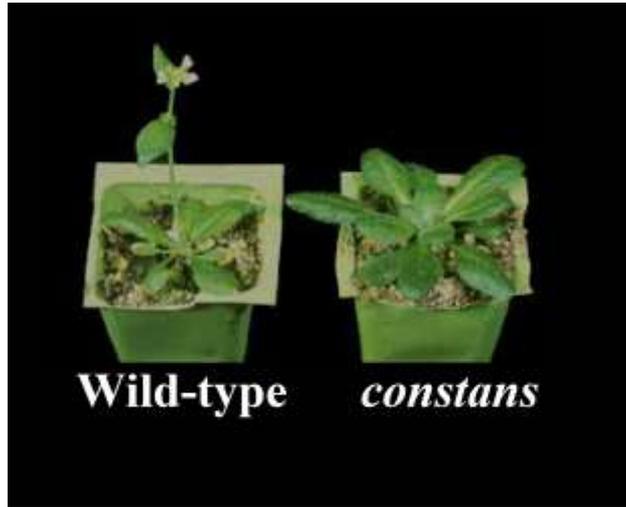
→ La floraison ne peut se faire que lorsque l'exposition à la lumière **coïncide** avec une phase appropriée du rythme.

Modèle de coïncidence externe (Pittendrigh and Minnis)

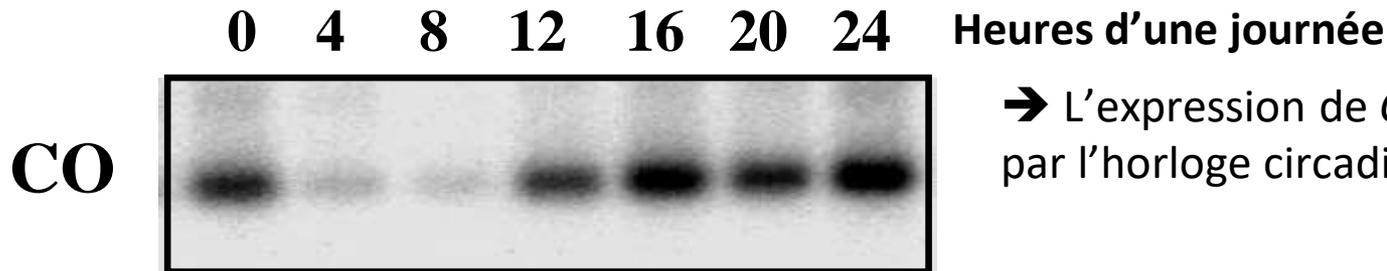
Induction en aval d'un facteur de floraison



Le facteur X correspond au produit du gène *CONSTANS* (CO)



→ Le mutant *constans* est incapable de fleurir

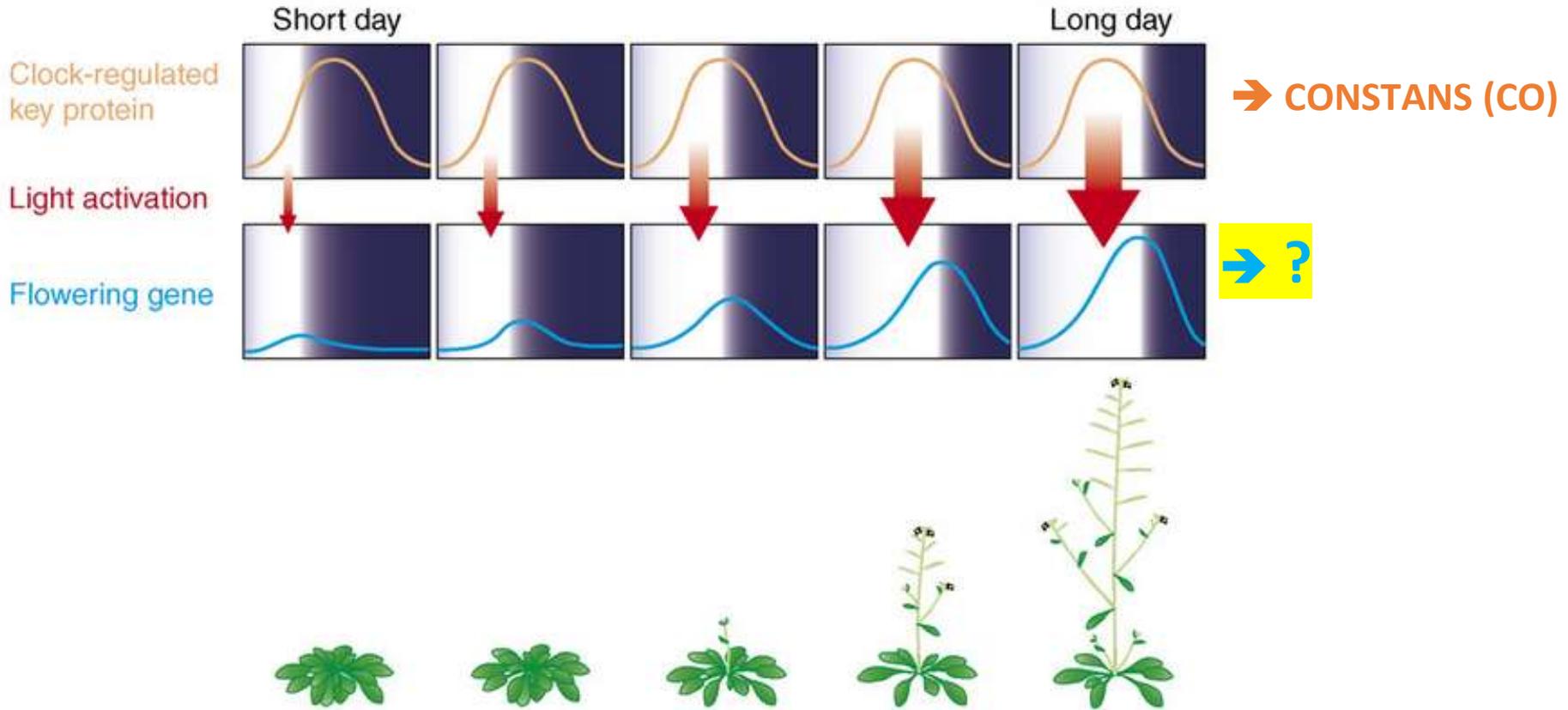


→ L'expression de *CONSTANS* est régulée par l'horloge circadienne

Rythme indépendant de la lumière

Modèle de coïncidence externe (Pittendrigh and Minnis)

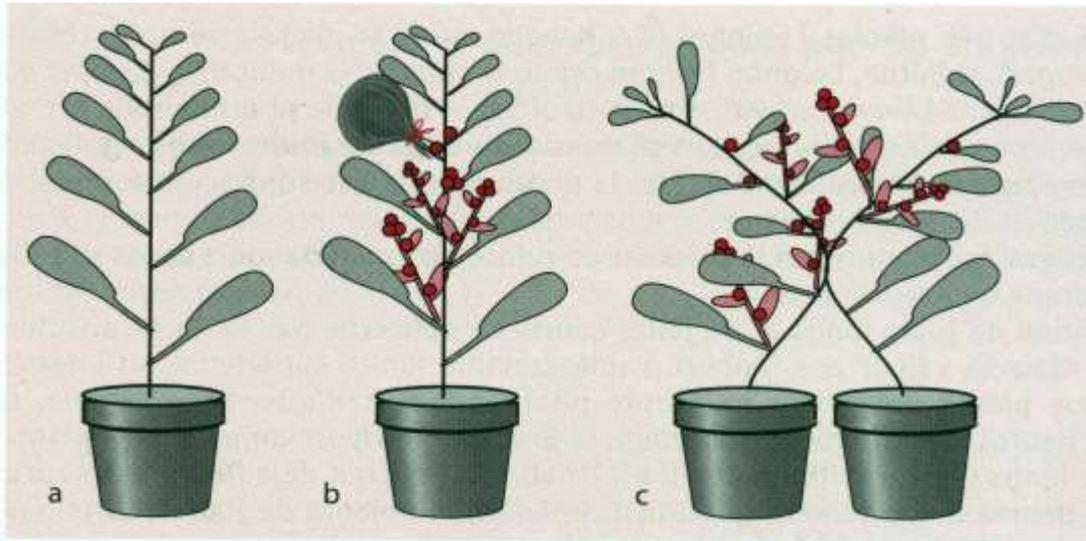
la phase lumineuse coïncide avec la présence d'un facteur x régulé de façon circadienne



TRENDS in Plant Science

A la recherche du signal de Floraison (= le Florigène)

Le signal est perçu par les feuilles et il est transmissible



Exemple : plante de JC

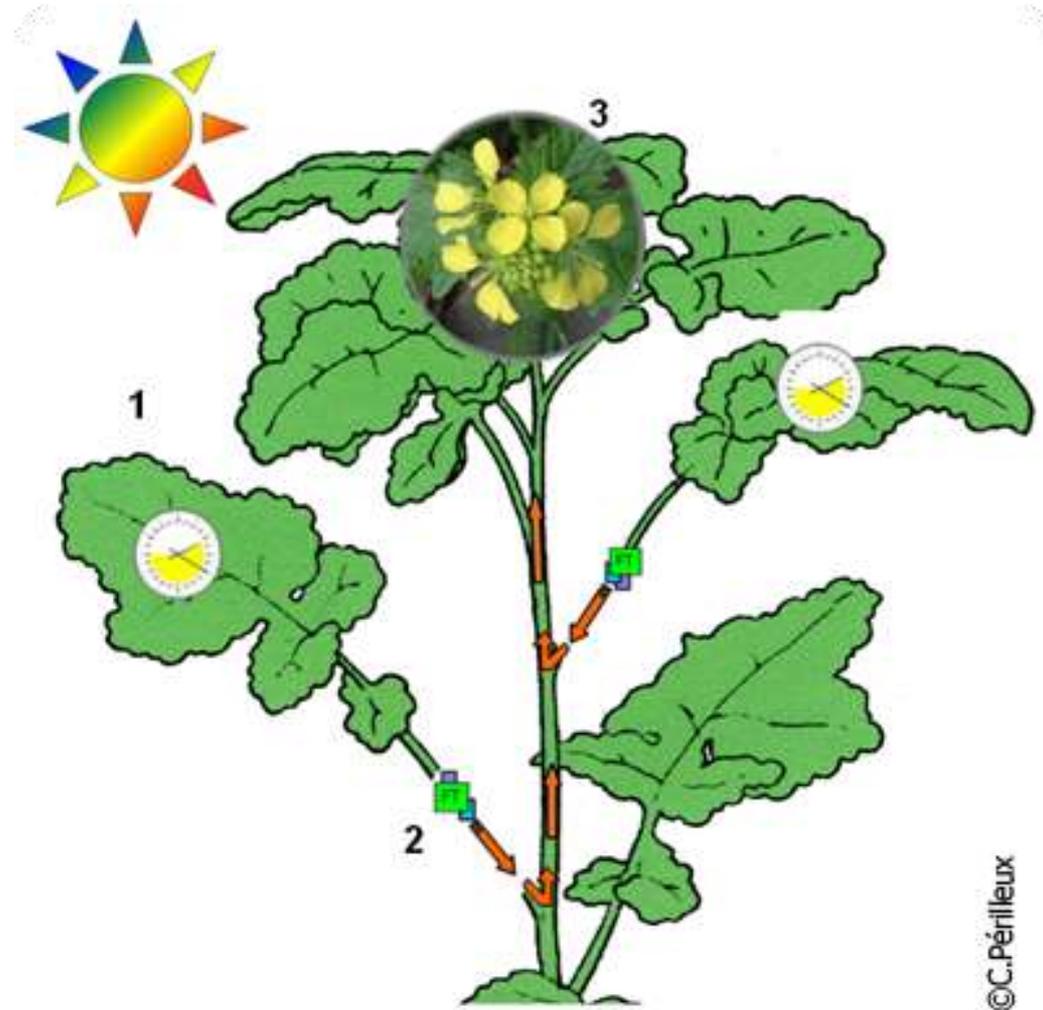
a – Plante de JC cultivée en JL

b – Si on place une seule feuille en JC, la plante fleurie

c – La greffe d'une plante cultivée en **Jours courts** provoque la floraison d'une plante cultivée en **Jours longs**

Le Florigène correspond à un facteur de transcription :

= FT Flowering Factor T qui est synthétisé dans les feuilles et transmis au MAC



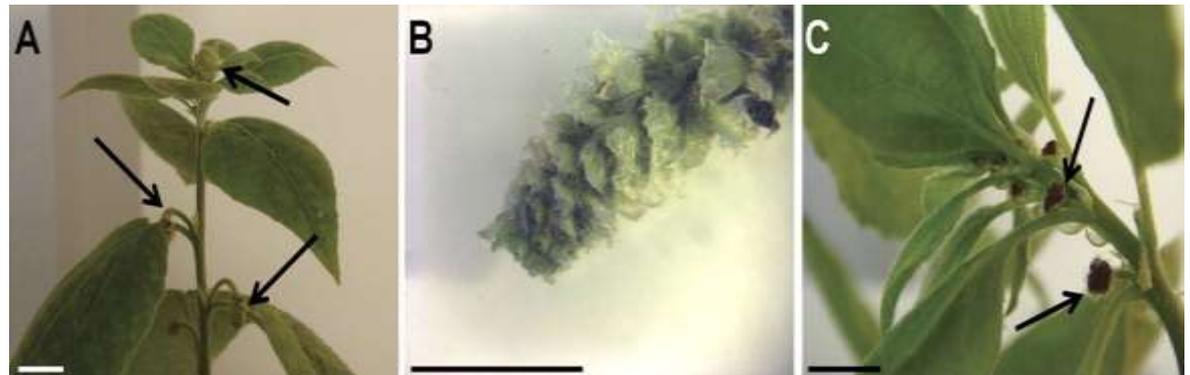
FT est suffisant et nécessaire pour induire la Floraison



WT

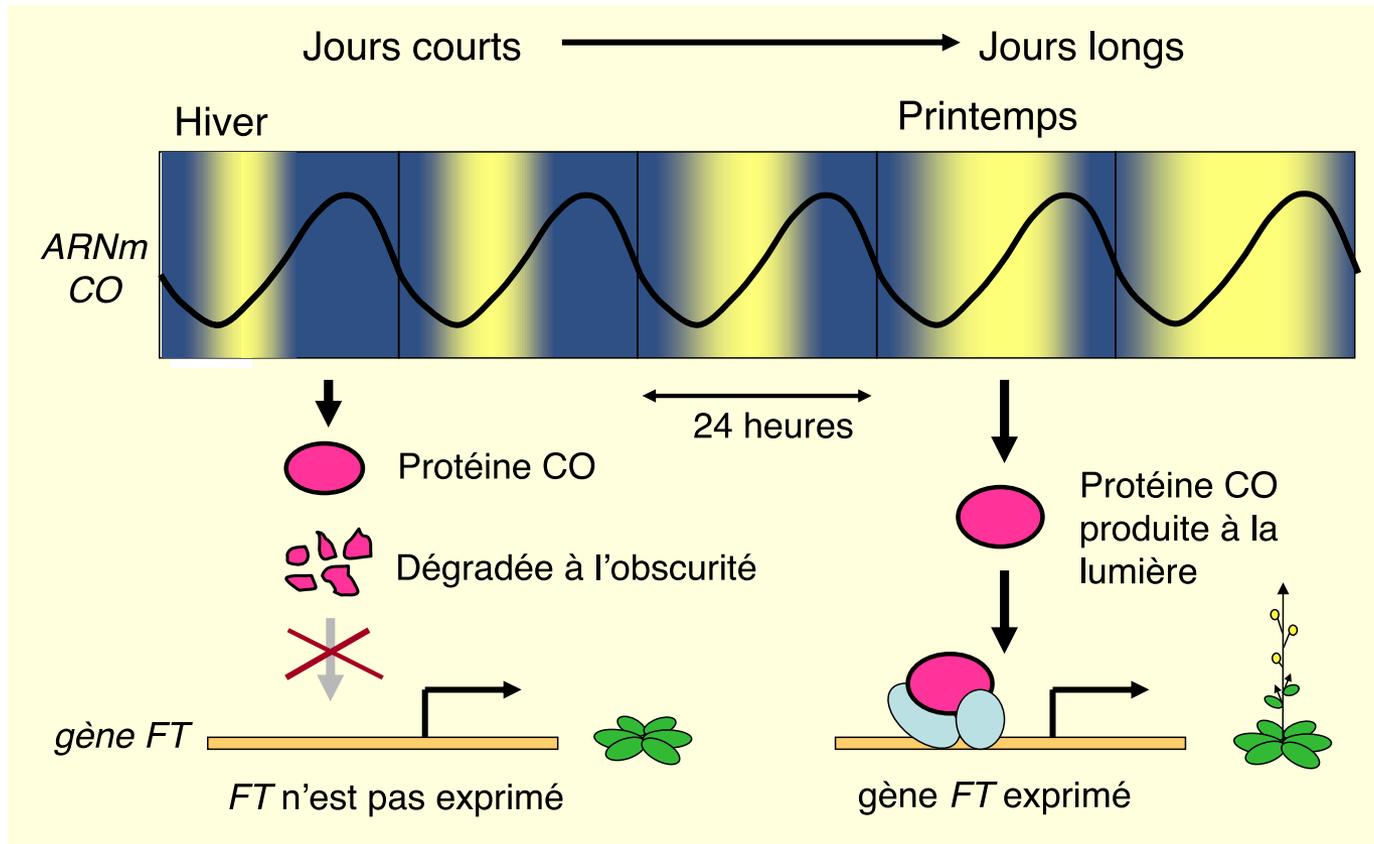
ft mutant

Floraison d'un Peuplier transgénique âgé de 4 mois au lieu de 10 ans par surexpression de FT



Zhang H et al. J. Exp. Bot. 2010;61:2549-2560

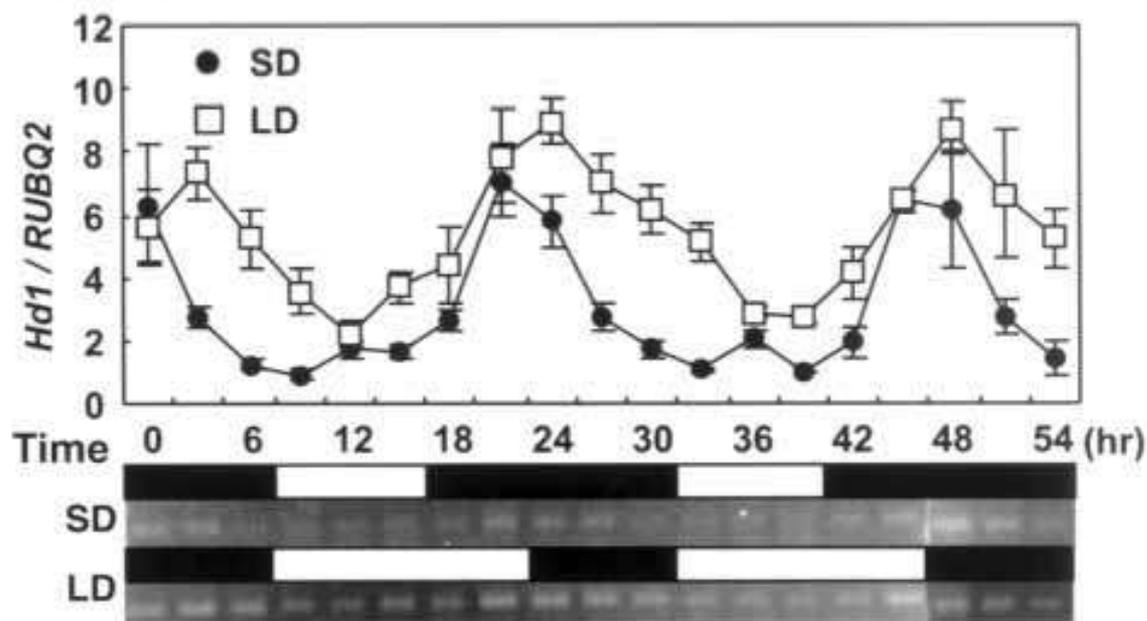
CONSTANS est stabilisé par l'action du Phytochrome A en fin de journée et induit l'expression de FT



Et chez les plantes de Jours courts?

Orthologue de CONSTANS chez le riz = HEADING DATE1 (HD1)

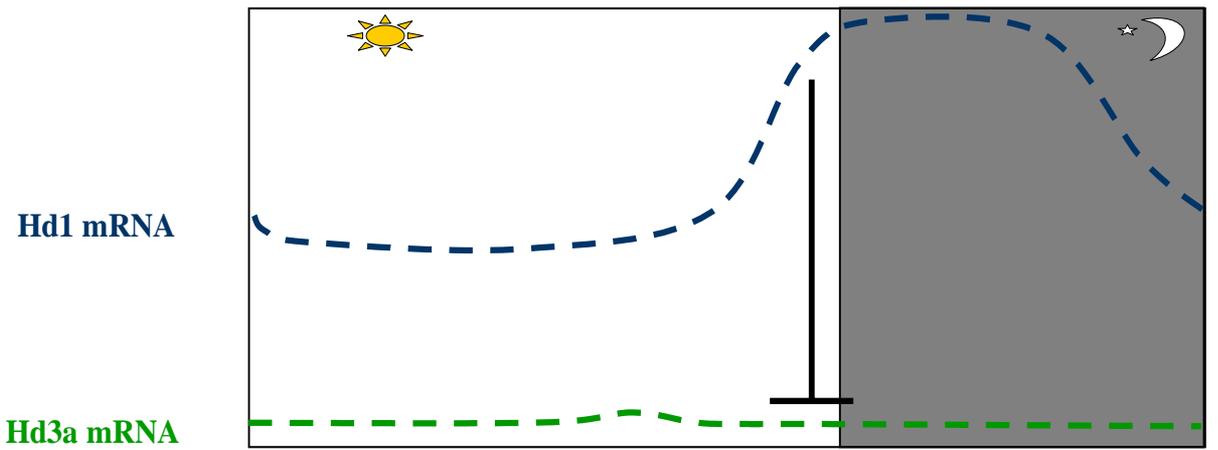
Même régulation de l'expression en fonction de la lumière



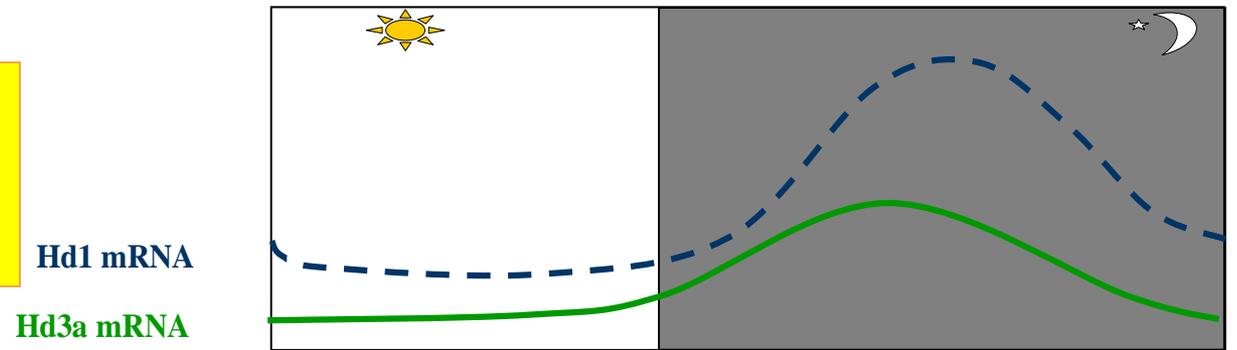
→ MAIS HD1 interagit avec un inhibiteur de la floraison présent uniquement chez les plantes de jours courts donc effet inhibiteur opposé de CONSTANS

HEADING 3 (HD3) = **Orthologue de FT** chez le riz (plante de jours courts)

Jours Longs
→ Hd1 inhibe Hd3
à la lumière

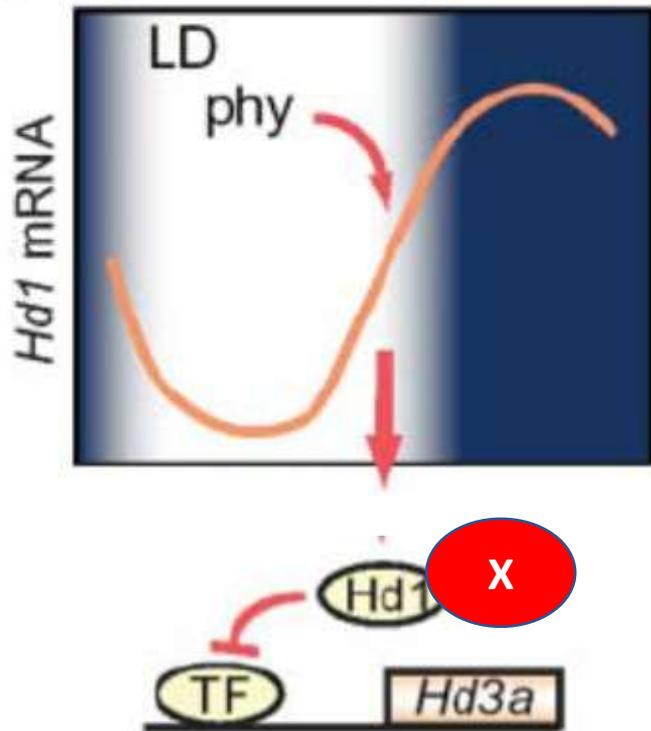


Jours courts
Le niveau basal de HD3
permet la floraison



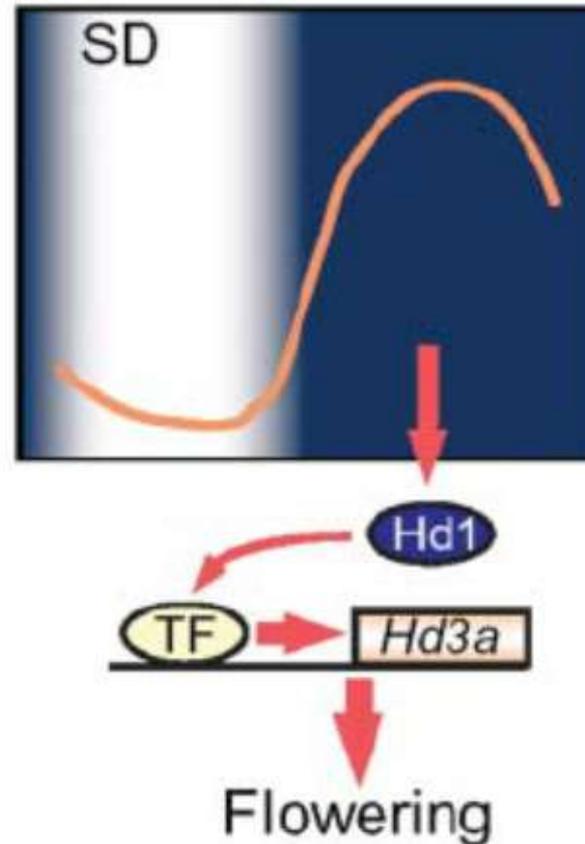
Jours Longs

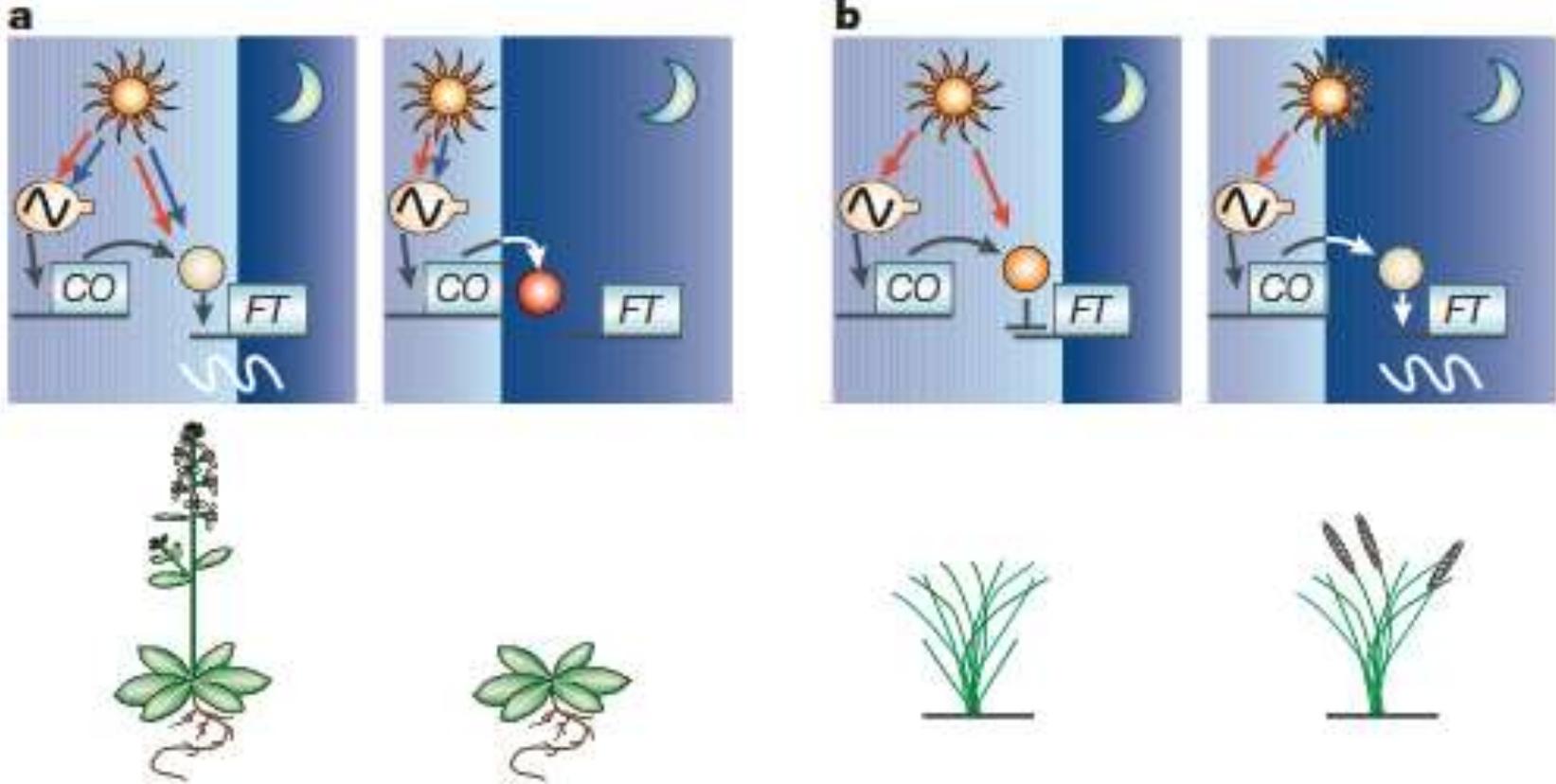
Phytochrome B active Inhibiteur (X)
Qui interagit avec HD1
HD1 inhibe HD3



Jours courts

Pas de synthèse d'inhibiteur à l'obscurité et
HD1 peut activer HD3

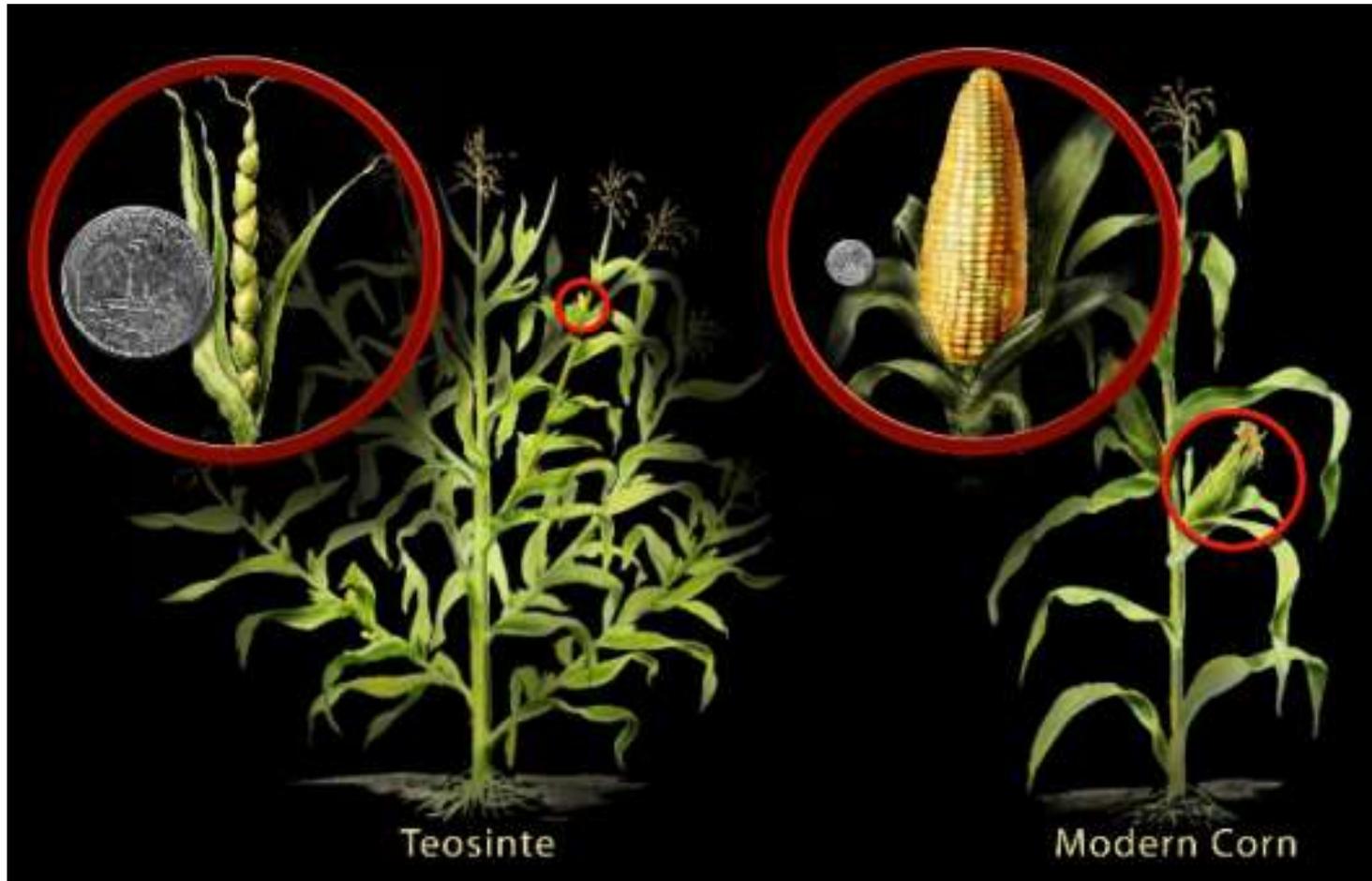




Cas d'une protéine identique qui présente 2 fonctions opposées selon son environnement cellulaire (Cf. TD6)

Et chez les plantes indifférentes à la photopériode?

Exemple de la domestication du Maïs



Plante de jour court

Plante indifférente

ZmCCT and the genetic basis of day-length adaptation underlying the postdomestication spread of maize

PNAS

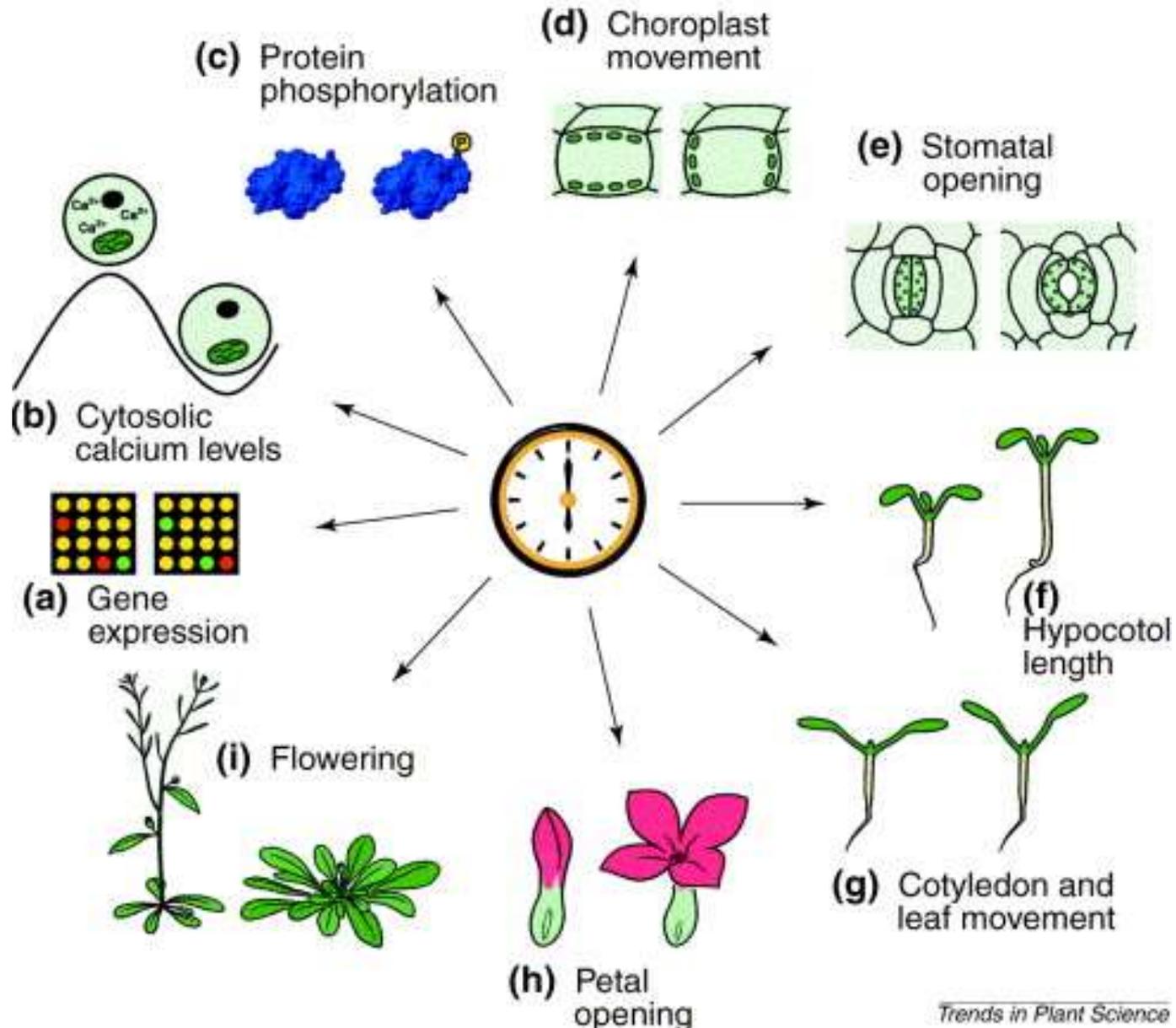
ZmCCT = Orthologue de Hd1 inactivé chez le maïs domestiqué
 → Hd3 n'est plus soumis à une régulation circadienne et la floraison est indépendante des saisons



Genotype	N ^o	DTA (d)	PH (cm)	EH (cm)	TLN	
T ₀ (+)	14	50.2±5.4	221.3±12.4	NA	24.3±1.3	ZmCCT
T ₀ (-)	8	34.1±4.4	168.5±17.1	NA	15.1±1.2	
<i>P</i>		2.35×10 ⁻⁷	4.58×10 ⁻¹¹	NA	2.95×10 ⁻¹⁵	

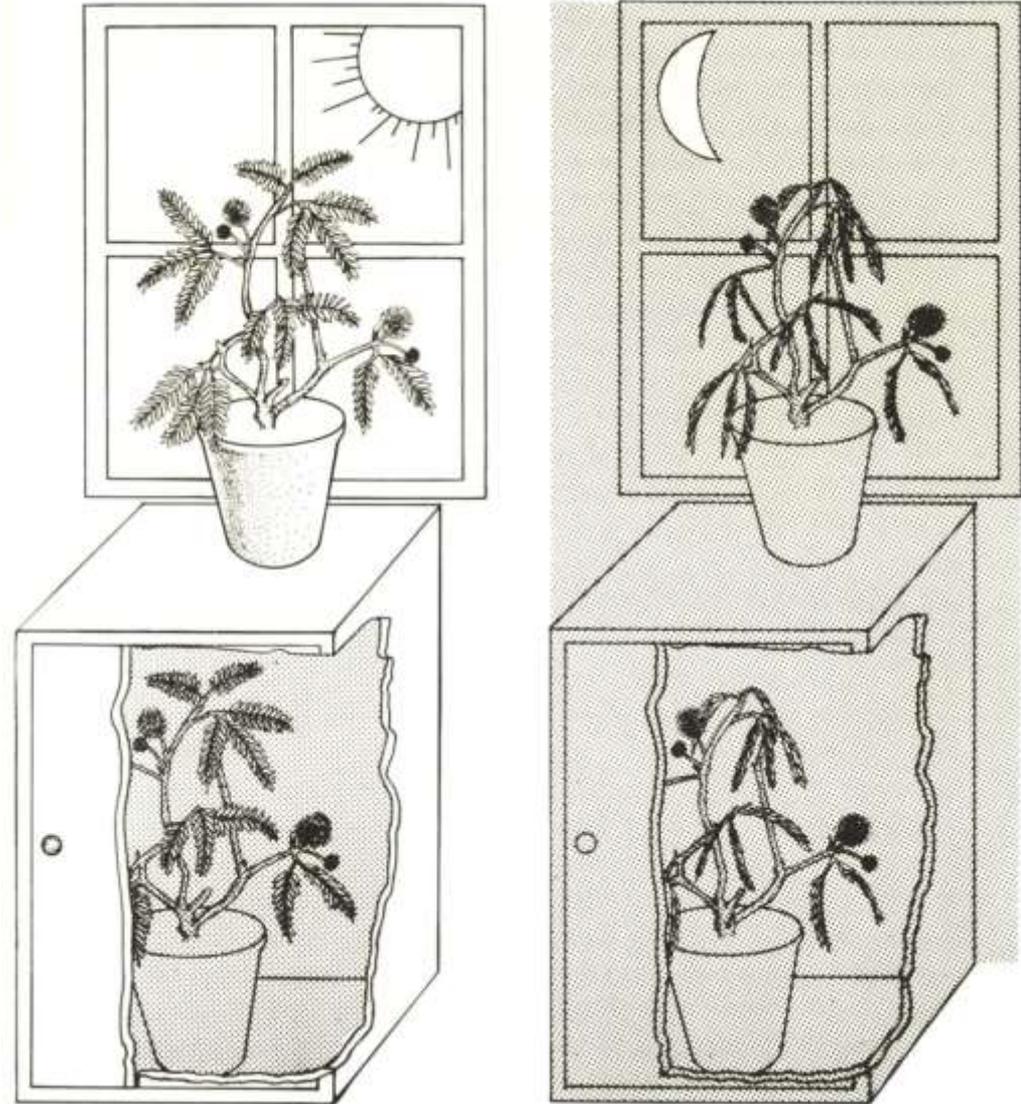
Inactivation de l'expression de ZmCCT = Indifférence à la photopériode

Rythmes circadiens chez les plantes



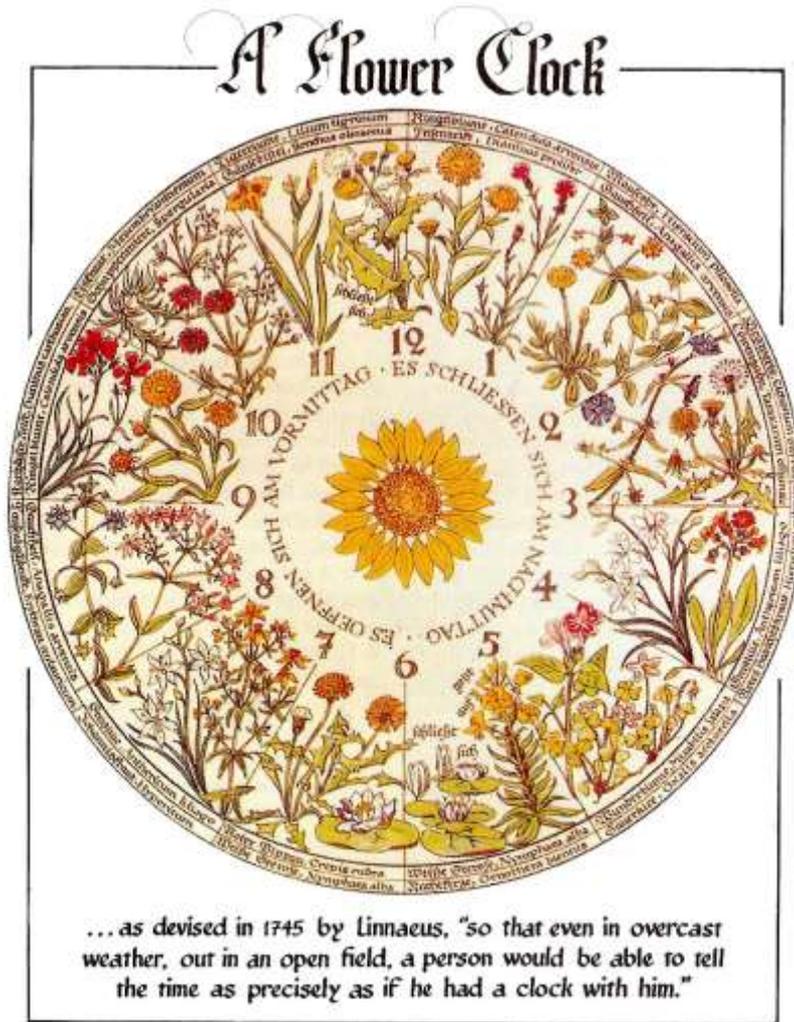
Le premier indice que les rythmes quotidiens sont internes

Daily rhythms of
"sleep movements"
of leaves (*Mimosa*).

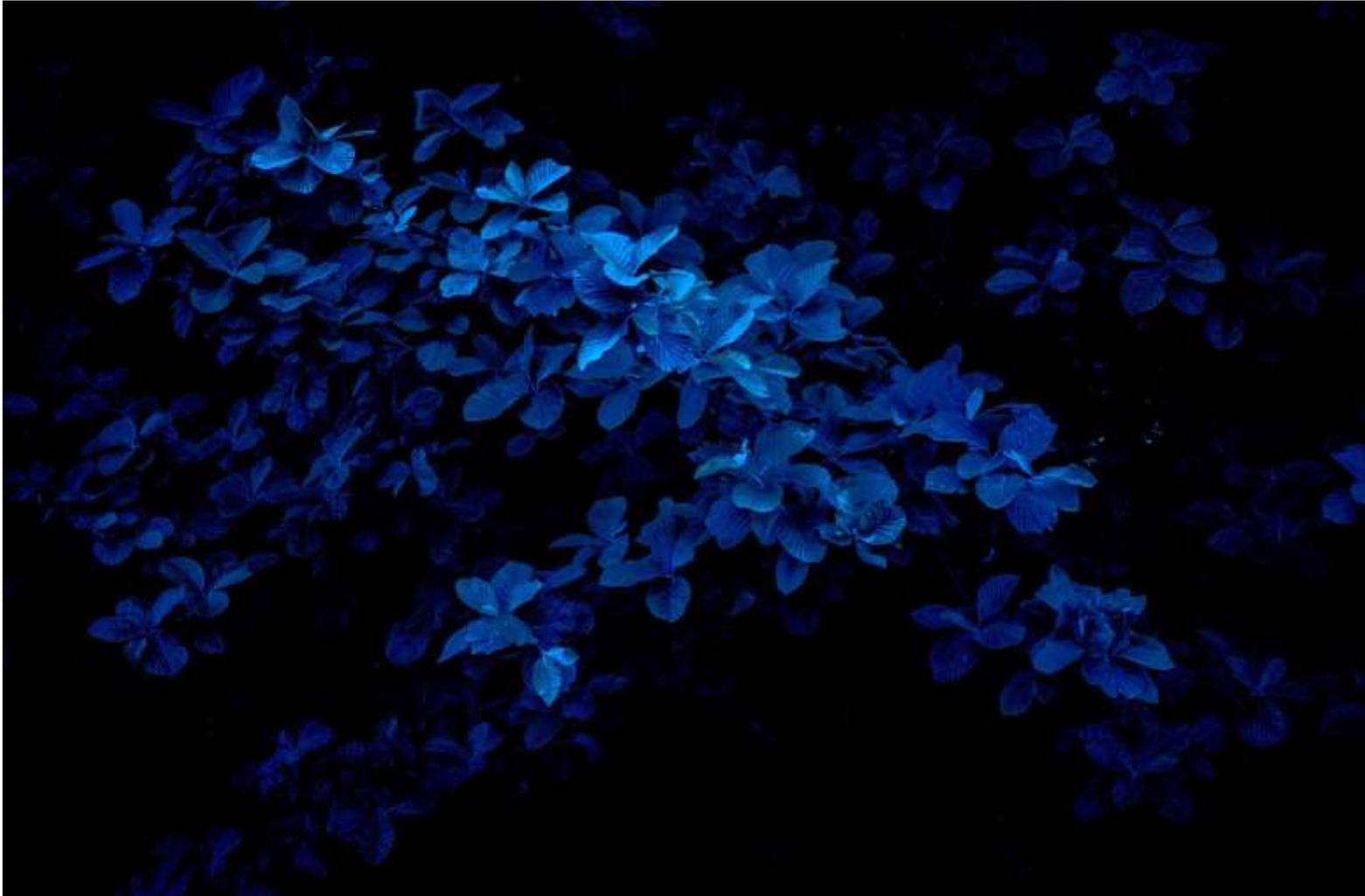


Jean-Jacques deMairan's
Experiment (1729)

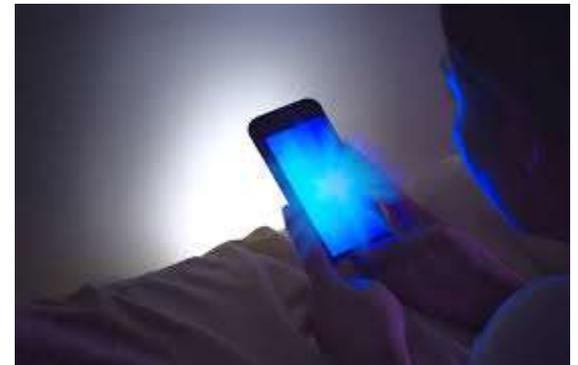
L'ouverture et la fermeture des pétales au cours d'une journée



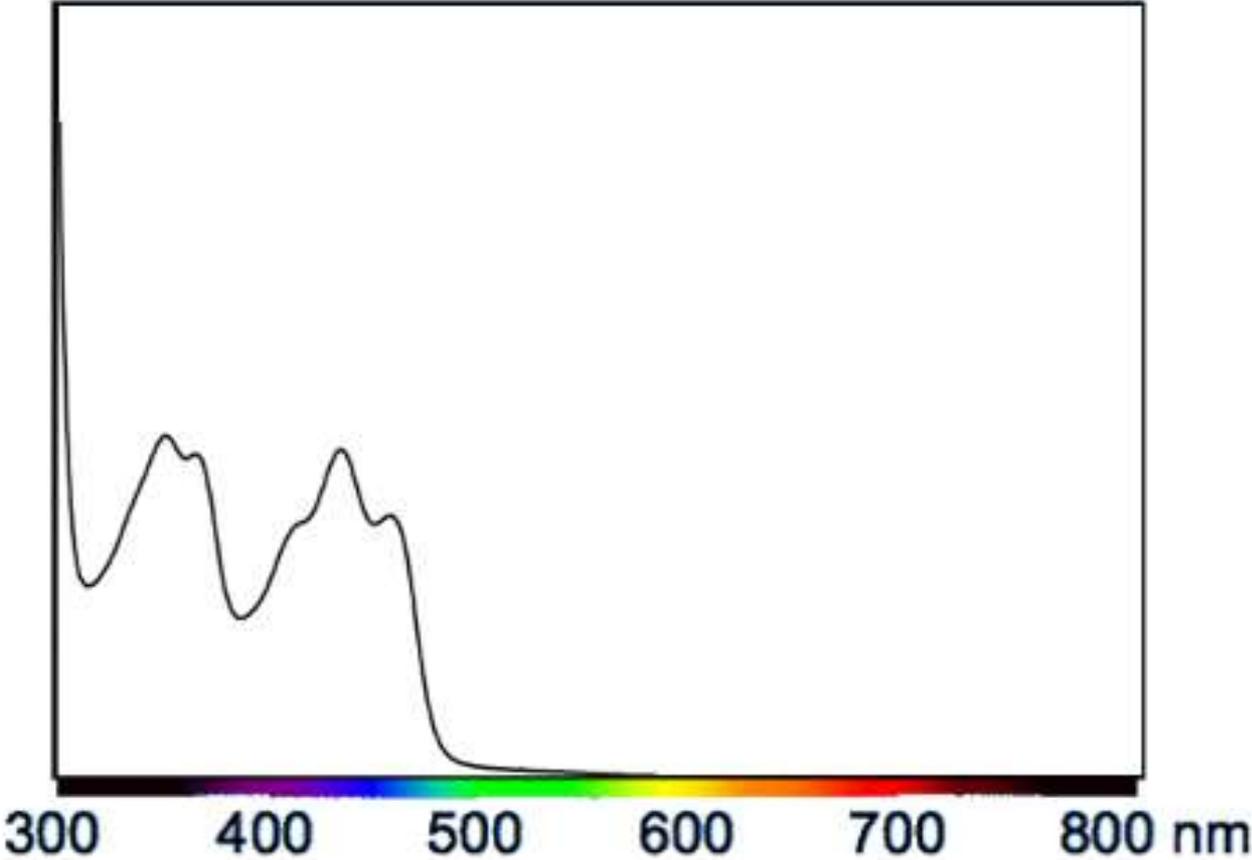
2 – Les cryptochromes et la lumière bleue



Un rôle important dans le contrôle de l'horloge circadienne



Photorécepteurs à la lumière bleue (420-460 nm) et ultraviolette (360-380 nm)



Des photorécepteurs universels

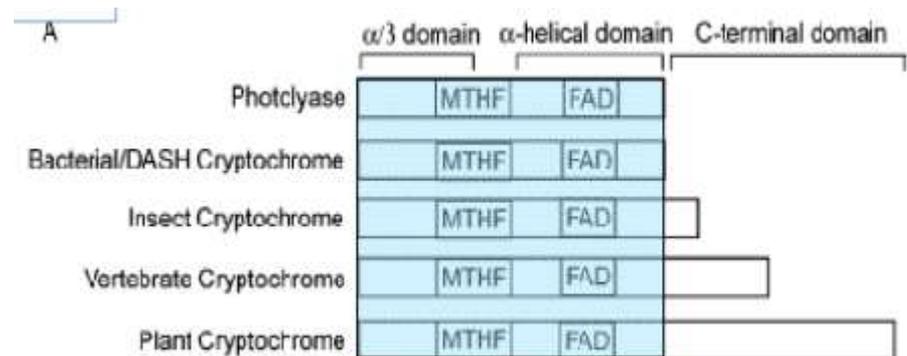
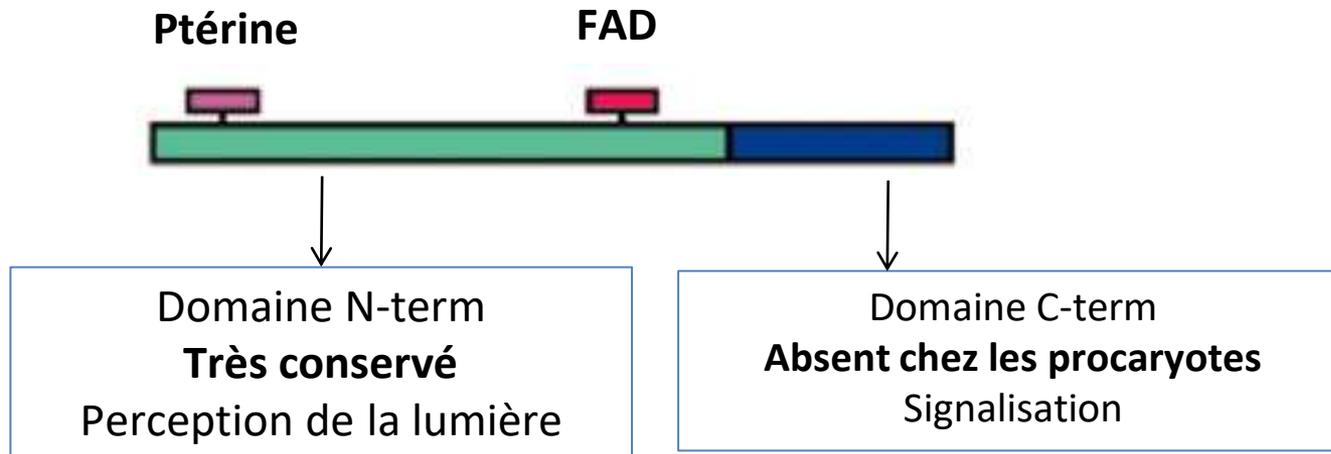
Présents chez:

- les bactéries (étudiés chez Cyanobactérie)
- les plantes (étudiés chez *Arabidopsis*, tomates, pois)
- les animaux (drosophile, souris, homme).

Les cryptochromes ont été identifiés pour la première fois chez les plantes

2-1 Structure des cryptochromes (= Flavoprotéine)

- Le cryptochrome fixe 2 types de chromophores dans son domaine PHR
 - Une flavine adénine dinucléotide (**FAD**)
 - Un 5,10-methenyltetrahydrofolate (**Ptérine** ou MTHF)



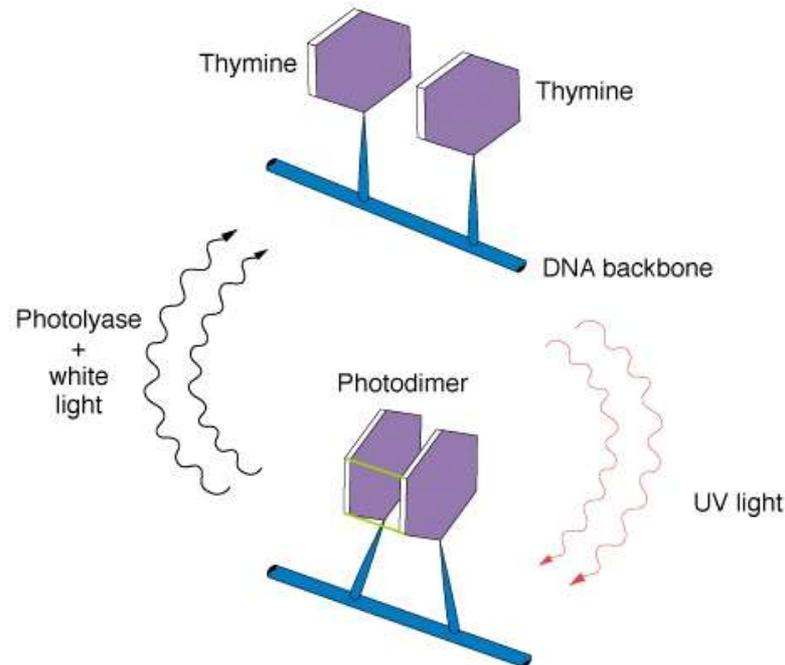
Forte homologie avec les enzymes **Photolyases** impliquées dans la réparation de l'ADN après irradiations aux UV chez les procaryotes



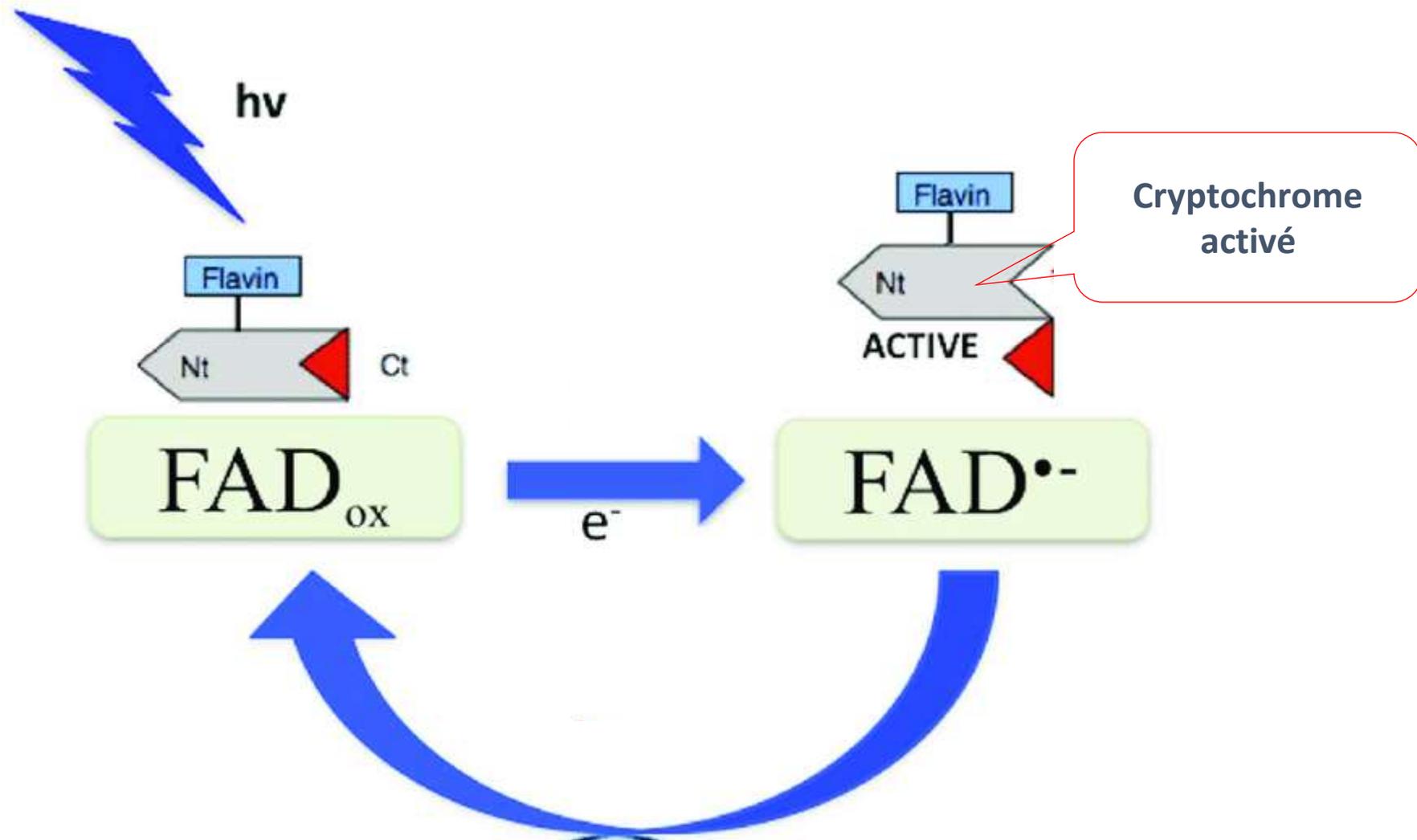
E. Coli photolyase (phr)



A. thaliana cry1

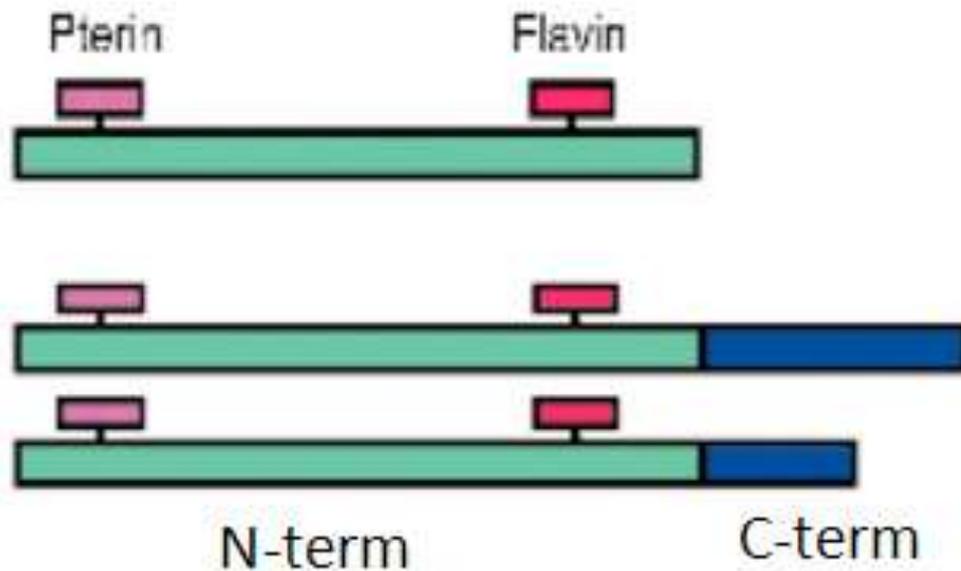


La photoactivation du Co-Facteur FAD provoque une réduction du co-facteur FAD. Le transfert d'électron provoque un changement de conformation



Petite Famille multigénique composée de au moins deux membres:

CRY1 et CRY2

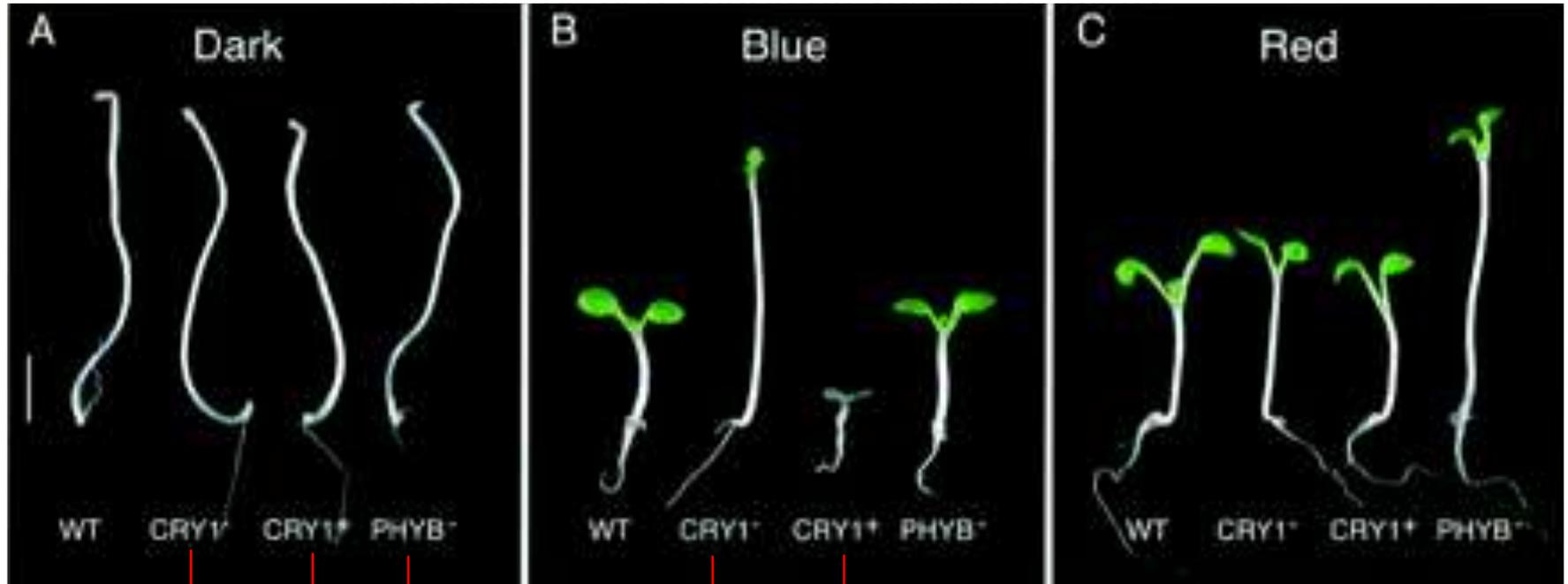


E. Coli photolyase (phr)

A.thaliana cry1

A.thaliana cry2

Les cryptochromes ont été identifiés grâce à des mutants insensibles à la lumière bleue



Mutant *cry1*

Mutant
Phytochrome

Surproducteur de la
protéine CRY1

Hypersensible

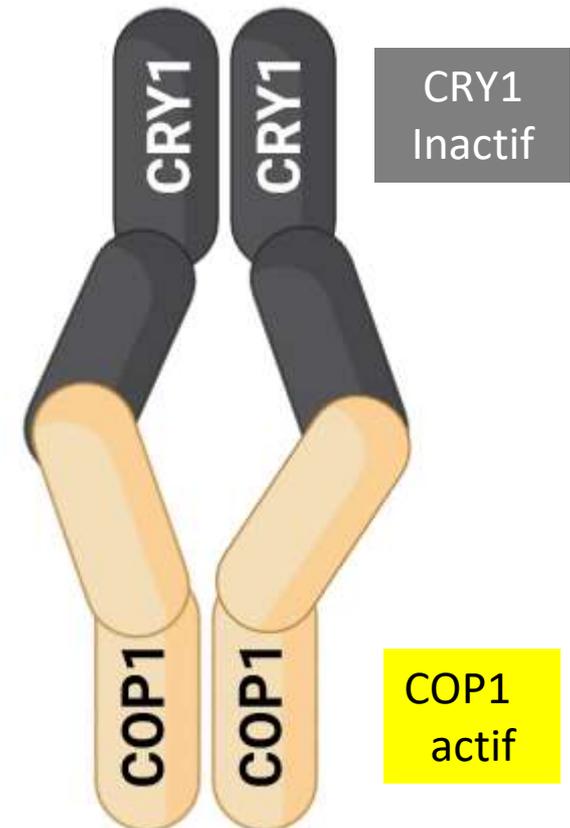
Insensible

CRY1 et CRY2 ne sont pas redondants

2-2 Mode d'action moléculaire des cryptochromes

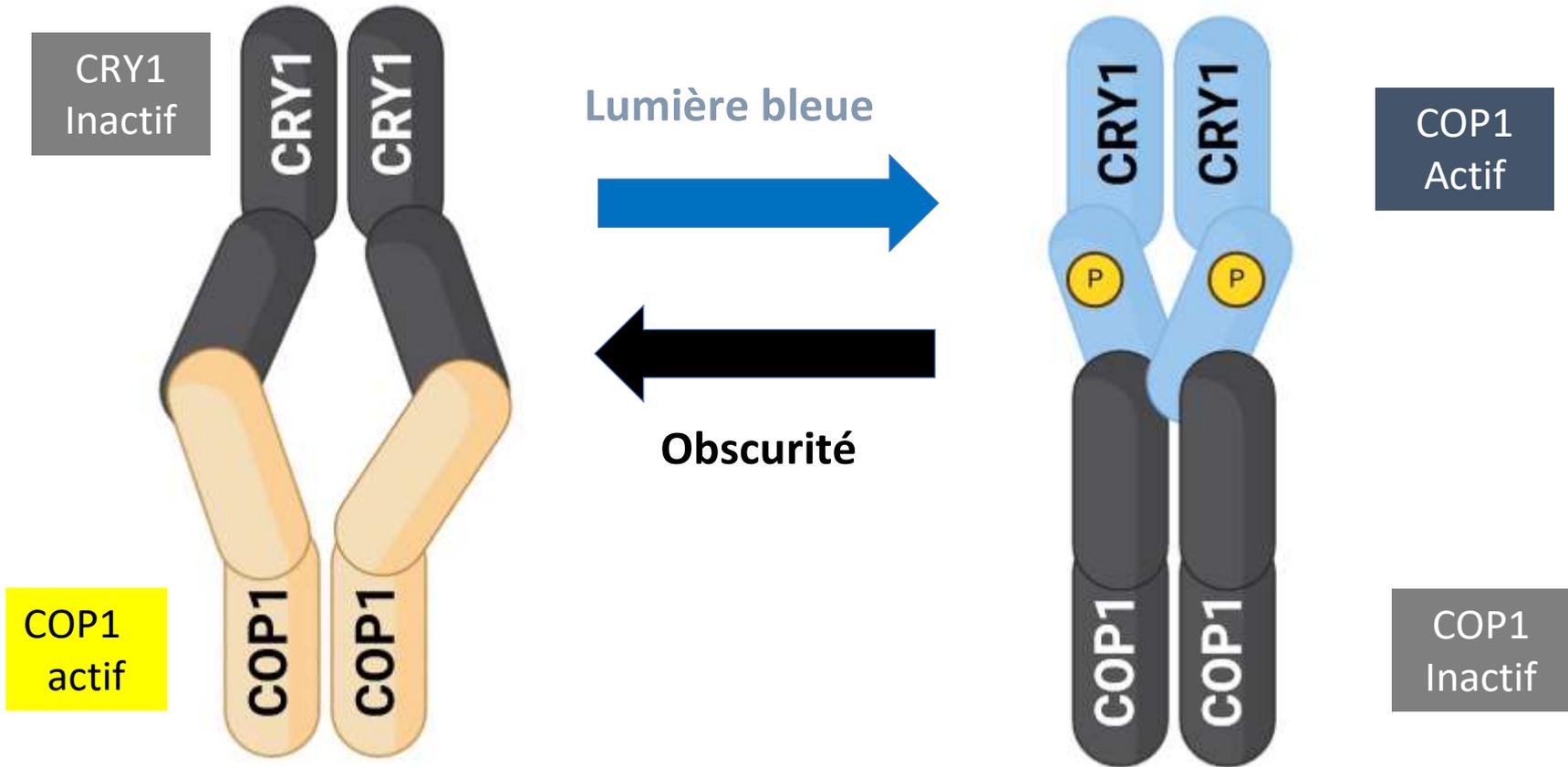
- La lumière bleue provoque un changement de conformation
- Autophosphorylation de la partie terminale
- Transduction du signal

CRY1 interagit avec COP1



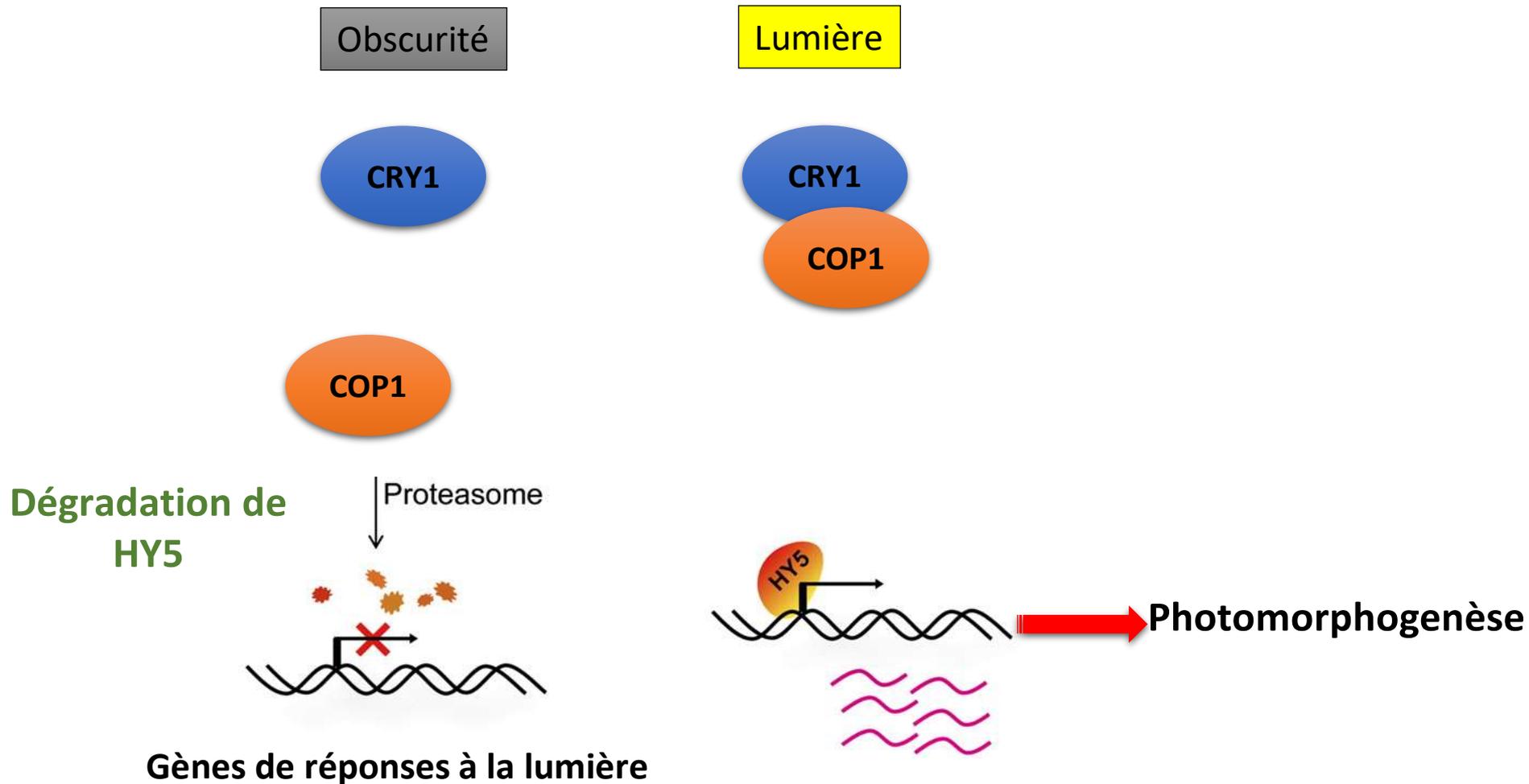
COP1= « Constitutive Photomorphogenesis »

Interaction avec CRY1 inhibe l'action de COP1



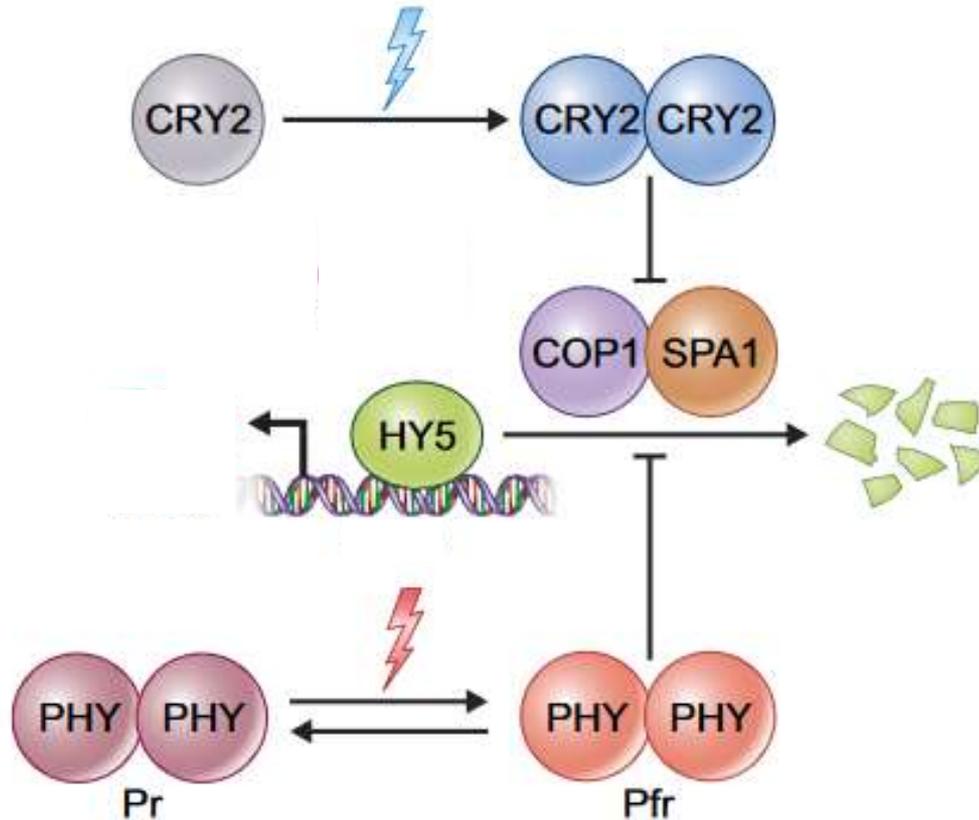
COP1 est actif à l'obscurité

CRY1 inhibe COP1 en lumière bleue



Conclusions: les réponses de photomorphogenèse sont constamment réprimées à l'obscurité

Interactions des voies de signalisation Phytochromes / Cryptochromes

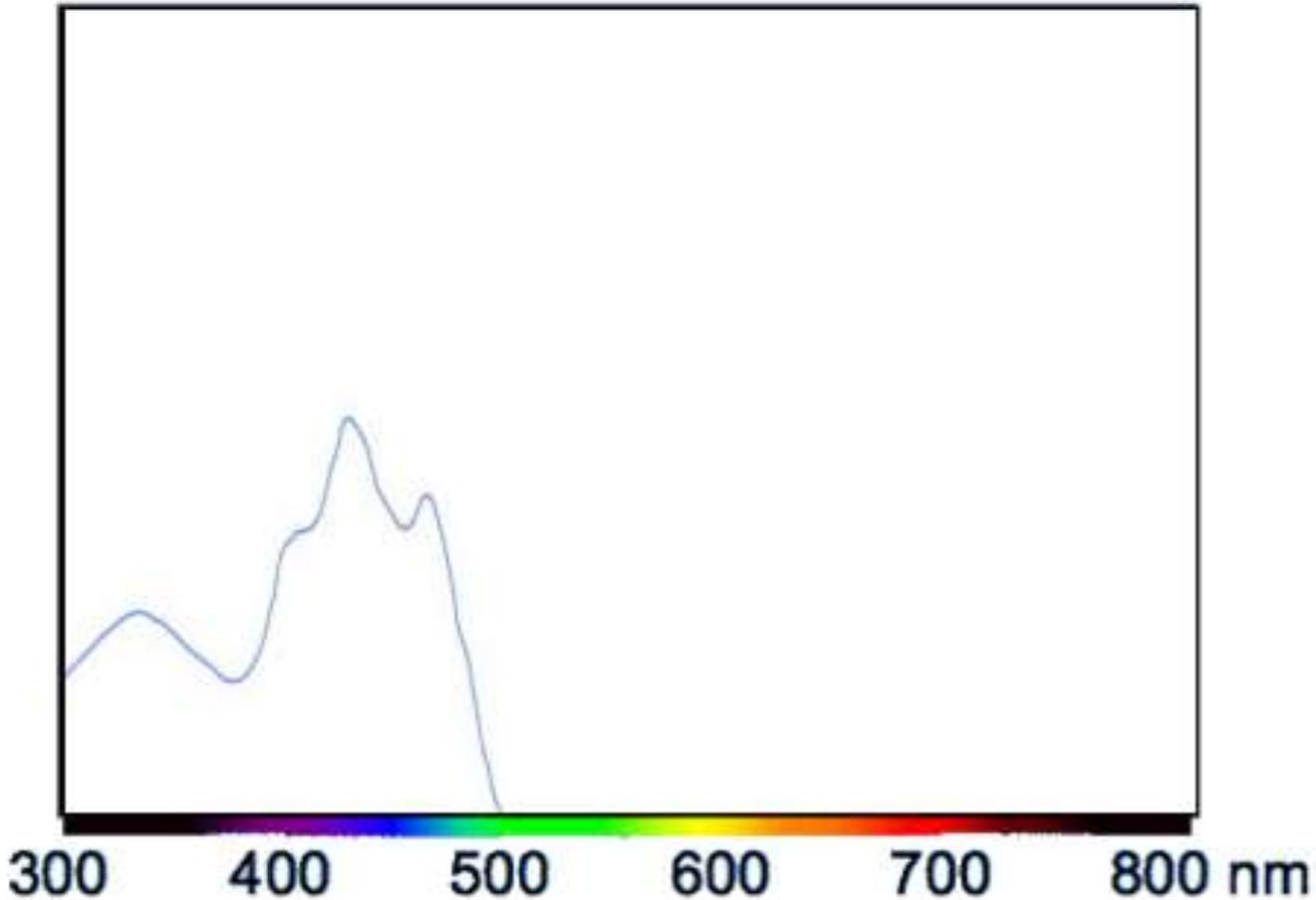


Acteurs moléculaires communs entre la perception de la lumière bleue et rouge

3 – Les phototropines et la lumière bleue



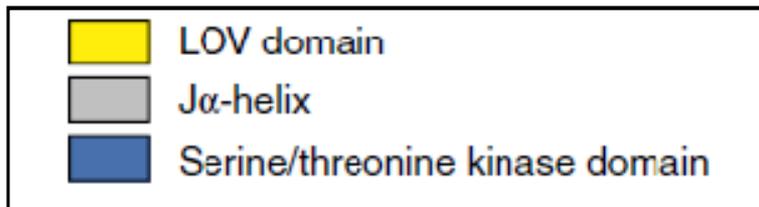
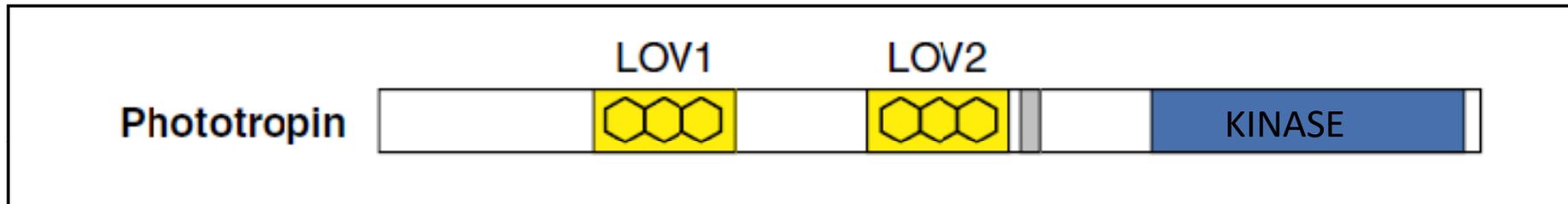
Spectre d'absorption des phototropines



Sensibles à la lumière bleue, entre 450 et 500 nm et dans les UV (360 – 380 nm).

Aporotéine (996 aa)

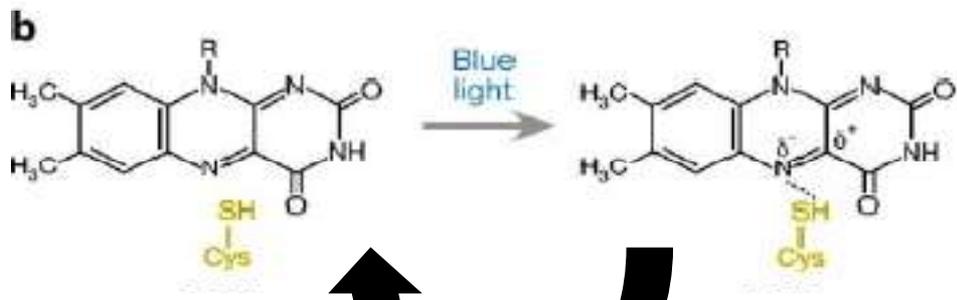
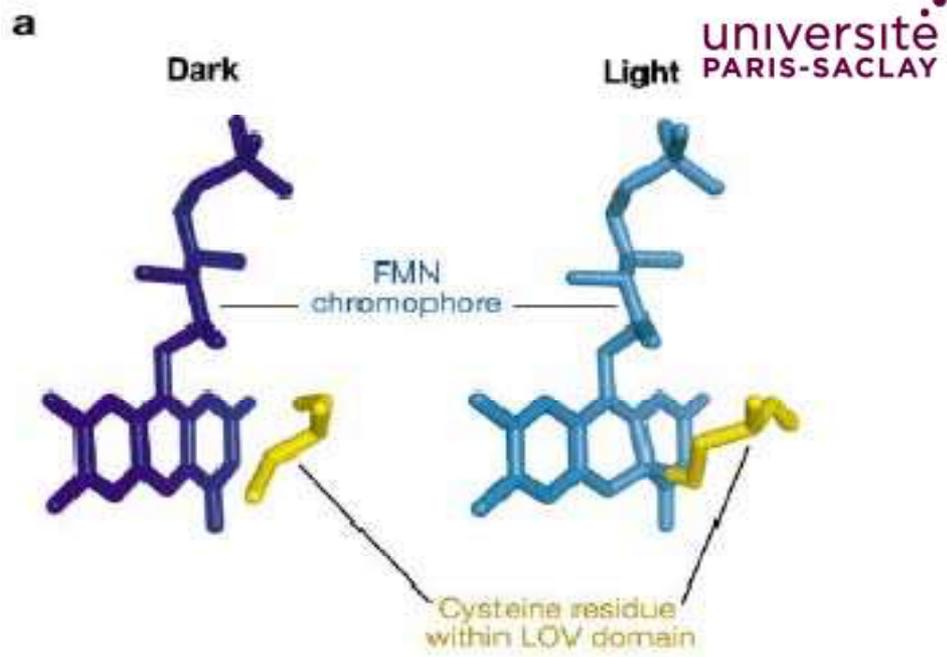
- Partie C-terminal contient un domaine à activité kinase
- Partie N-terminal contient des domaines LOV qui lient des chromophores
- « LOV = Light Oxygen Voltage »



Chromophore

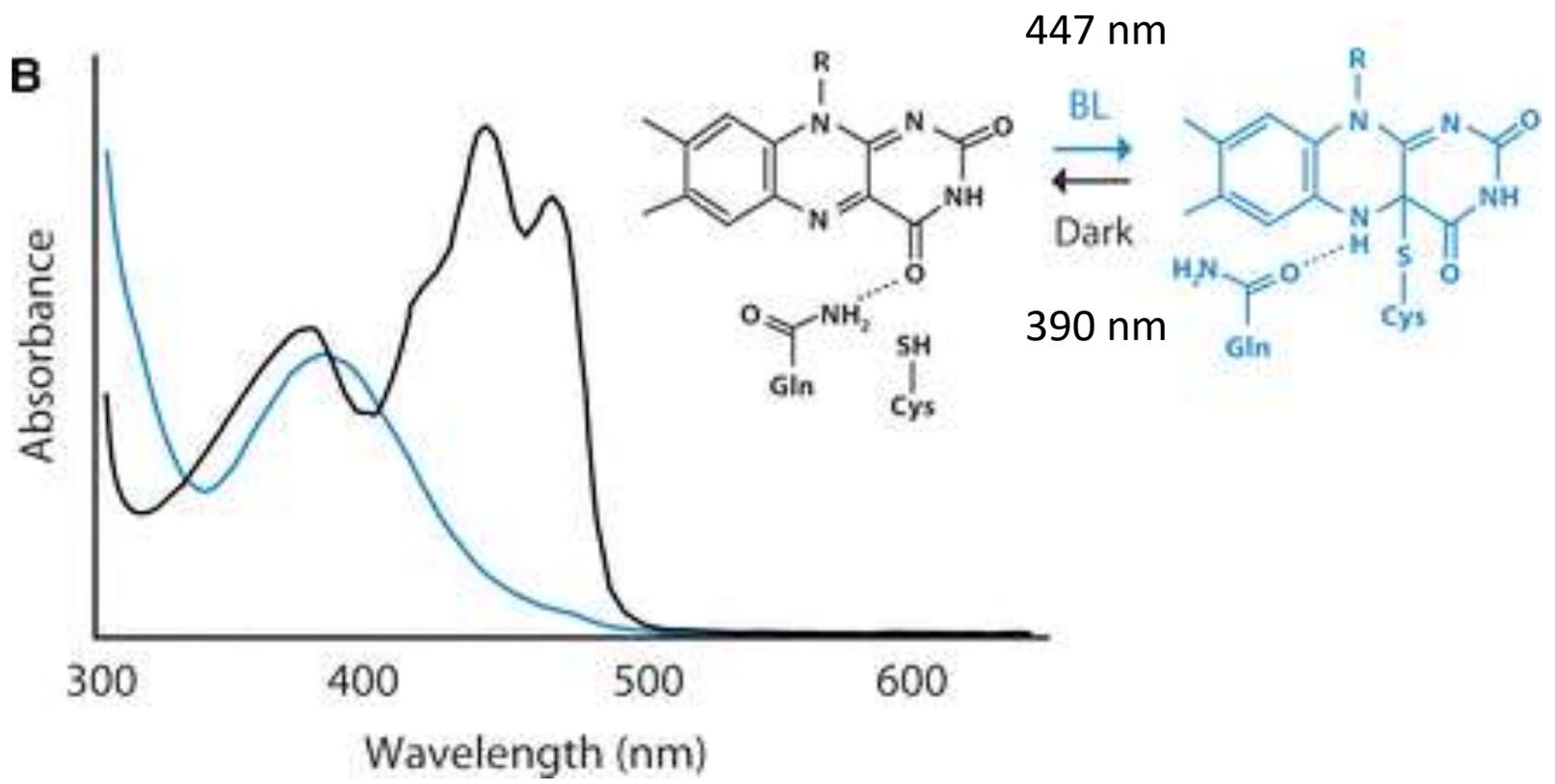
= Flavine Mononucléotide (FMN)
qui se lie aux domaines LOV

- A l'obscurité, le chromophore est lié de façon non covalente au domaine LOV (**forme inactive**).
- A la lumière bleue, formation d'une liaison covalente entre le chromophore et un résidu cystéine dans le domaine LOV (**forme active**)
- Cette réaction est totalement réversible à l'obscurité.



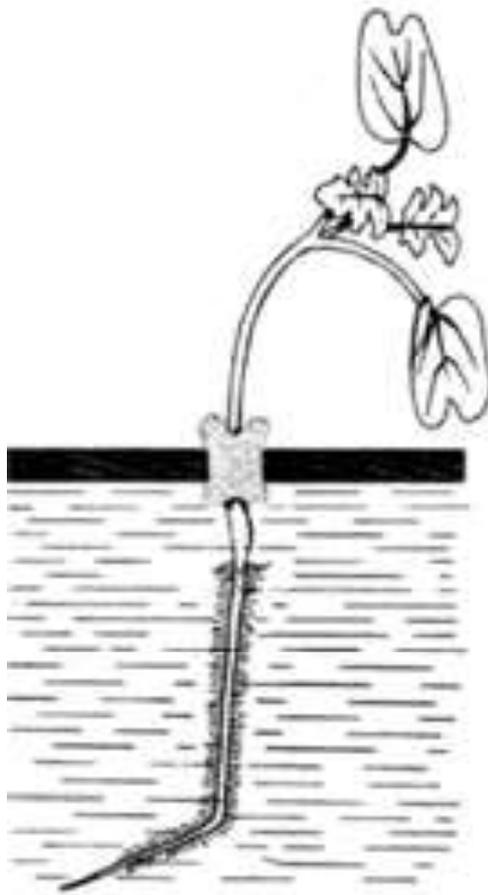
Réversible à l'obscurité

Photoconversion du spectre d'absorption

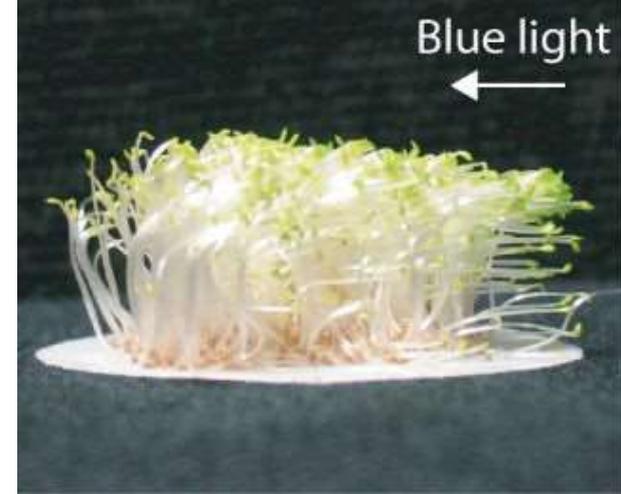


3-2 Rôles biologiques des phototropines

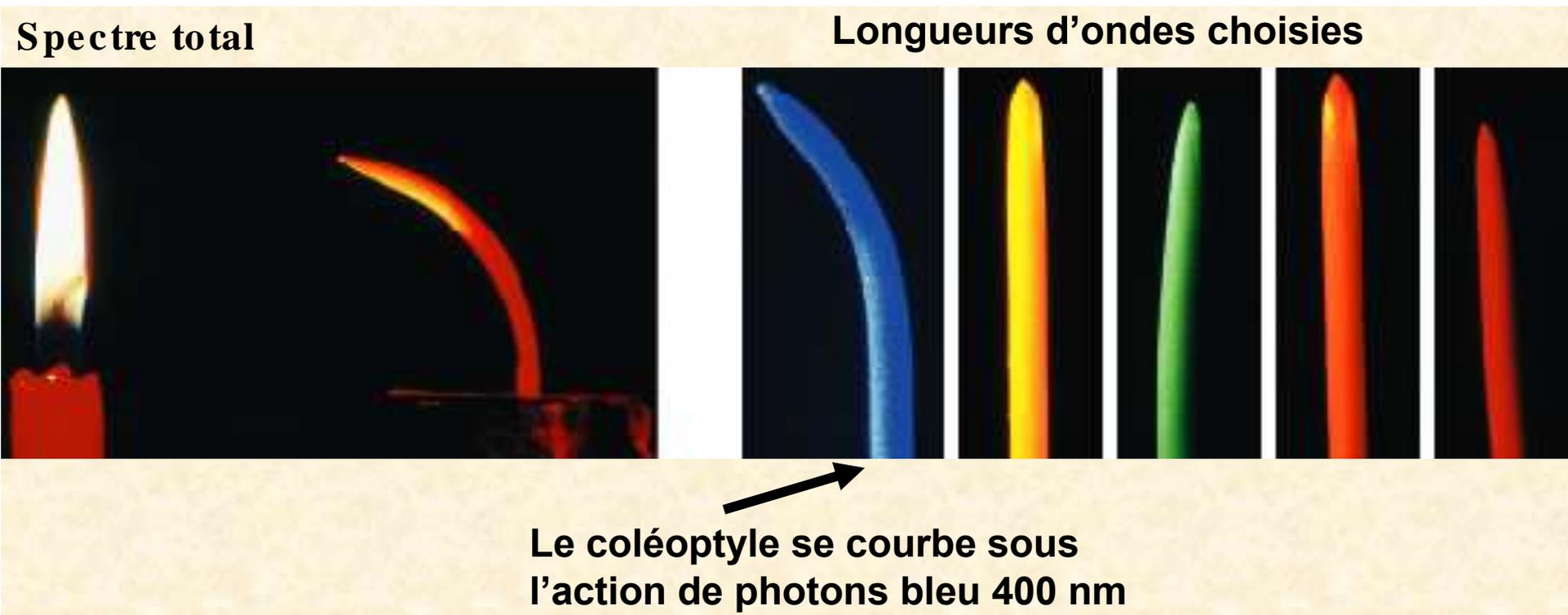
3-2-1- Phototropisme



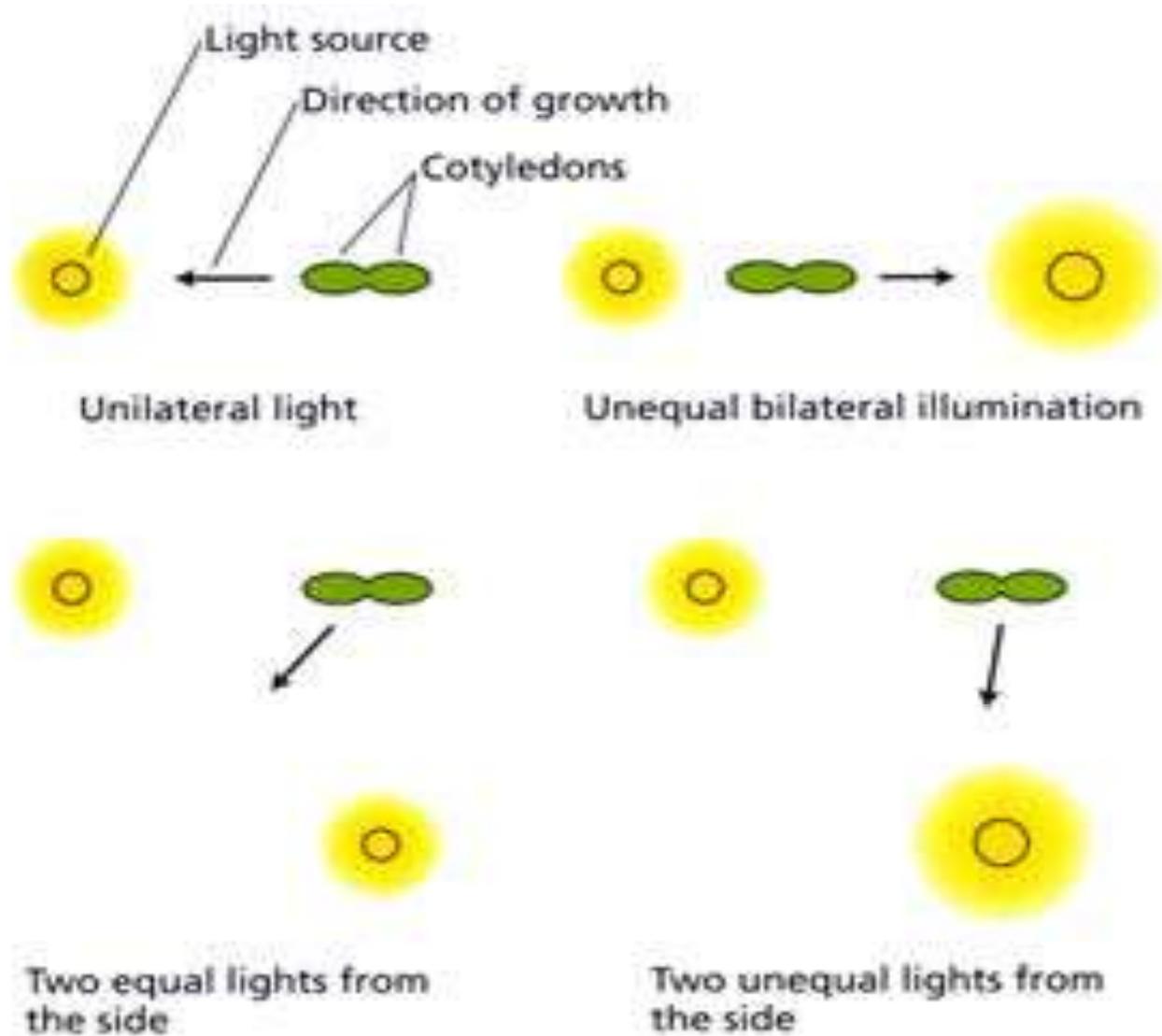
Phototropisme Positif



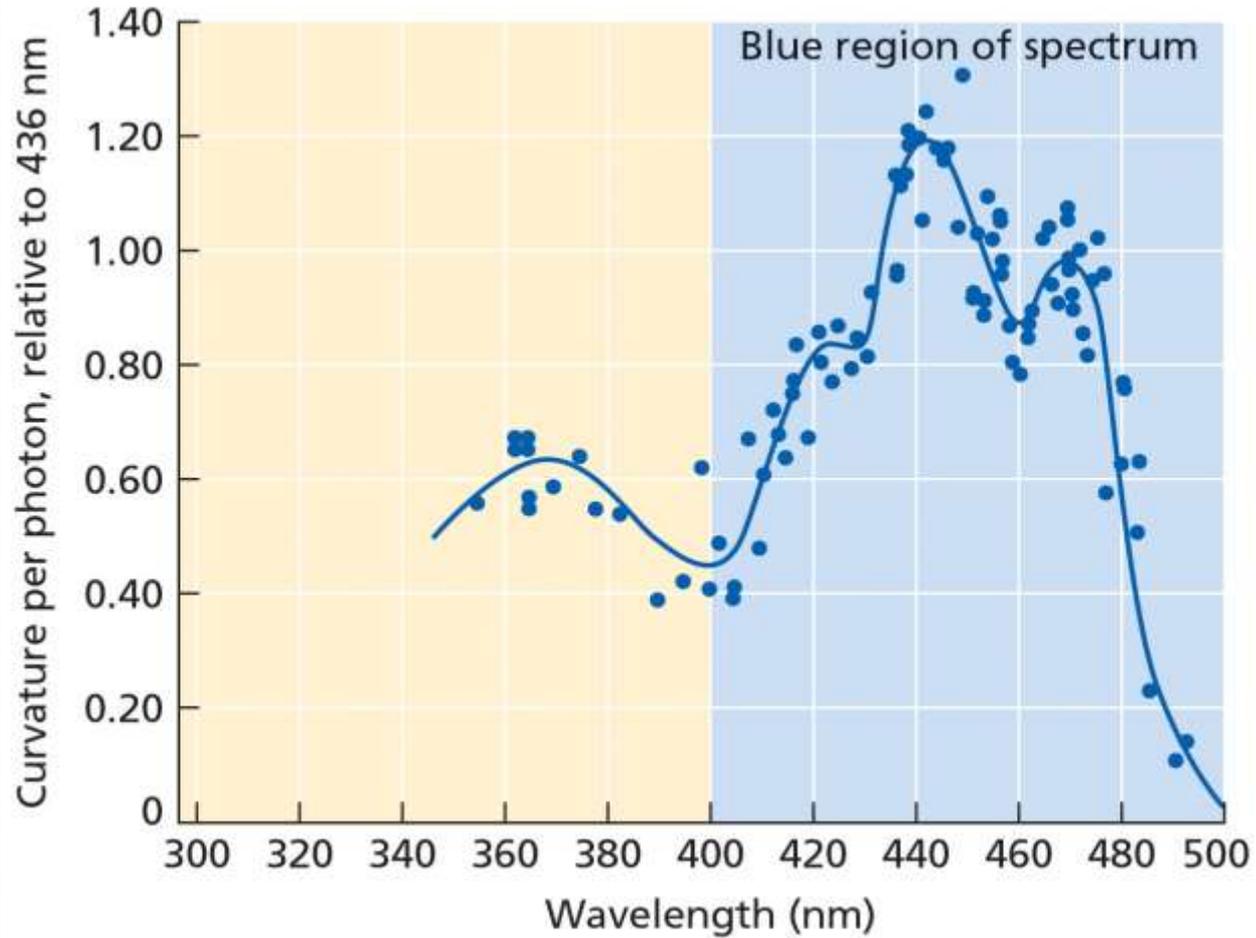
Seule la lumière bleue est impliquée dans le phototropisme



Réponse quantitative

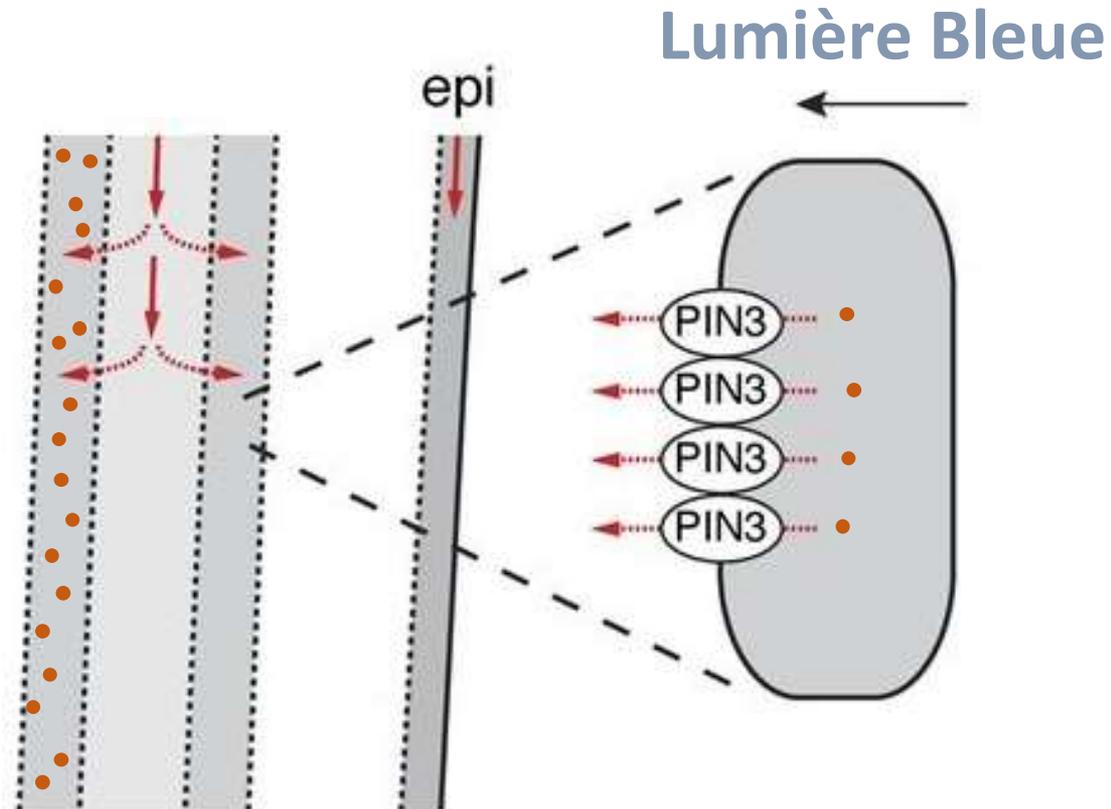


Spectre d'action du phototropisme



PLANT PHYSIOLOGY, Third Edition, Figure 18.1 © 2002 Sinauer Associates, Inc.

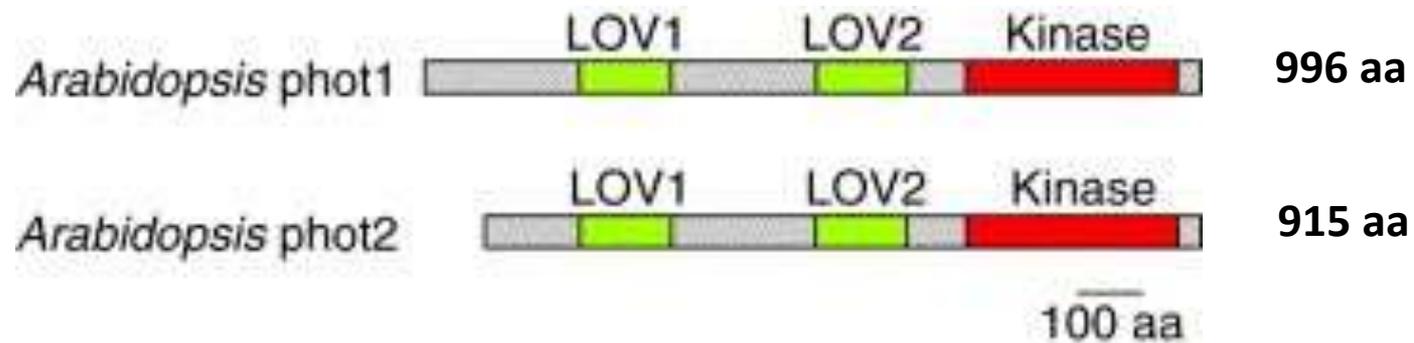
La lumière bleue provoque une redistribution des transporteurs polarisés PIN3



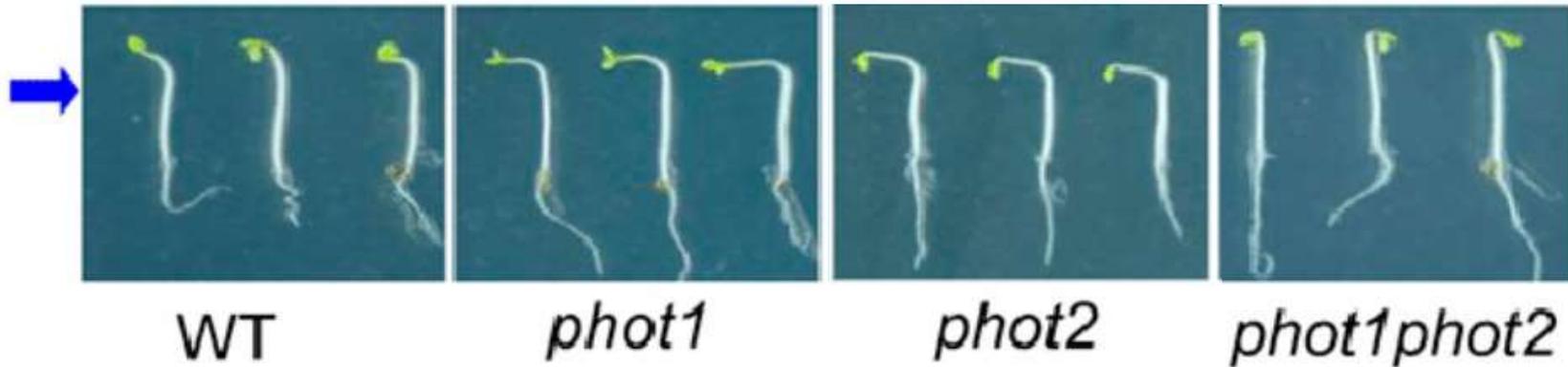
Epi = épiderme

● AIA

Phototropine: Petite famille multigénique



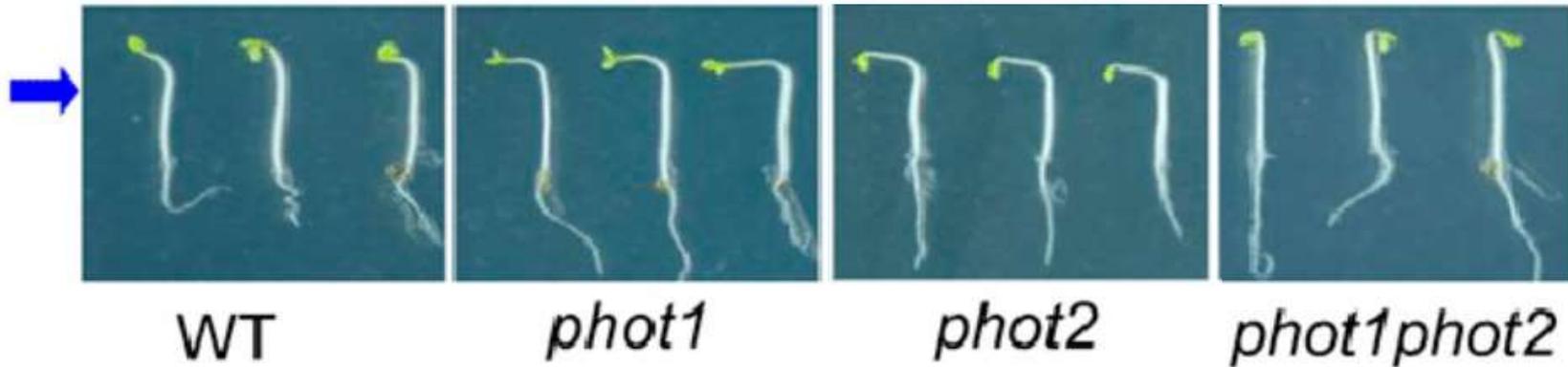
Mutants de phototropisme



- Recherche de **mutants insensibles à une lumière latérale bleue**
- Simple mutant *phot1* et *phot2* ne présentent pas de phénotype en forte intensité lumineuse
- Absence de phototropisme chez le double mutant *phot1phot2*

Conclusions?

Mutants de phototropisme



- Recherche de **mutants insensibles à une lumière latérale bleue**
- Simple mutant *phot1* et *phot2* ne présentent pas de phénotype en forte intensité lumineuse
- Absence de phototropisme chez le double mutant *phot1phot2*

Fonction REDONDANTE des facteurs PHOT1 et PHOT2

3-2-2 – Mouvement des chloroplastes en forte luminosité



**Un excès de lumière est toxique pour la plante!
= stress photochimique**

Plantes de types sauvage âgées de 3 semaines cultivées dans deux conditions lumineuses différentes

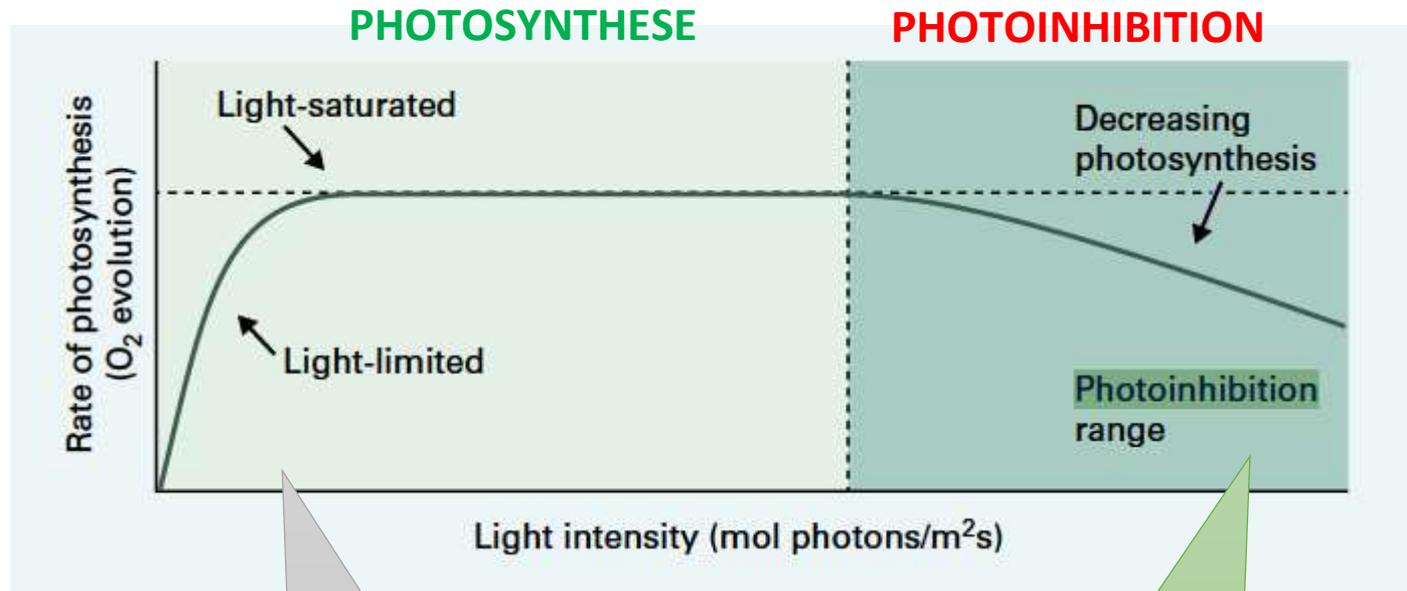


120 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{sec}$



1400 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{sec}$

Phénomène de photoinhibition



La plante utilise l'énergie de la lumière du soleil pour arracher des électrons à des molécules d'eau. Ceux-ci sont transférés via une chaîne d'électrons pour être intégré à des molécules de NADPH. Ceux-ci sont ensuite utilisés pour intégrer le CO₂ atmosphérique aux molécules organiques.

En cas d'excès de lumière, le CO₂ n'est plus présent en quantité suffisante pour que tout le NADPH créé soit utilisé. Celui-ci s'accumule, et cette accumulation crée une **saturation dans la chaîne d'électron**. Les électrons ont alors tendance à réagir avec l'O₂ présent dans la cellule, pour former **des dérivés réactifs de l'oxygène**, qui sont très dommageables pour la cellule.

Comment éviter le stress photochimique en optimisant la photosynthèse?

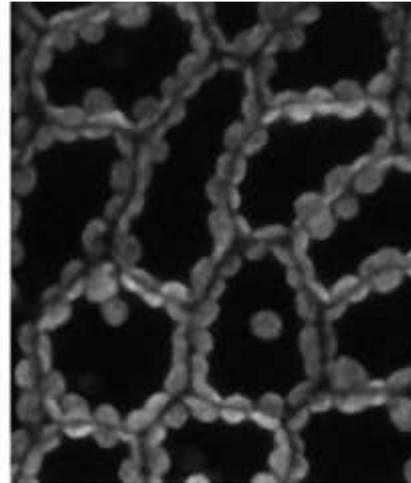
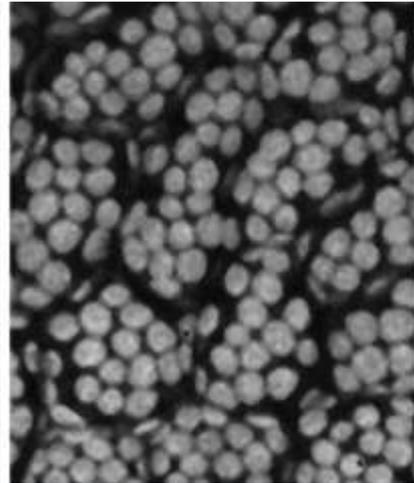
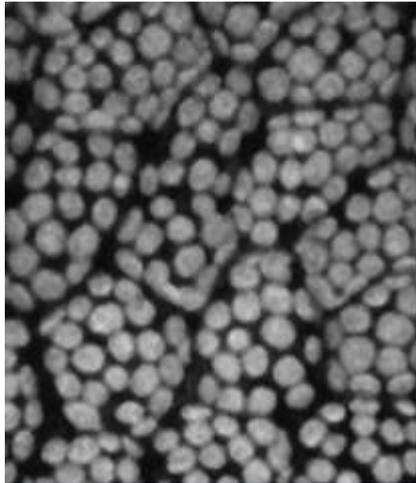
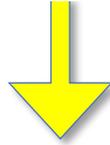
- L'orientation verticale des feuilles parallèlement à la lumière incidente minimise l'absorption lumineuse



Exemple: *Eucalyptus sideroxylon*

Photo Dennis Haugen, Bugwood.org

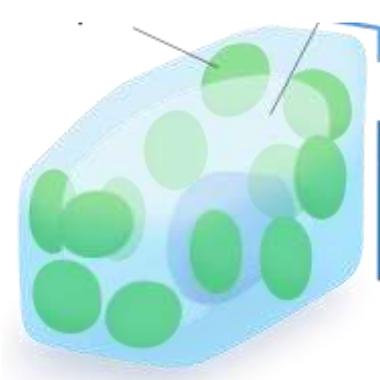
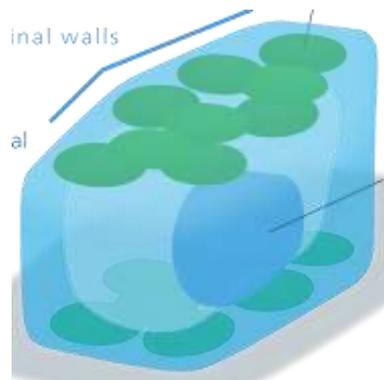
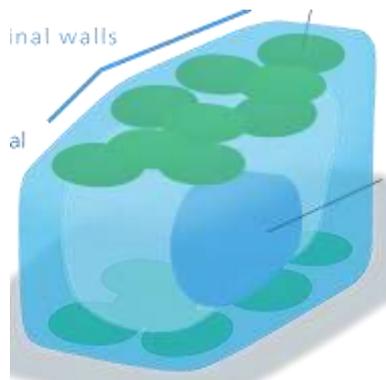
- Mouvement des chloroplastes en fonction de l'intensité lumineuse



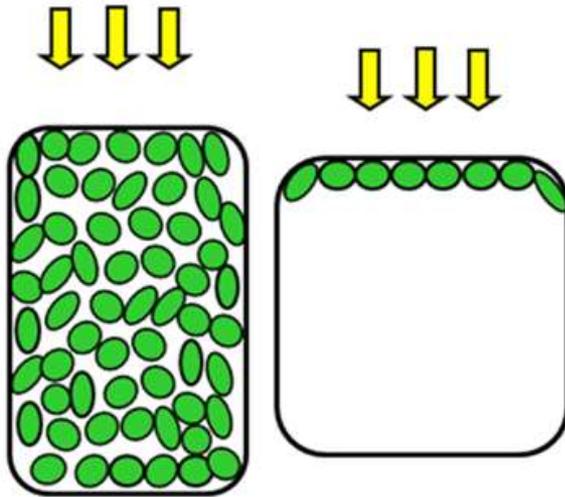
Obscurité

Faible intensité lumineuse

Forte intensité lumineuse

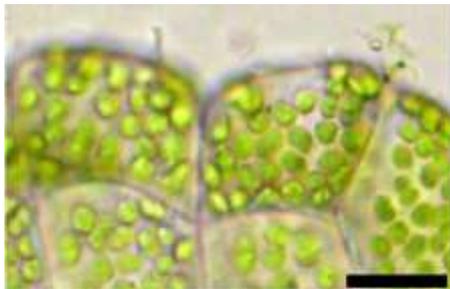


Lumière faible

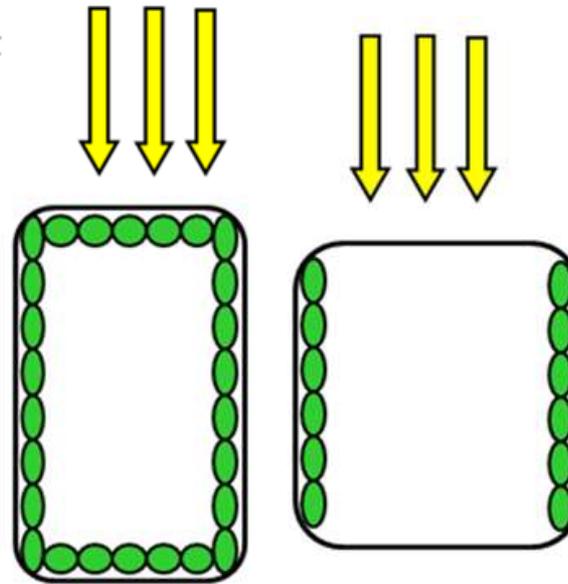


top view

side view

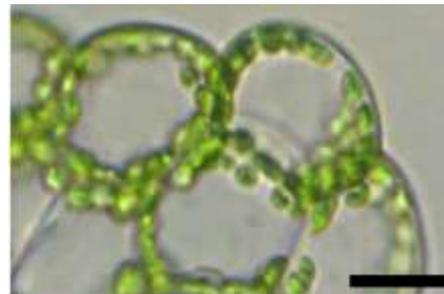


Forte lumière

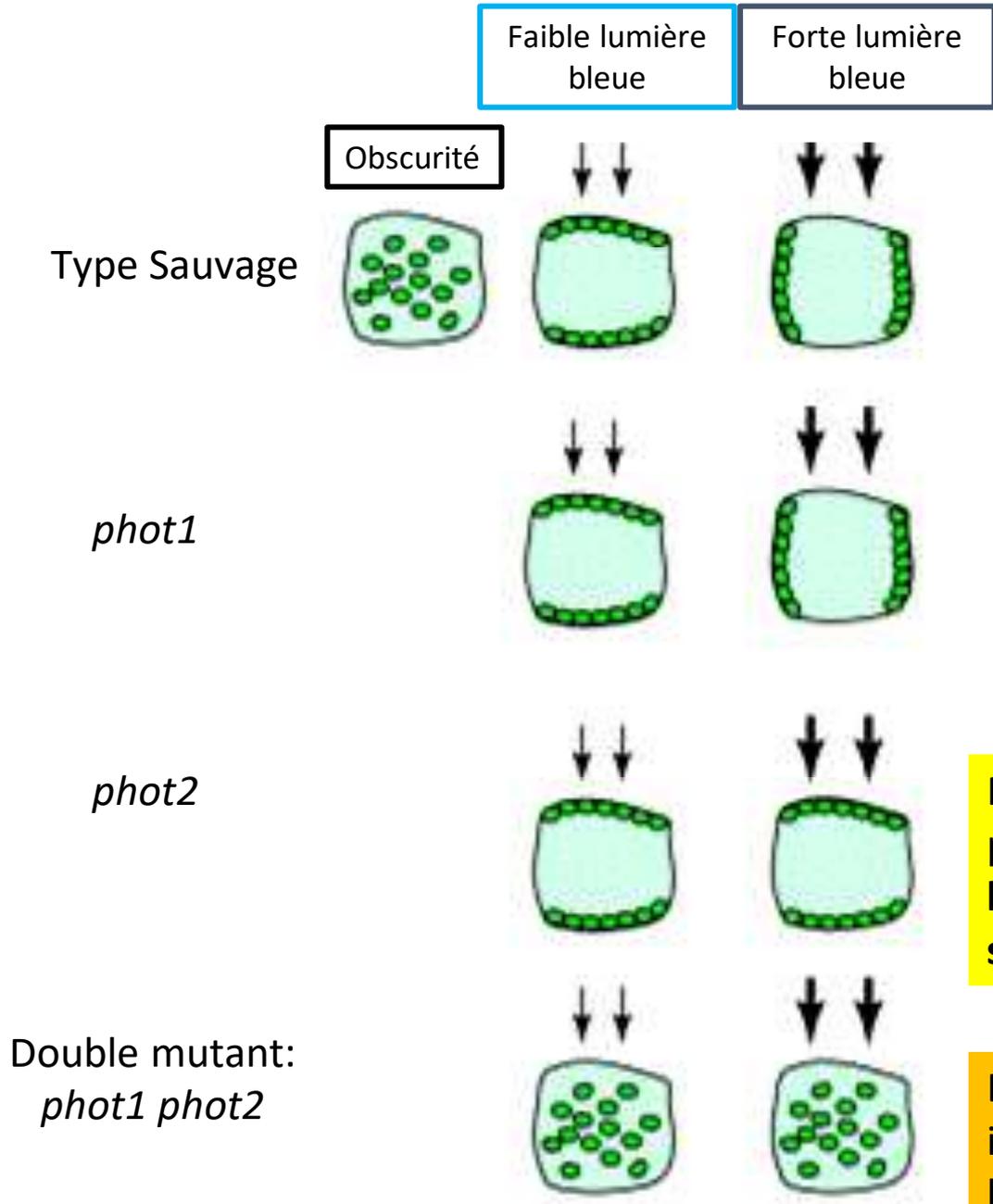


top view

side view



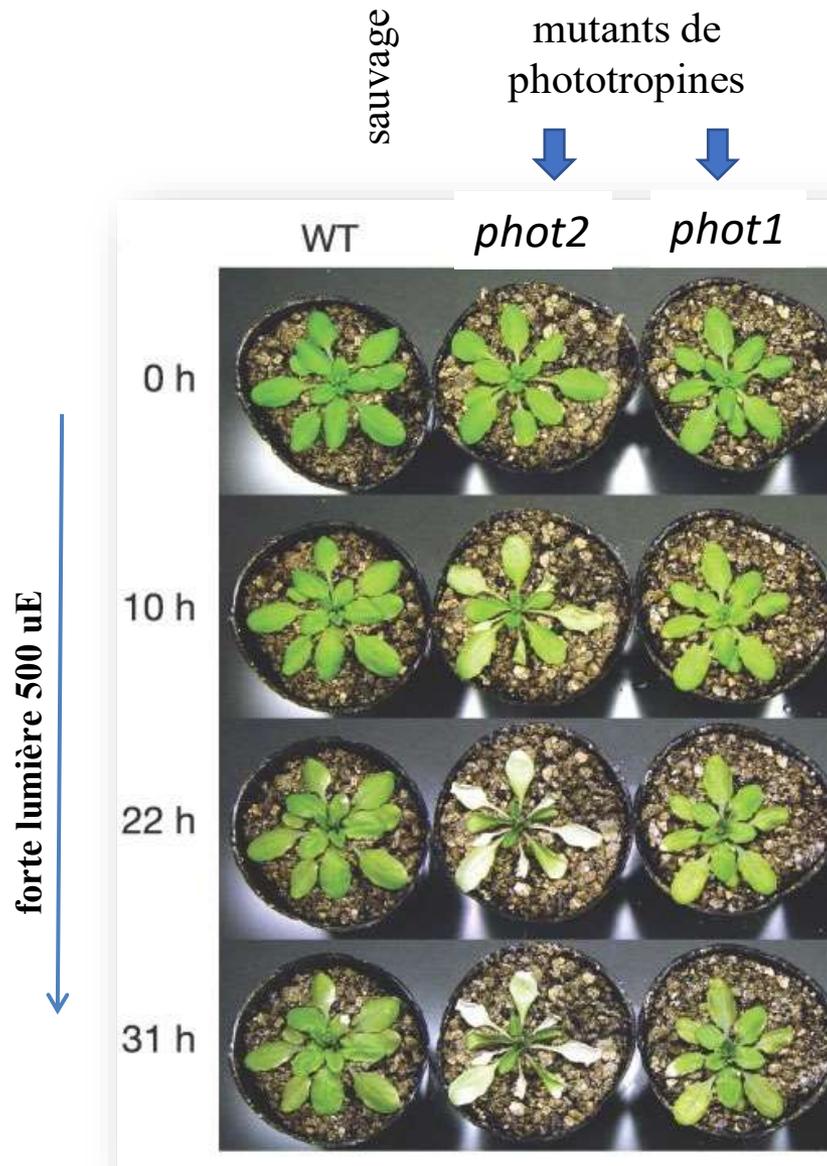
Analyse génétique: mutants de perte de fonction *phot*



Mutant *phot2* ne perçoit pas les fortes intensités : les deux facteurs PHOT ne sont pas redondants

Double mutant est insensible à la lumière bleue

Effet quantitatif de la lumière

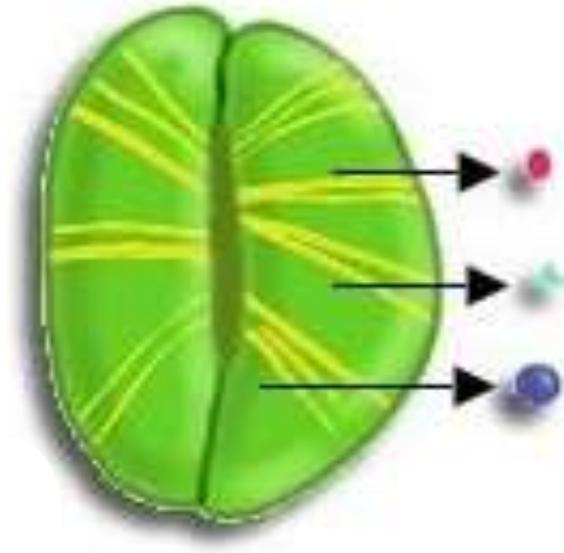


3-2-3 – Contrôle de l'ouverture des stomates



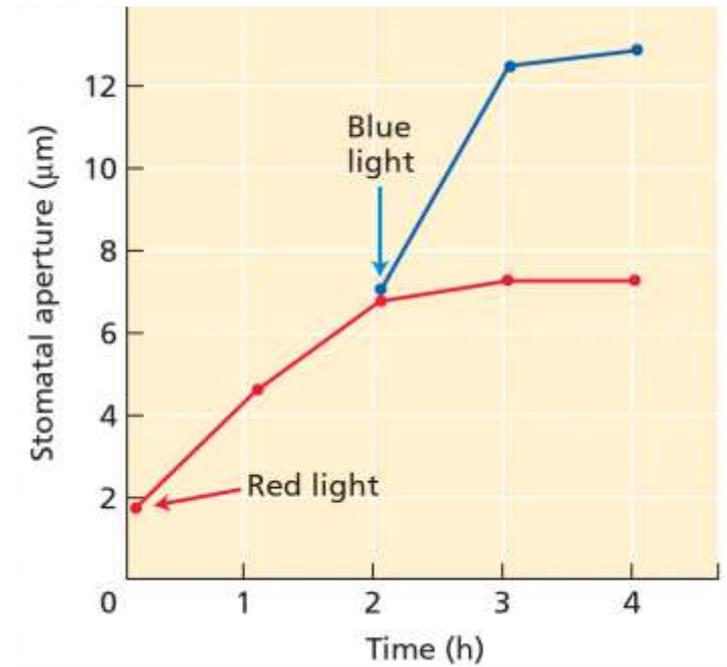
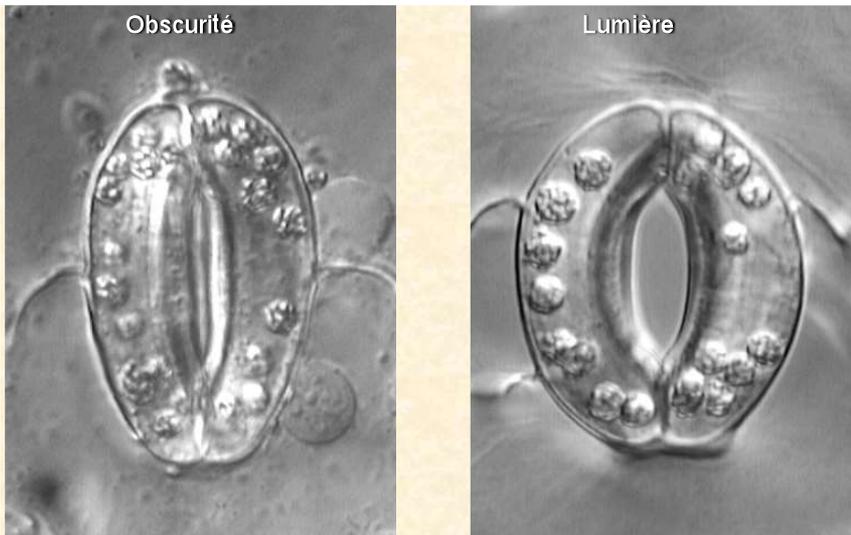
Cellules de garde
turgescents

ABA
→
←
Lumière Bleue

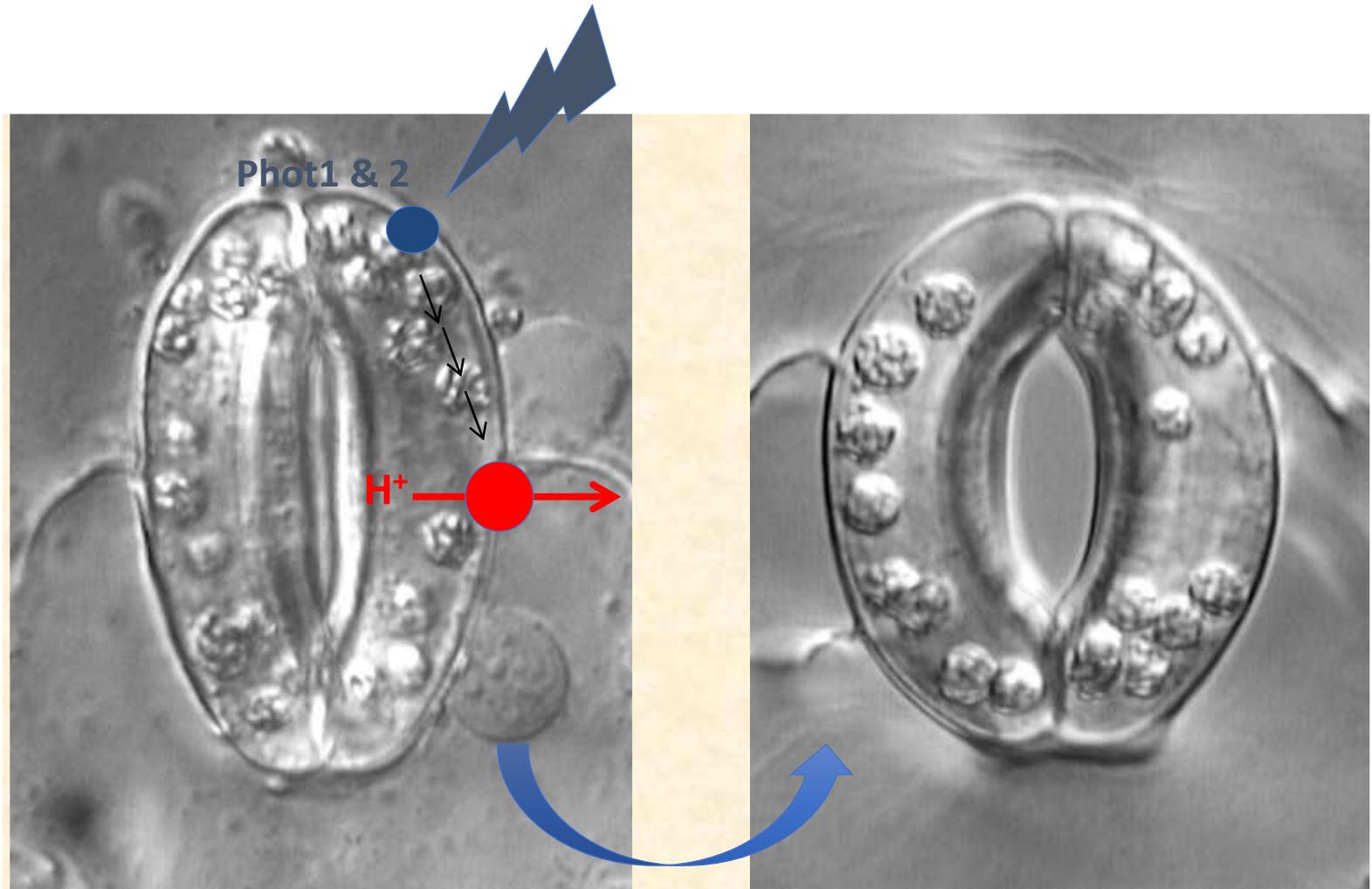


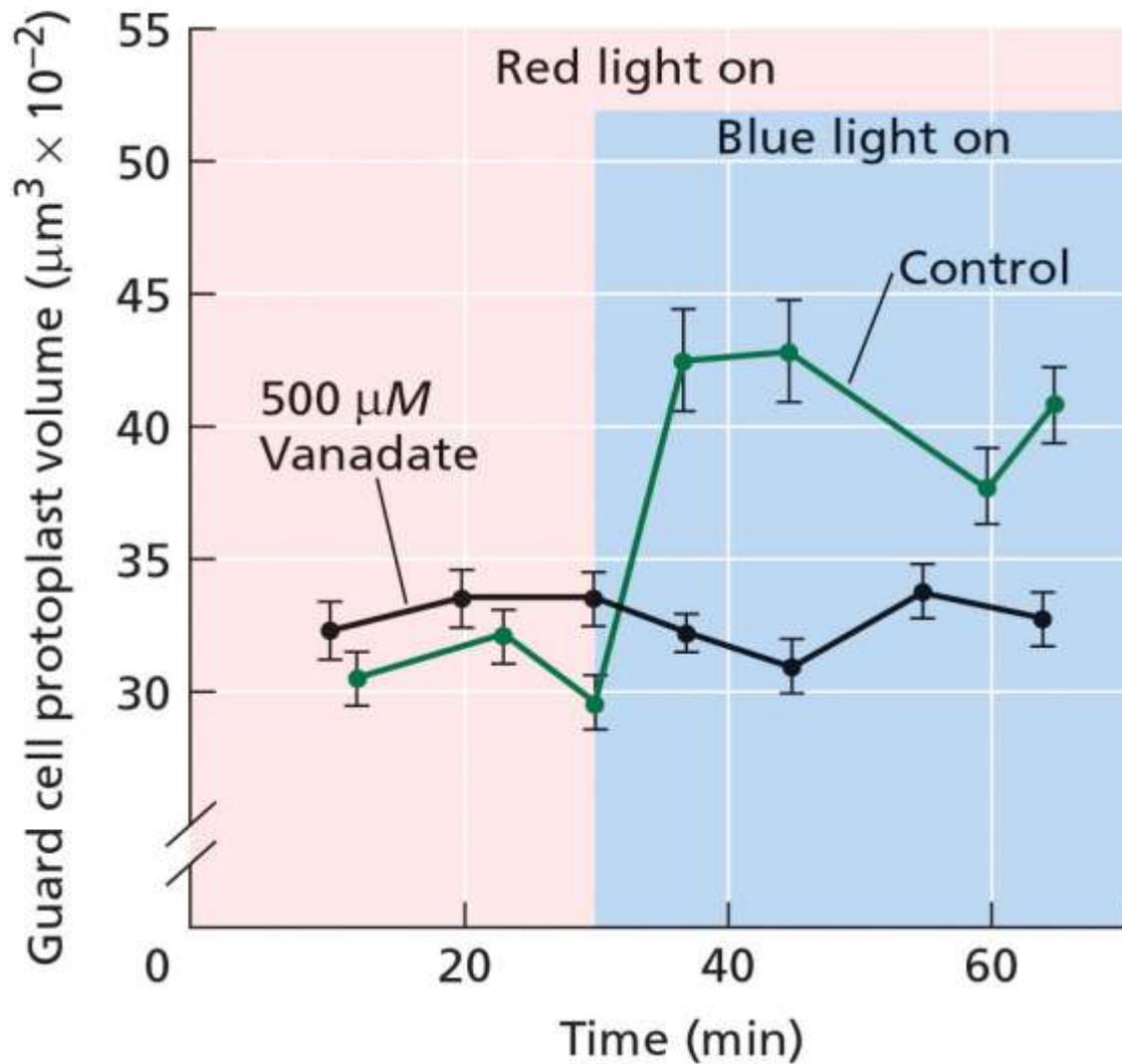
Cellules de garde
plasmolysées

NO_3^-
 Cl^-
 Malate^{2-}
 K^+
 H_2O



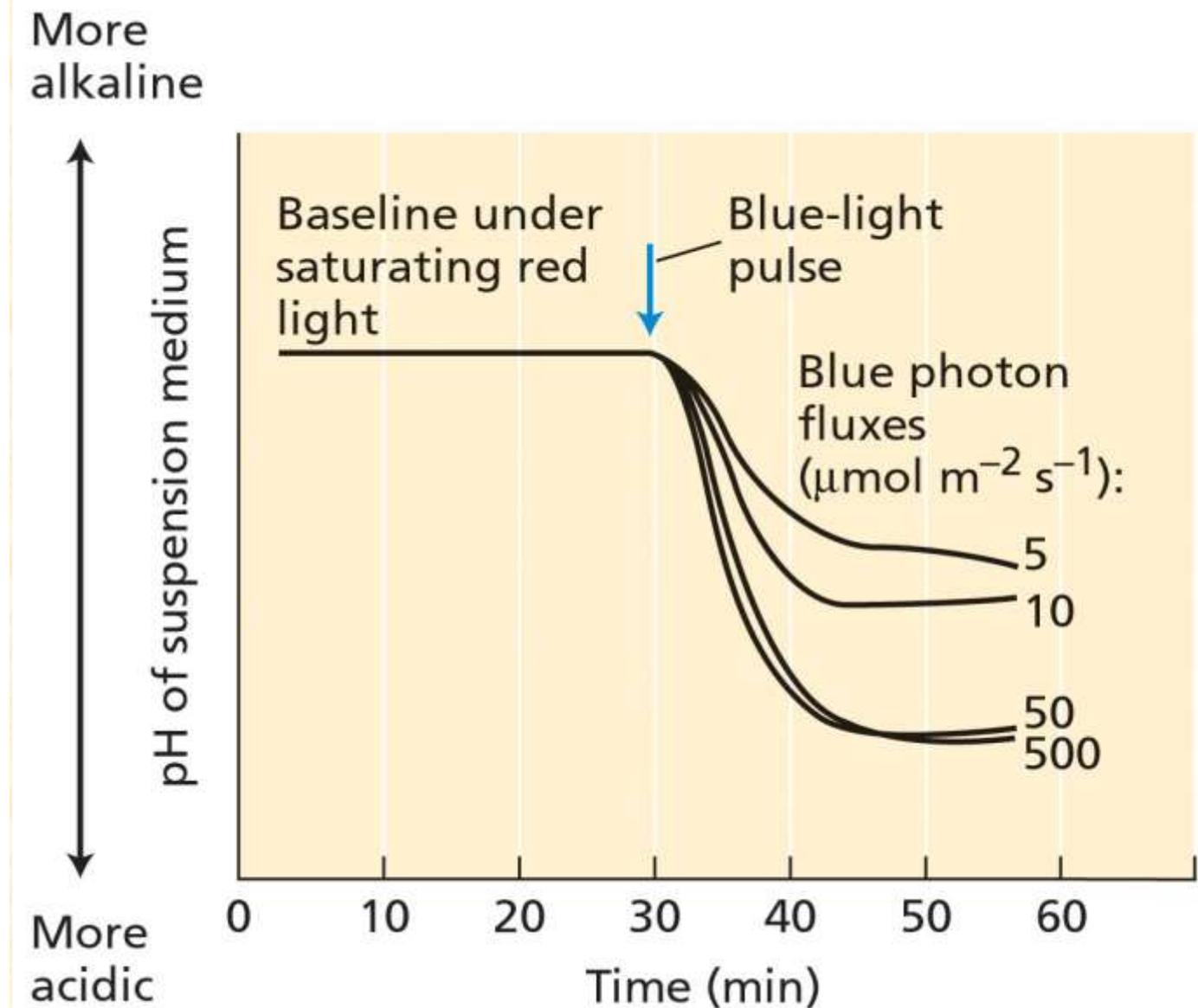
Processus dépendant de l'activation des pompes à protons par la lumière bleue



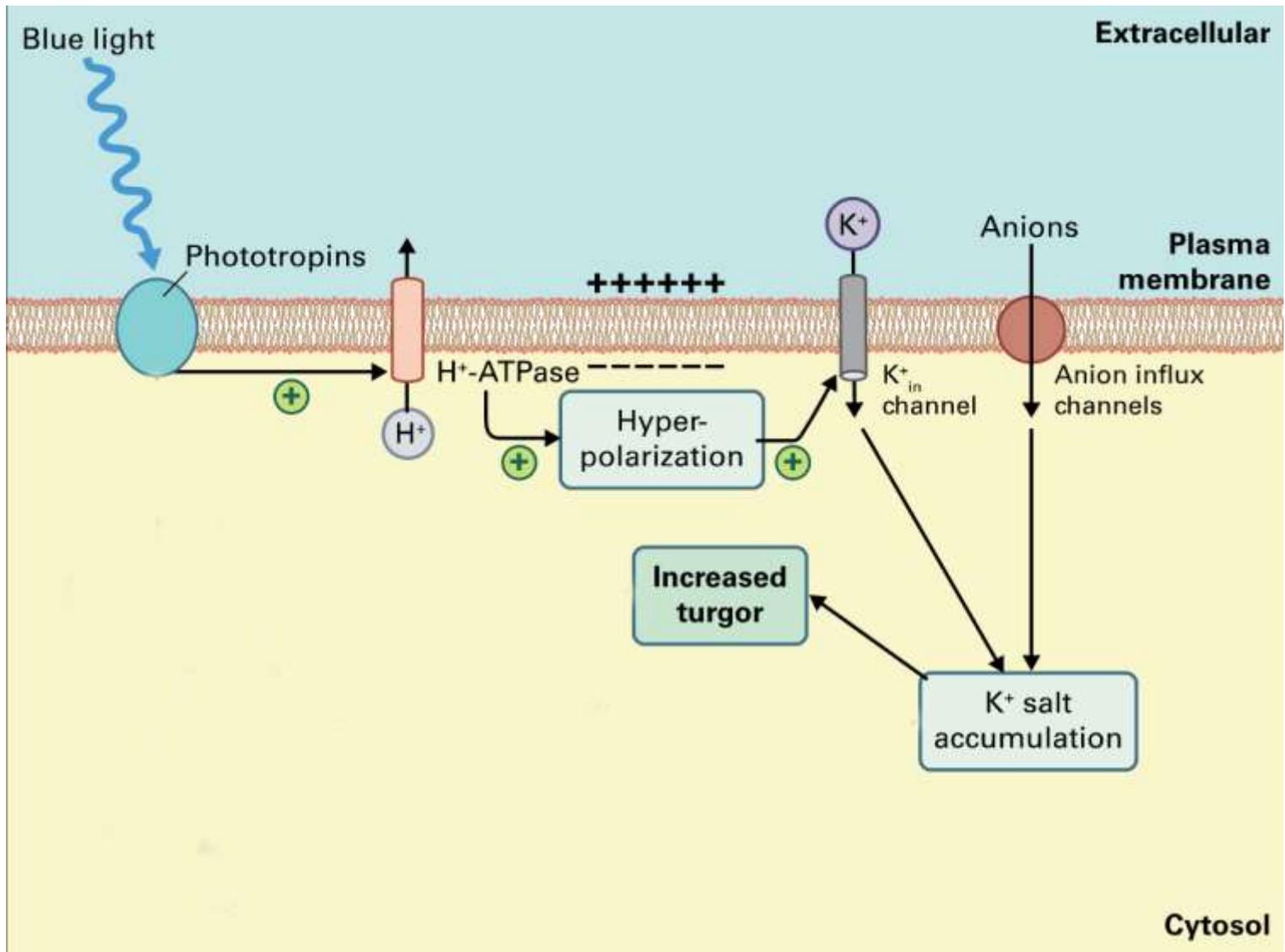


Le vanadate est un inhibiteur de la pompe à protons

La lumière bleue seule permet d'acidifier le milieu

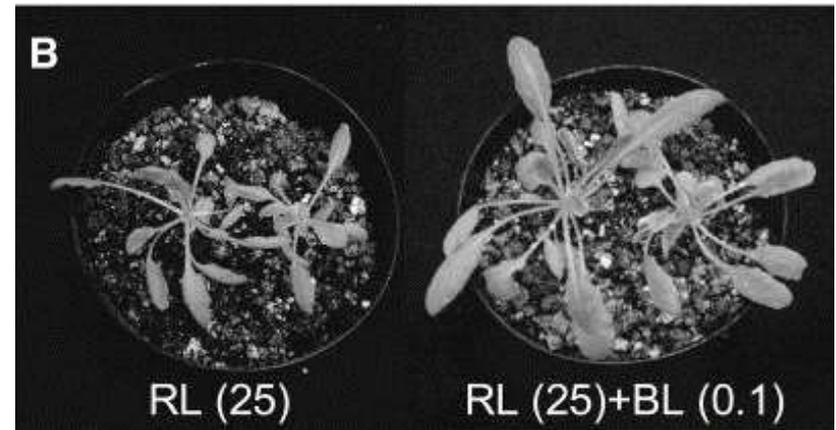
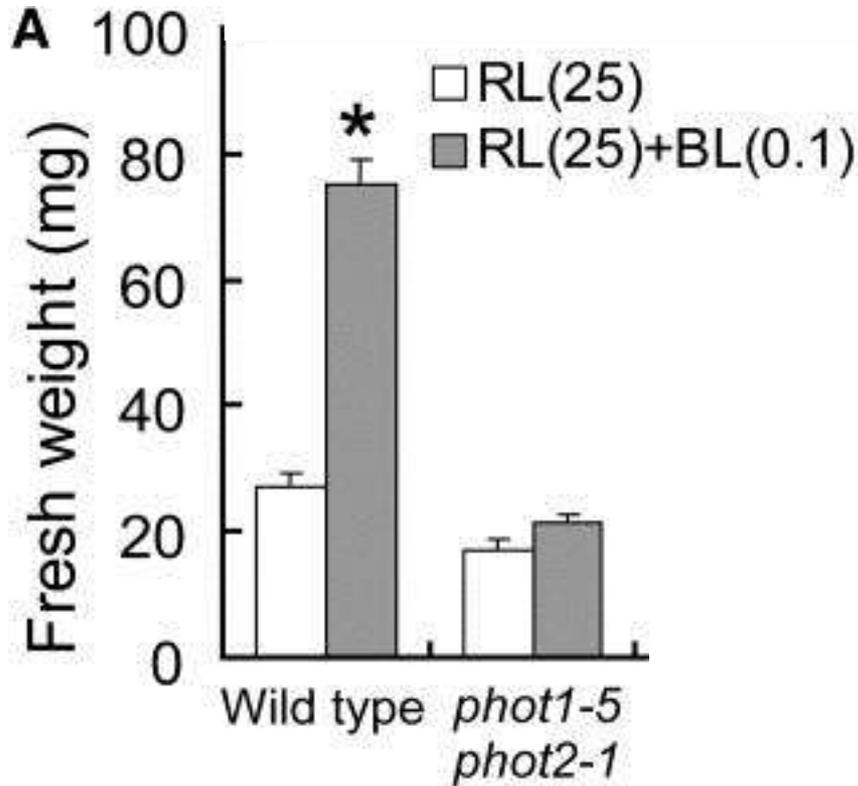


Perception de la lumière et ouverture des stomates



Note that the cell wall is not shown for clarity.

La lumière bleue est primordiale pour l'augmentation de la biomasse



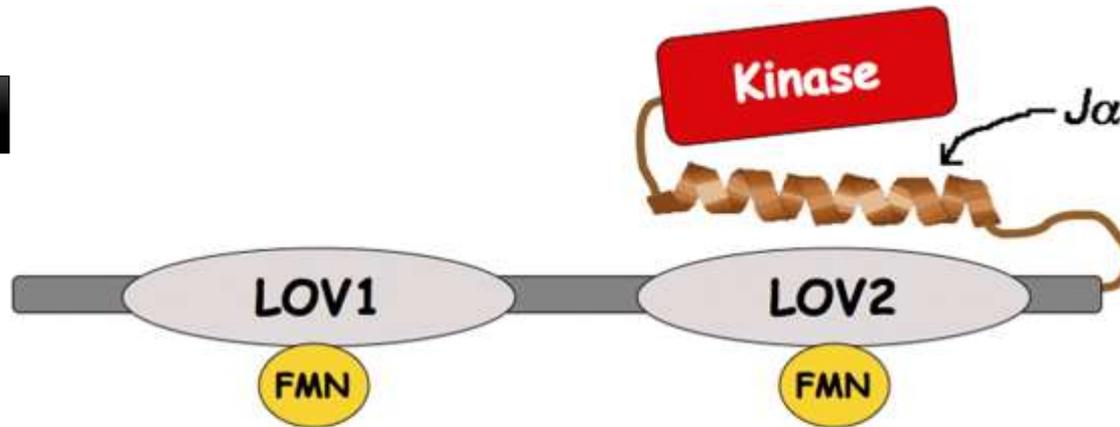
CCL: Phototropines impliqués dans des processus qui permettent d'optimiser l'efficacité de la photosynthèse et d'adapter leur croissance en fonction de l'environnement lumineux

- Phototropisme
- Orientation des plastes
- Ouvertures des stomates

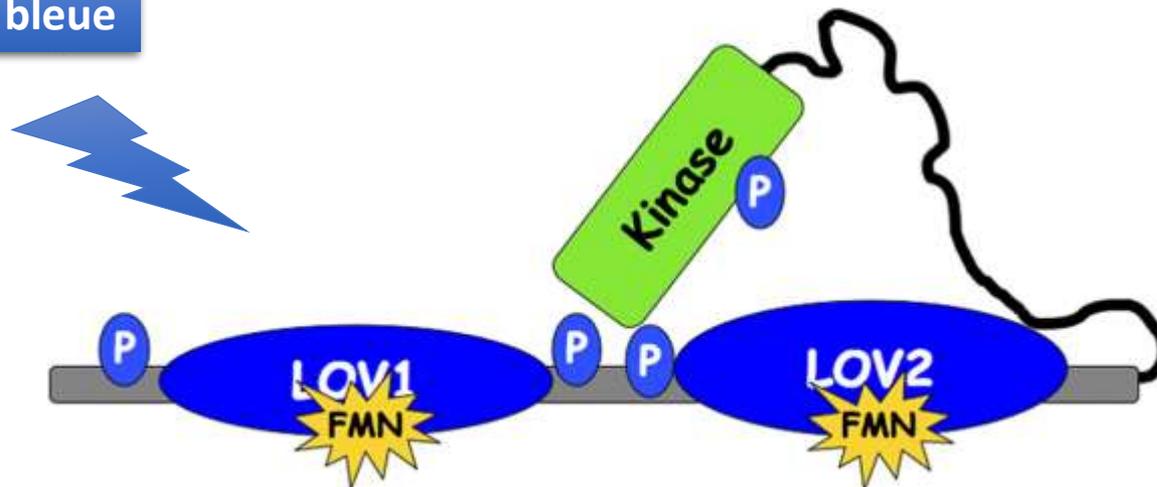
Mode d'action des Phototropines

La perception de la lumière bleue par les deux chromophores FMN, provoque un changement de conformation de la protéine ce qui va permettre la phosphorylation de substrat et la réponse biologique

Obscurité



Lumière bleue



Conclusion

Les organismes végétaux : modèles en biologie du développement.



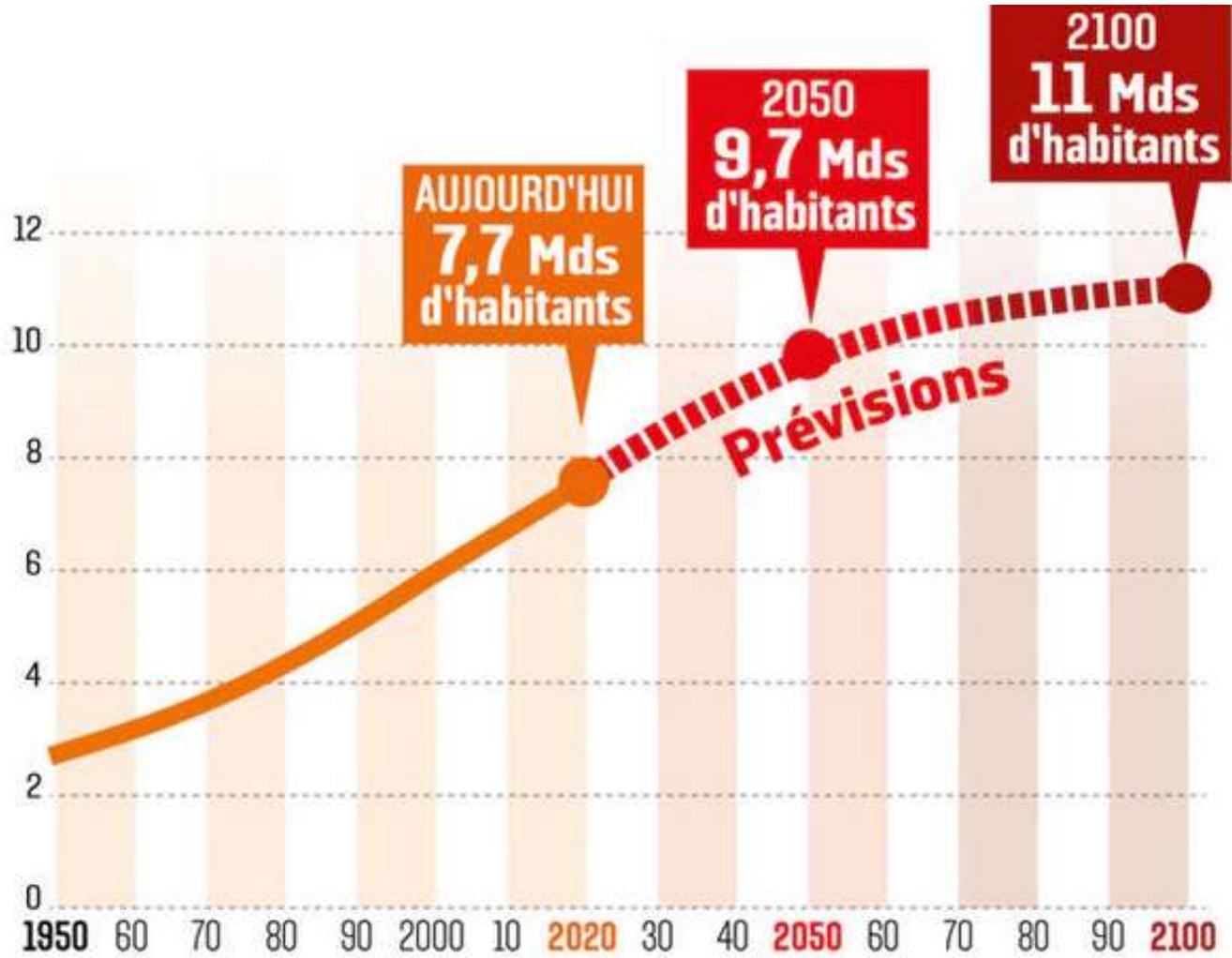
PERSPECTIVES

Vers la **recherche translationnelle**

→ Applications concrètes à partir de connaissances fondamentales



La démographie mondiale ne cesse de croître

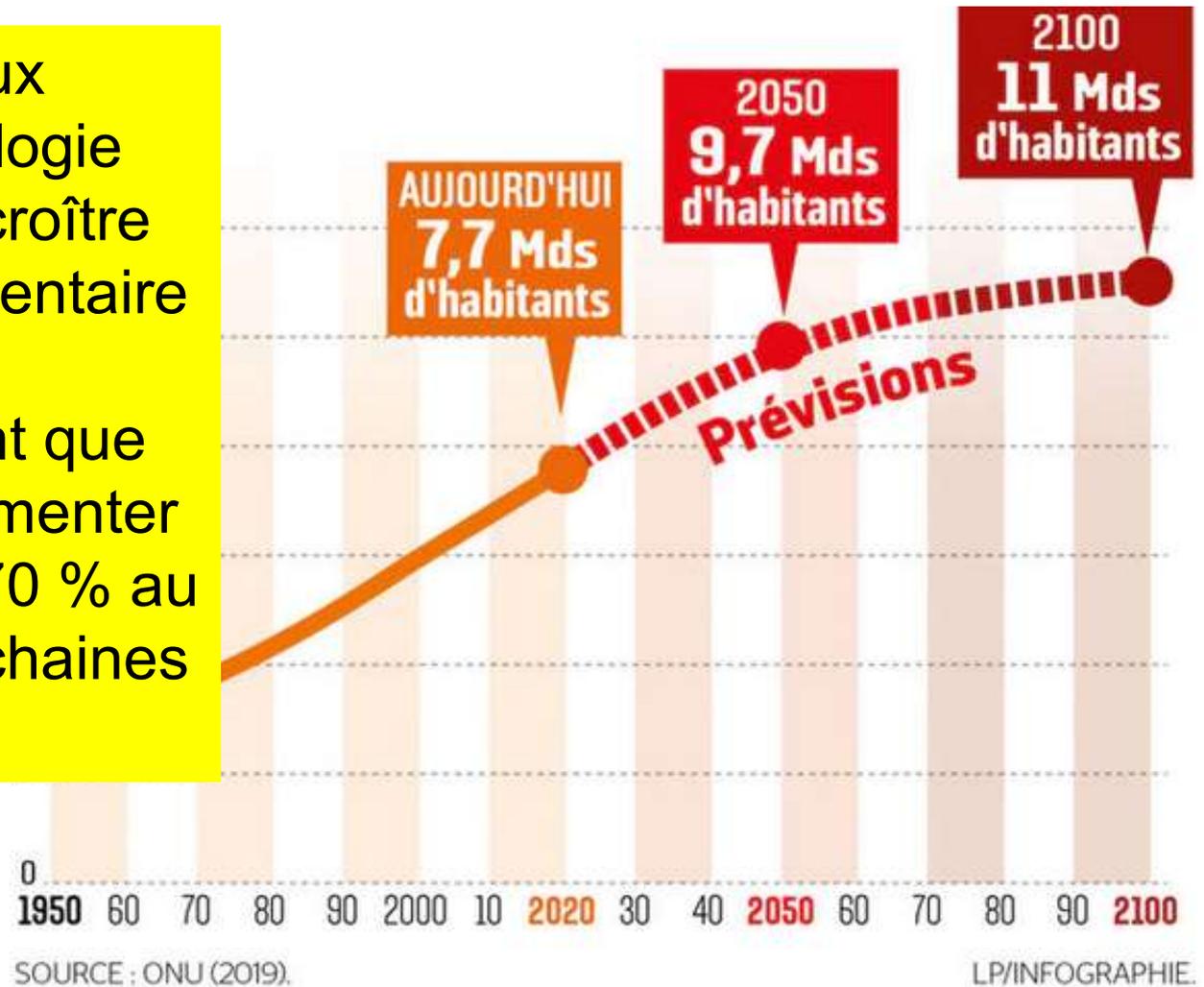


SOURCE : ONU (2019).

LP/INFOGRAPHIE.

La démographie Mondiale ne cesse de croître

L'un des principaux objectifs de la biologie végétale est d'accroître la production alimentaire ; les estimations actuelles indiquent que nous devons augmenter la production de 70 % au cours des 40 prochaines années.



SOURCE : ONU (2019).

LP/INFOGRAPHIE.

La recherche sur les plantes peut contribuer à la réduction de la faim dans le monde

En développant des plantes qui:

- sont tolérantes à la sécheresse ou au stress
- nécessitent moins d'engrais ou d'eau
- sont résistants aux agents pathogènes
- sont plus nutritives



Selon le rapport du Giec 2022, l'agriculture représente 22 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre.

Plusieurs voies se dessinent pour réduire l'empreinte carbone du secteur agricole.

L'une d'elle mise sur l'optimisation des modes de production pour réduire le recours aux engrais de synthèse.



giec
Groupe d'expertise et de conseil
intergouvernemental sur l'évolution du climat

