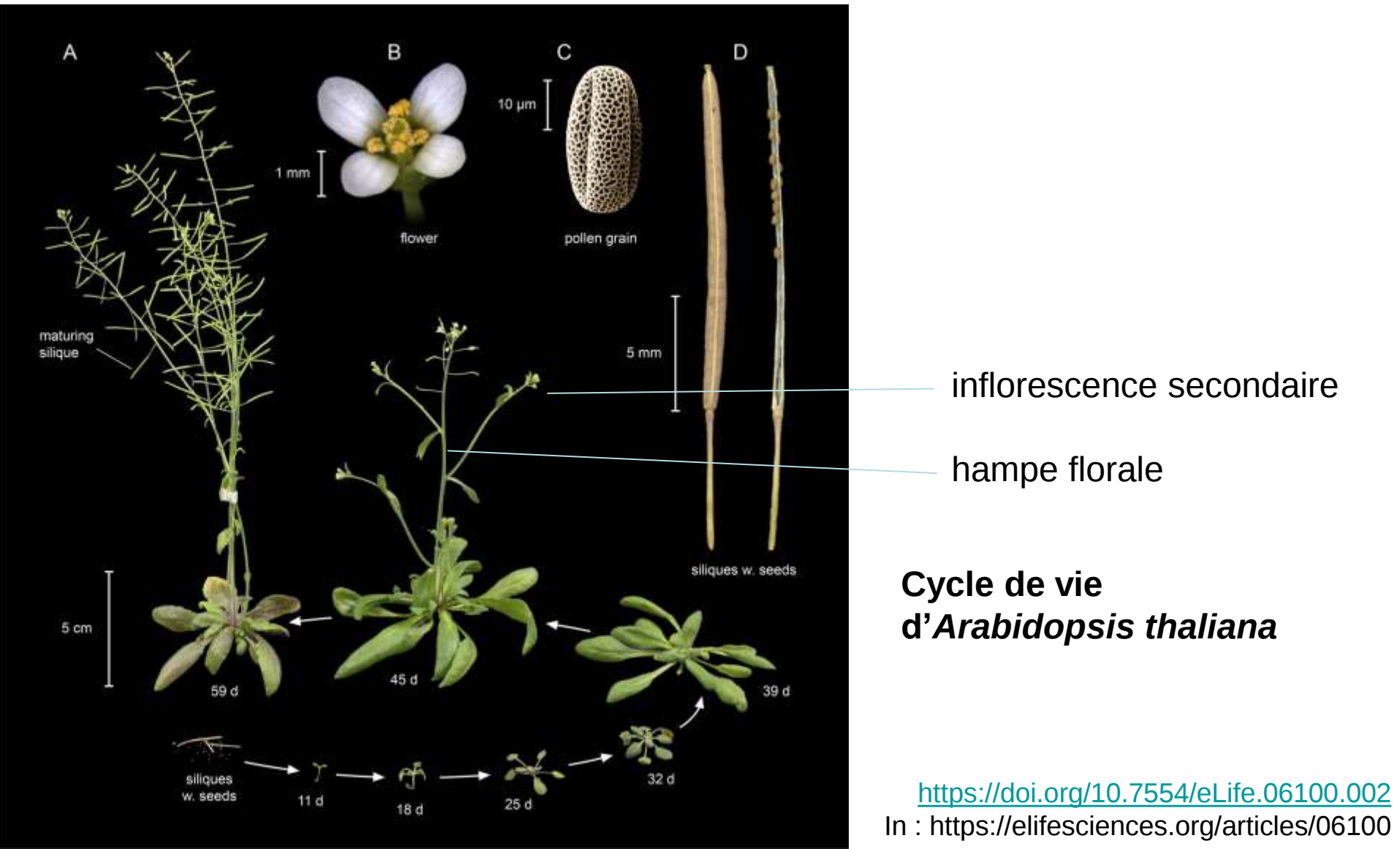


SV-B-3 Le développement des angiospermes : adaptations et plasticité phénotypique

SV-B3-2 Le développement reproducteur



L'arabette des dames *Arabidopsis thaliana* (Brassicacées)



Inflorescence en grappe

Document 1. L'organisation florale d'*A. thaliana*.

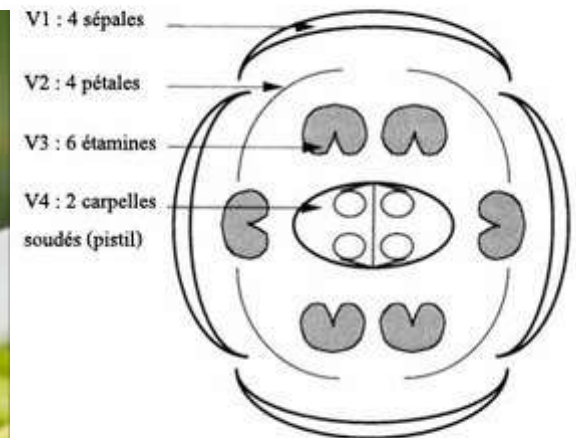


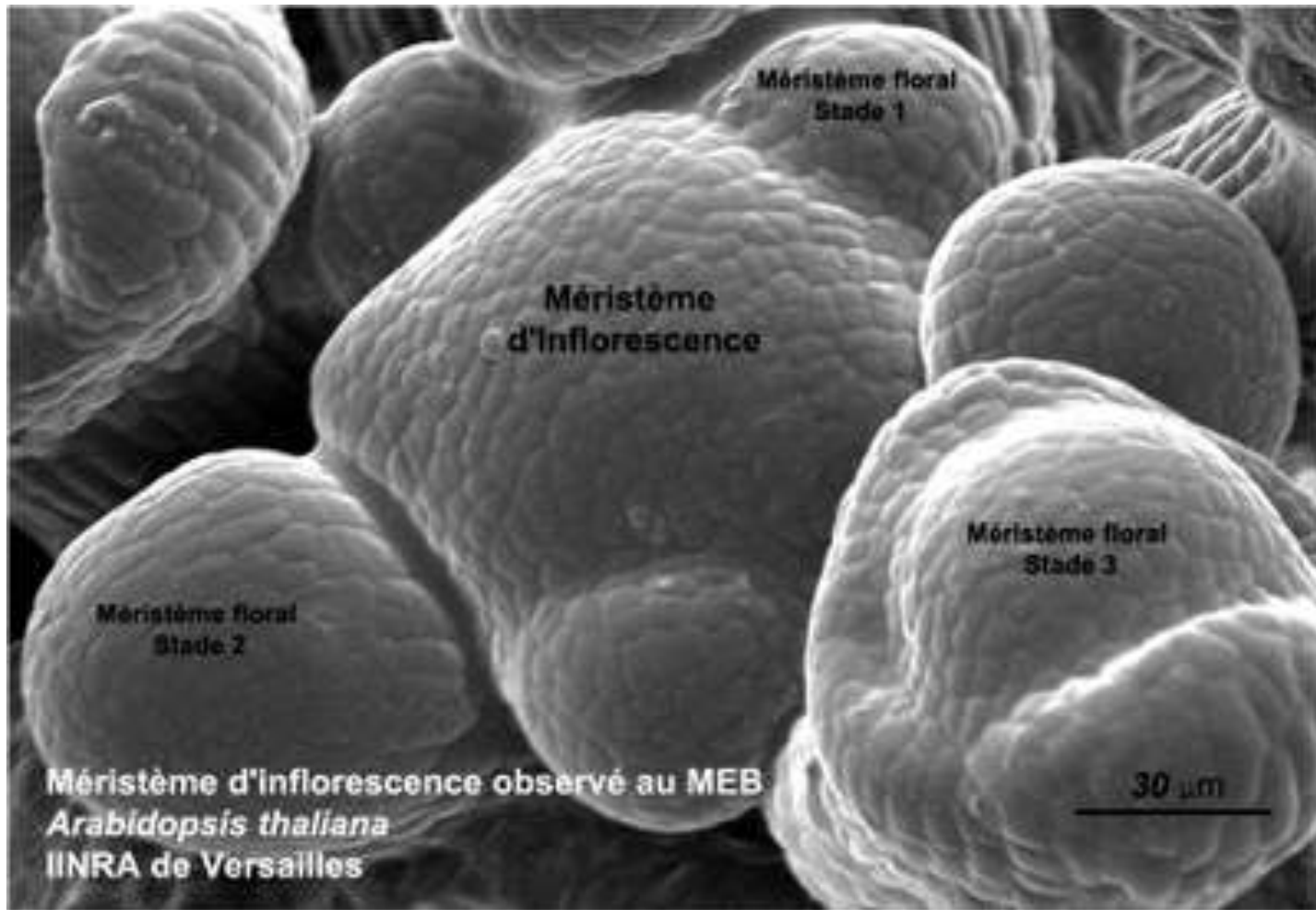
Diagramme floral d'*Arabidopsis thaliana*

Formule florale : ♀ ♂ 4S 4P 4+2 E (2C)

http://flore-en-ligne.fr/herbier/Arabette_de_Thalius.html

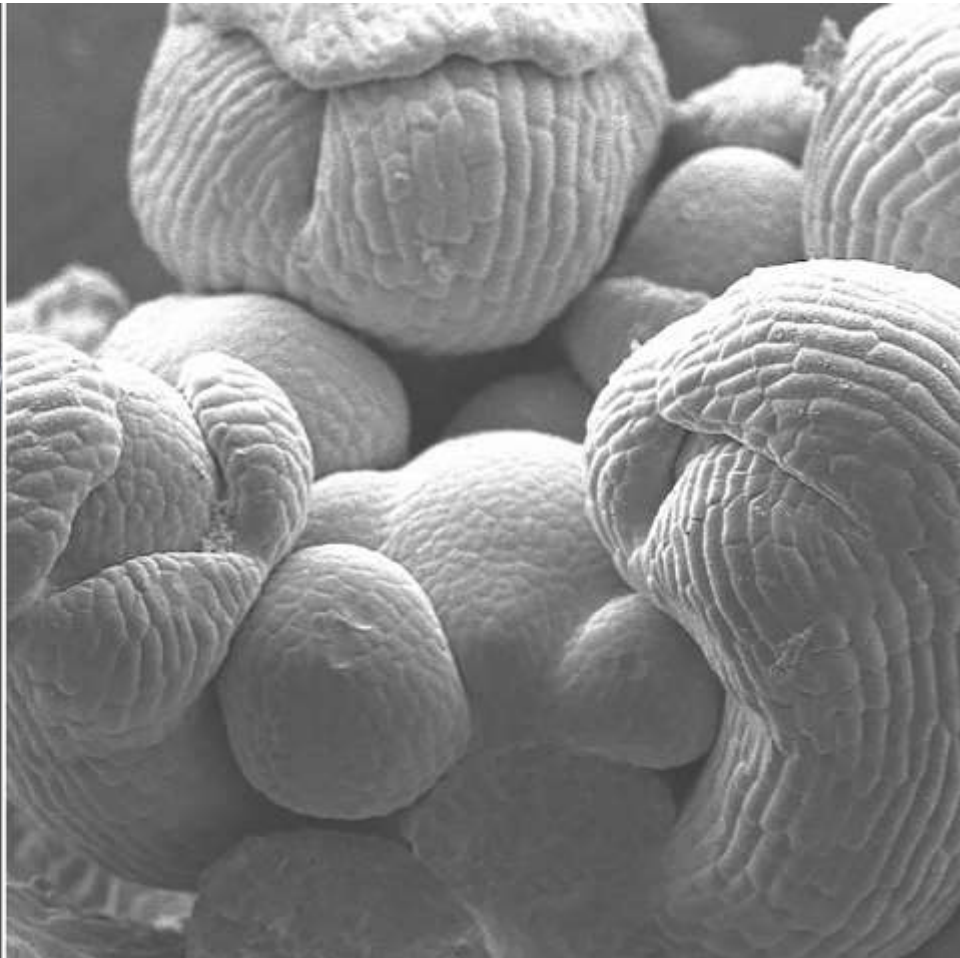
http://acces.ens-lyon.fr/acces/thematiques/dyna/dossiers-thematiques/morphogenese-vegetale/index_html#1-

Document 2. Méristème d'inflorescence d'*Arabidopsis thaliana* observé en MEB.

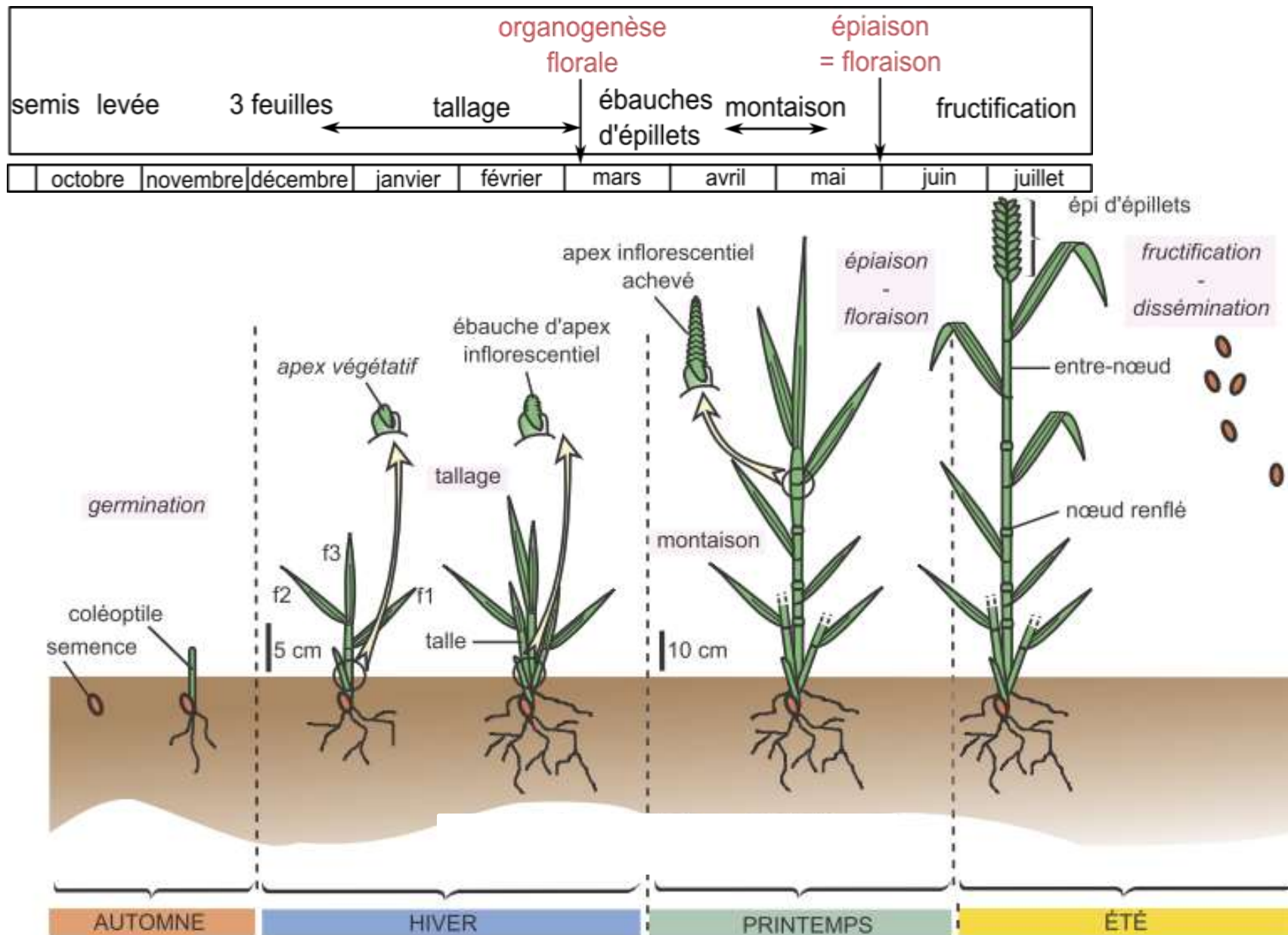


- « stade 1 » : le méristème floral se différencie du méristème d'inflorescence ;
- « stade 3 » : des primordia de sépales se mettent en place.

Inflorescence montrant différents stades de mise en place de fleurs et méristème d'inflorescence d'*Arabidopsis thaliana* observé en MEB



Document 3. Cycle du blé d'hiver.



Des exigences variables de vernalisation

aucune



tomate



tabac



blé de printemps

facultative



pomme de terre



chrysanthème



blé d'hiver

obligatoire



primevère



fraisier



betterave sucrière

Température de vernalisation entre +1 et +7 °C en général

Chez les variétés sensibles à la vernalisation d'*A. thaliana* :

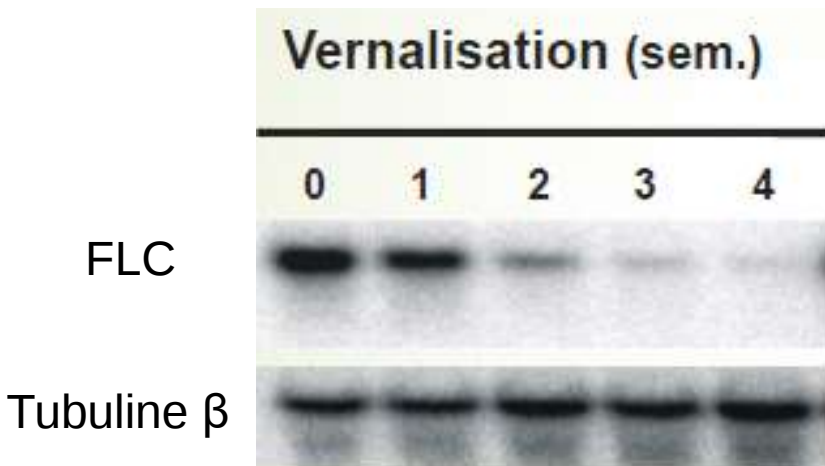
- Un séjour à 5 °C pendant plusieurs semaines déclenche la floraison
- L'utilisation d'un agent hypométhylant de l'ADN, la 5-azacytidine, déclenche la floraison et mime ainsi la vernalisation
 - **Le froid induit une déméthylation de l'ADN au niveau de gènes thermosensibles**

Chez les variétés sensibles à la vernalisation d'*A. thaliana* :

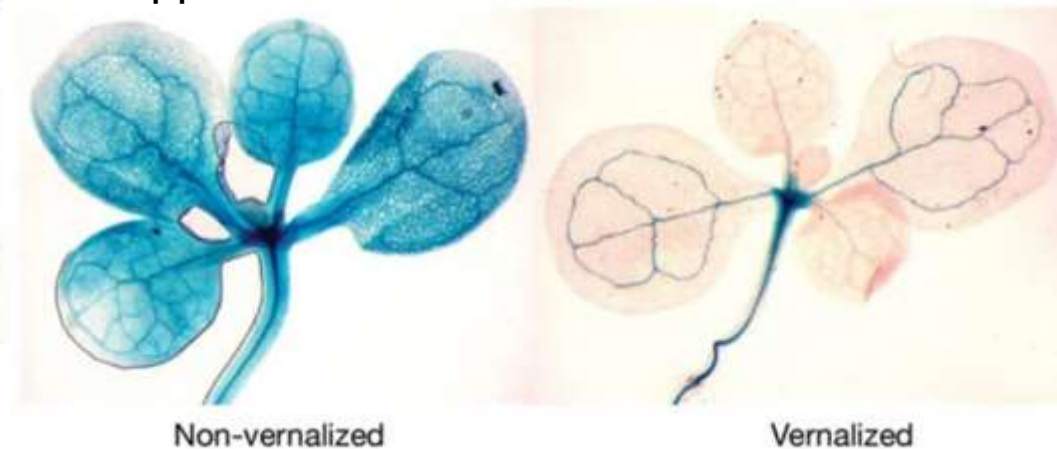
- Un séjour à 5 °C pendant plusieurs semaines déclenche la floraison
 - L'utilisation d'un agent hypométhylant de l'ADN, la 5-azacytidine, déclenche la floraison et mime ainsi la vernalisation
- Le froid induit une déméthylation de l'ADN au niveau de gènes thermosensibles

Document 4. Approche expérimentale de l'effet de la vernalisation sur l'expression de FLC.

- Northern blot de plants soumis à des séjours au froid de différentes durées :

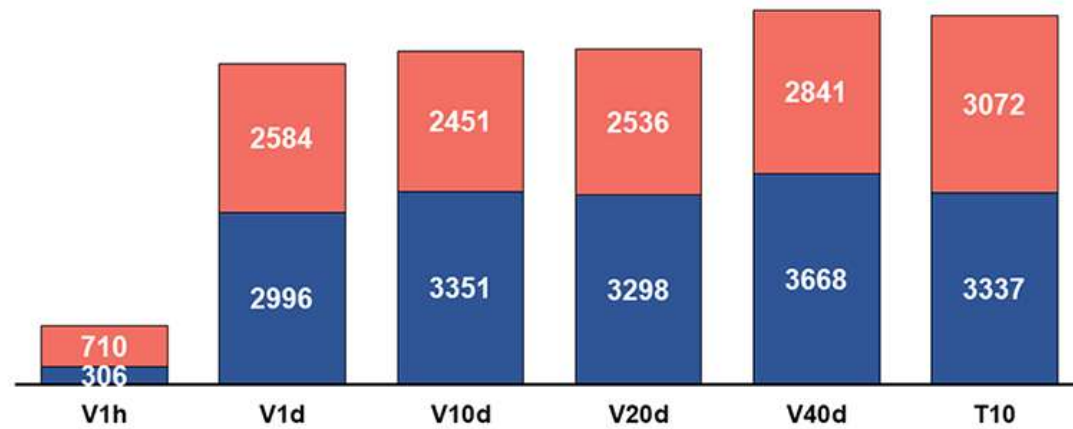


- Mise en évidence des domaines d'expression de FLC chez des plants non vernalisés ou après plusieurs semaines d'exposition à 5 °C par utilisation du gène rapporteur GUS

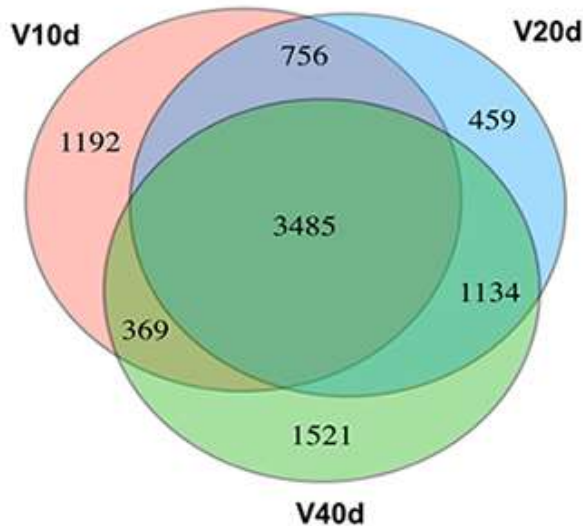


→ Le froid diminue le niveau d'expression du gène FLC

■ Down-regulated ■ Up-regulated



Nombre de gènes dont le niveau d'expression change à la suite d'une exposition au froid, selon la durée de cette exposition.



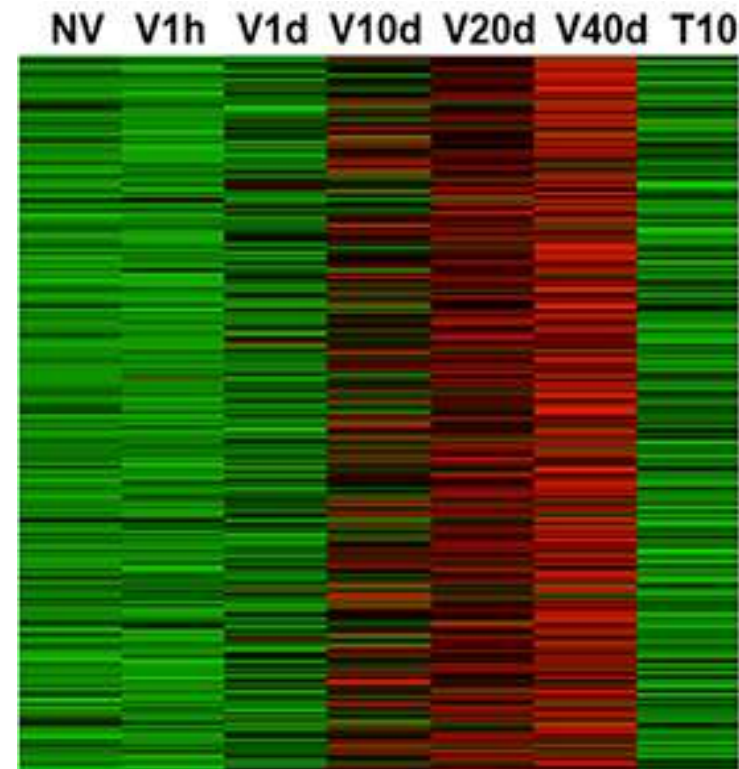
Nombre de gènes exprimés et co-exprimés pour 10 j, 20 j ou 40 j d'exposition au froid.

Effets de la vernalisation sur l'expression du génome d'*Arabidopsis thaliana*

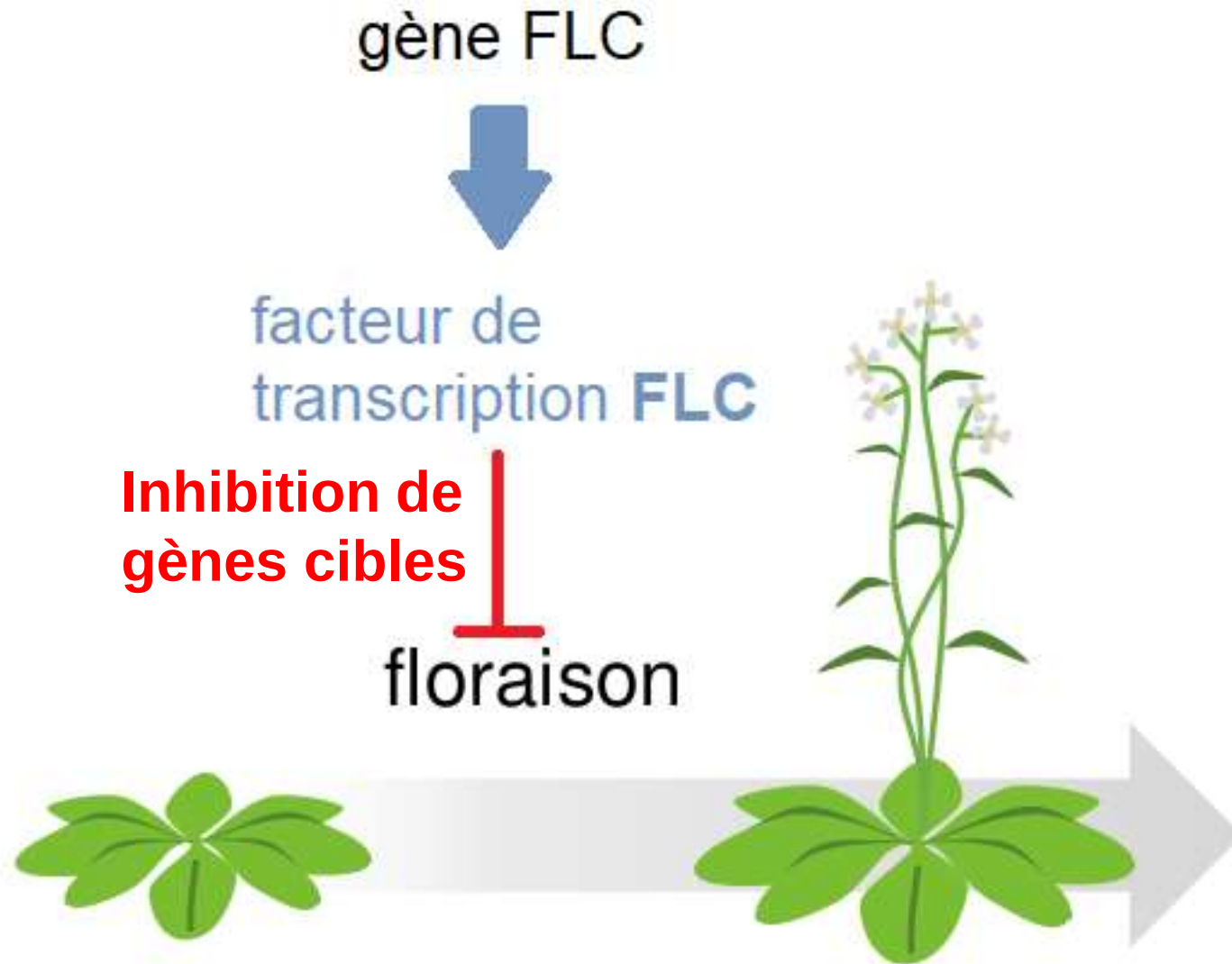
Etude de l'expression d'un groupe de gènes en particulier.

En vert : sous-expression

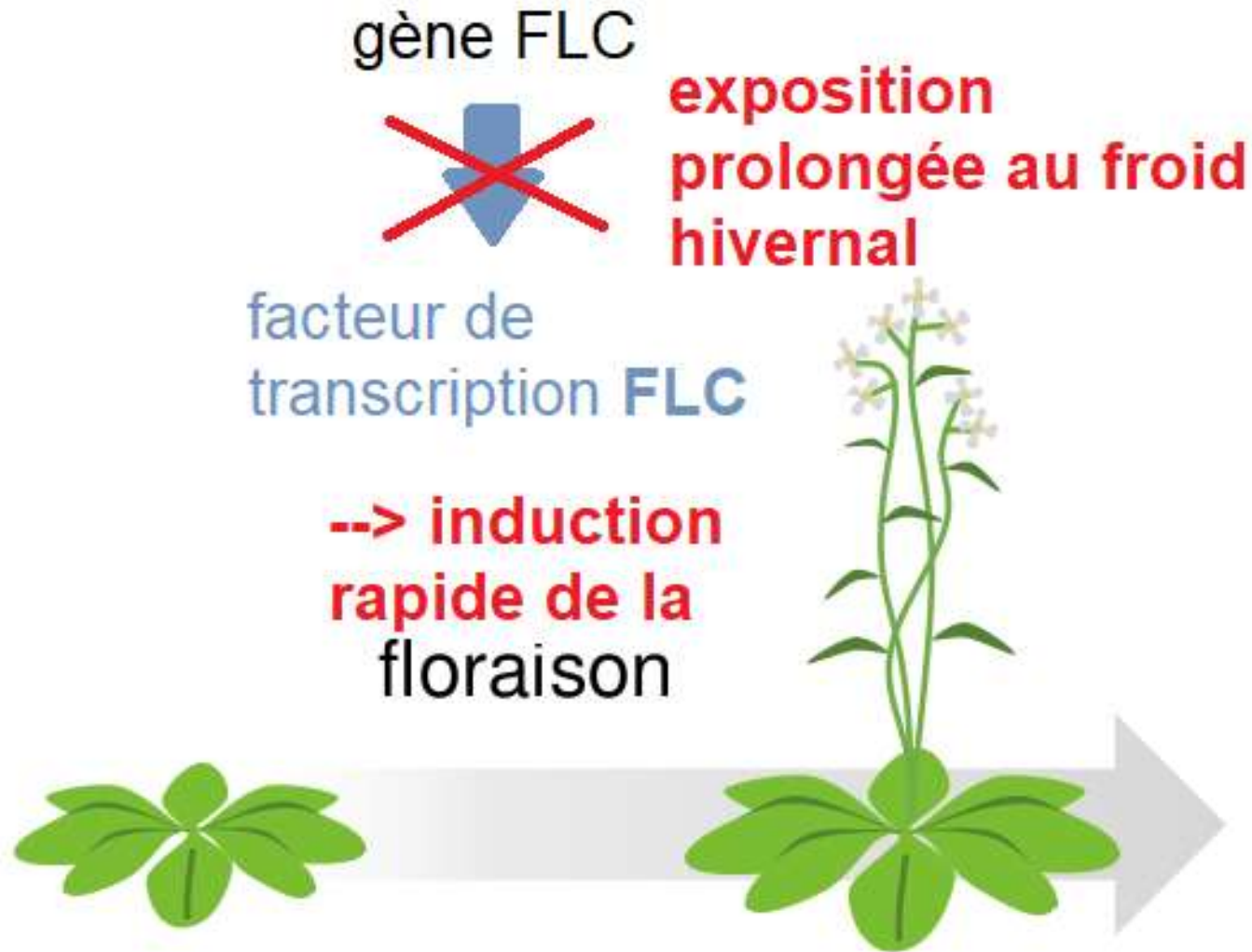
En rouge : sur-expression



Effets de FLC sur la floraison d'*Arabidopsis thaliana*



Inhibition de l'expression de FLC



- transmise aux cellules filles par mitose
- levée lors de la méiose

Document 5. Rappels sur les contrôles épigénétiques.

Etude des **changements induits par l'environnement** dans l'expression des gènes, n'impliquant **pas de modification de la séquence d'ADN** et pouvant être **transmis lors des divisions cellulaires**.

Contrairement aux mutations qui affectent la séquence d'ADN, les modifications épigénétiques sont **réversibles**.

Document 5. Rappels sur les contrôles épigénétiques.

Etude des **changements induits par l'environnement** dans l'expression des gènes, n'impliquant **pas de modification de la séquence d'ADN** et pouvant être **transmis lors des divisions cellulaires**.

Contrairement aux mutations qui affectent la séquence d'ADN, les modifications épigénétiques sont **réversibles**.

- **Marqueurs épigénétiques de l'inactivation du gène :**

- au niveau de l'ADN : méthylation des cytosines (îlots CG dans le promoteur du gène) → chromatine condensée

- **Modifications permettant l'activation d'un gène :**

- au niveau de l'ADN : déméthylation des cytosines → décondensation chromatine

Document 5. Rappels sur les contrôles épigénétiques.

Etude des **changements induits par l'environnement** dans l'expression des gènes, n'impliquant **pas de modification de la séquence d'ADN** et pouvant être **transmis lors des divisions cellulaires**.

Contrairement aux mutations qui affectent la séquence d'ADN, les modifications épigénétiques sont **réversibles**.

- **Marqueurs épigénétiques de l'inactivation du gène :**

- au niveau de l'ADN : méthylation des cytosines (îlots CG dans le promoteur du gène) → chromatine condensée

- au niveau des histones : méthylation (lysines), désacétylation, phosphorylation → chromatine condensée

- **Modifications permettant l'activation d'un gène :**

- au niveau de l'ADN : déméthylation des cytosines → décondensation chromatine

- au niveau des histones : déméthylation (lysines), acétylation → chromatine décondensée

Histone H4



Histone H3



Histone H2A



Histone H2B



K : lysine
R : arginine
S : sérine

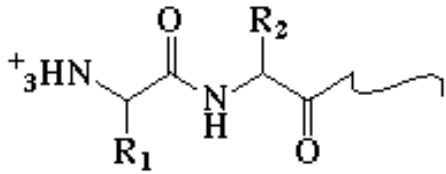
Ac Acétylation Ub Ubiquitinylation Me Méthylation P Phosphorylation

Les modifications post-traductionnelles des histones

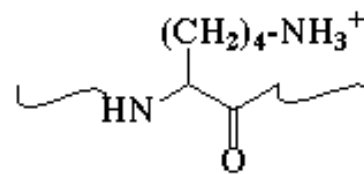
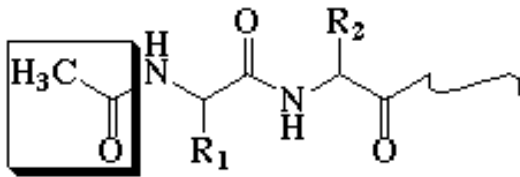
La lysine 9 de l'histone H3 peut être soit acétylée, soit méthylée.

N. Lacoste, J. Côté, M/S : médecine sciences Vol 19, n°10, oct 2003, p. 955-959

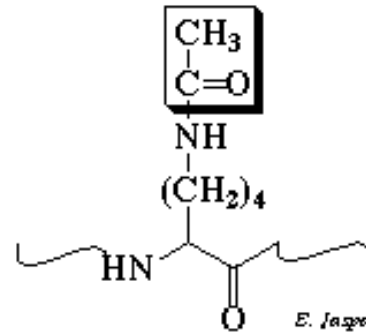
<http://www.erudit.org/revue/ms/2003/v19/n10/007166ar.html>



acétylation de
l'acide aminé
N-terminal



acétylation
latérale
de la chaîne
de la lysine



E. Jaspard (2004)

L'acétylation / désacétylation des histones

Histones acétyl-transférases



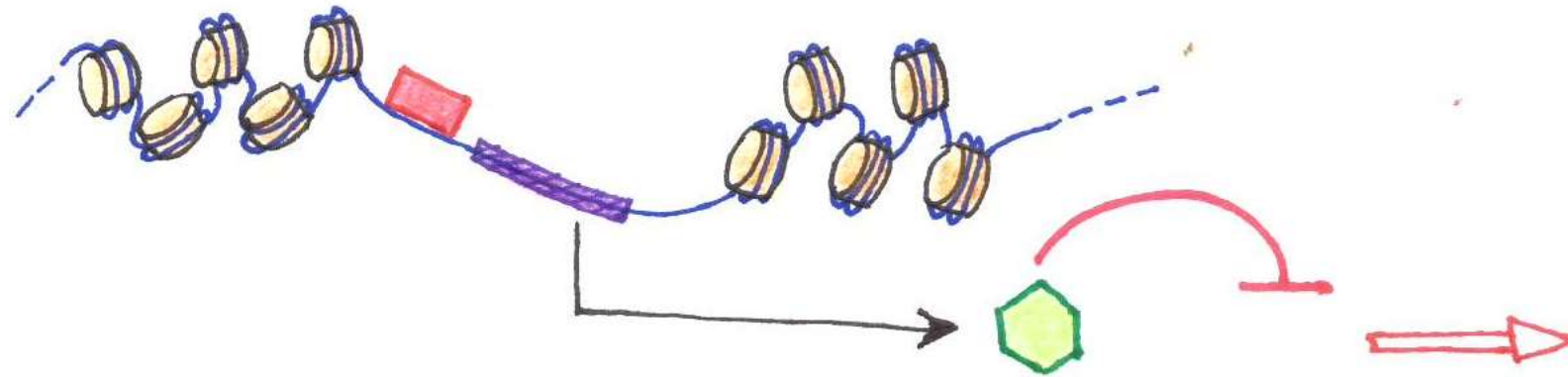
**Histones
désacétylases**

**Etat condensé
transcriptionnellement
inactif**

**Etat décondensé
transcriptionnellement
actif**

Document 6. La vernalisation et le contrôle épigénétique.

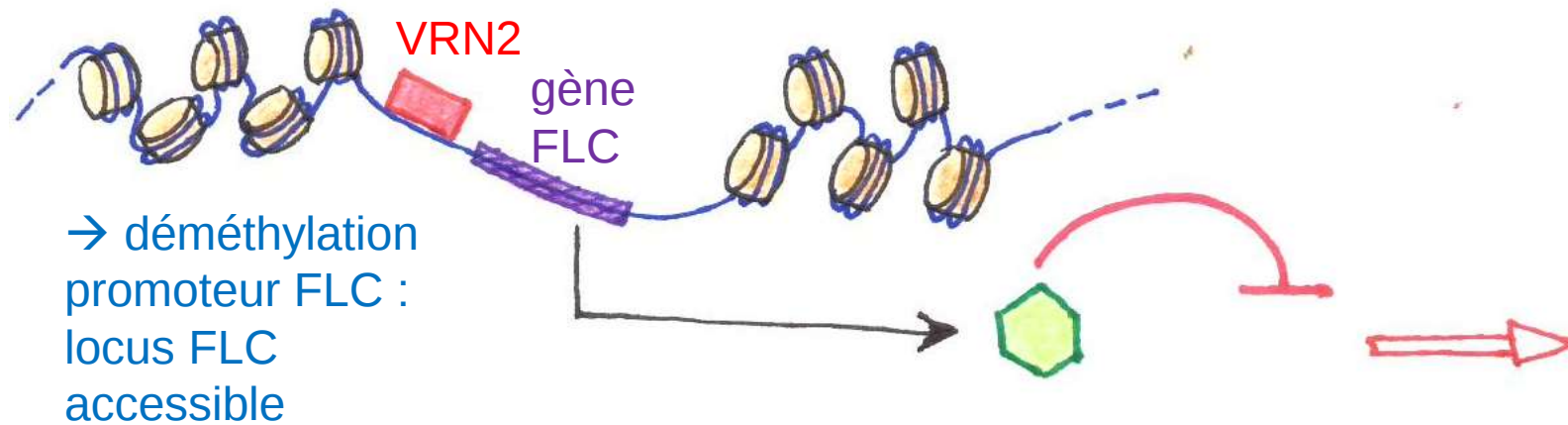
- Absence de passage au froid



Document 6. La vernalisation et le contrôle épigénétique.

- Absence de passage au froid

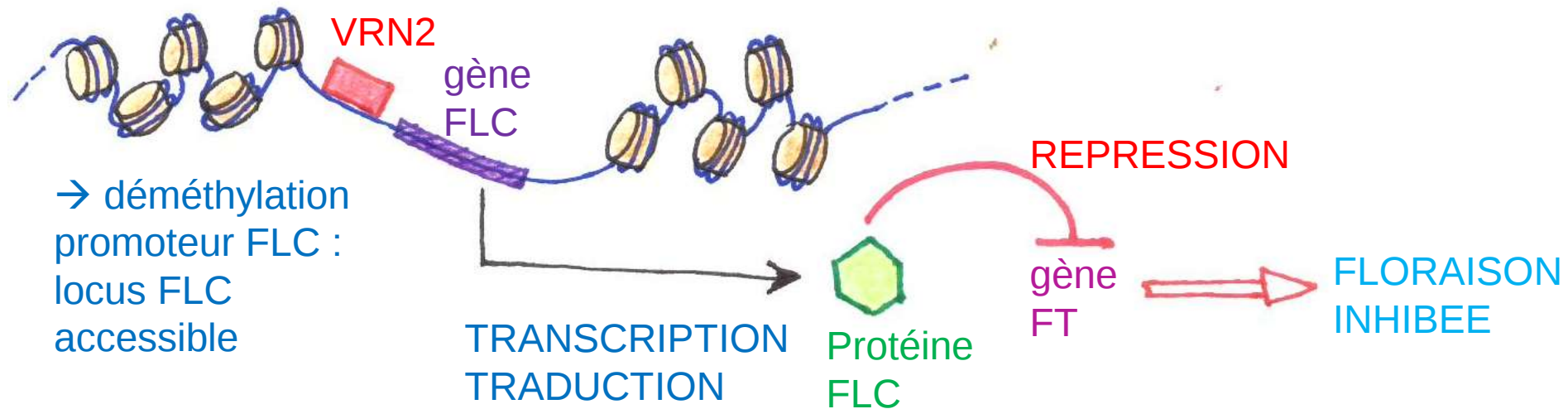
Dans le noyau et le cytoplasme des cellules foliaires :



Document 6. La vernalisation et le contrôle épigénétique.

- Absence de passage au froid

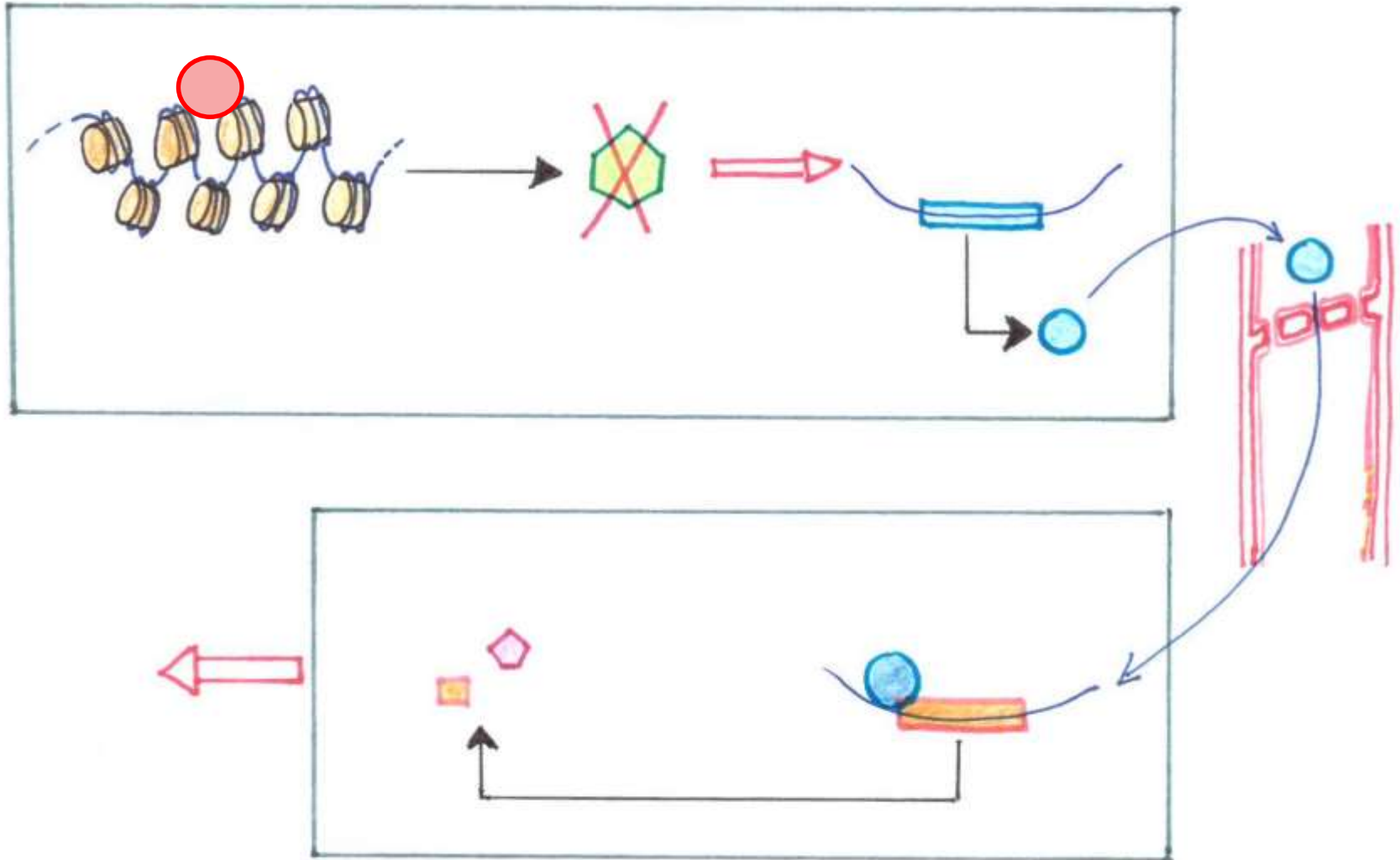
Dans le noyau et le cytoplasme des cellules foliaires :



En l'absence de froid, le gène FLC est exprimé et la protéine FLC réprime l'expression de FT

Document 6. La vernalisation et le contrôle épigénétique.

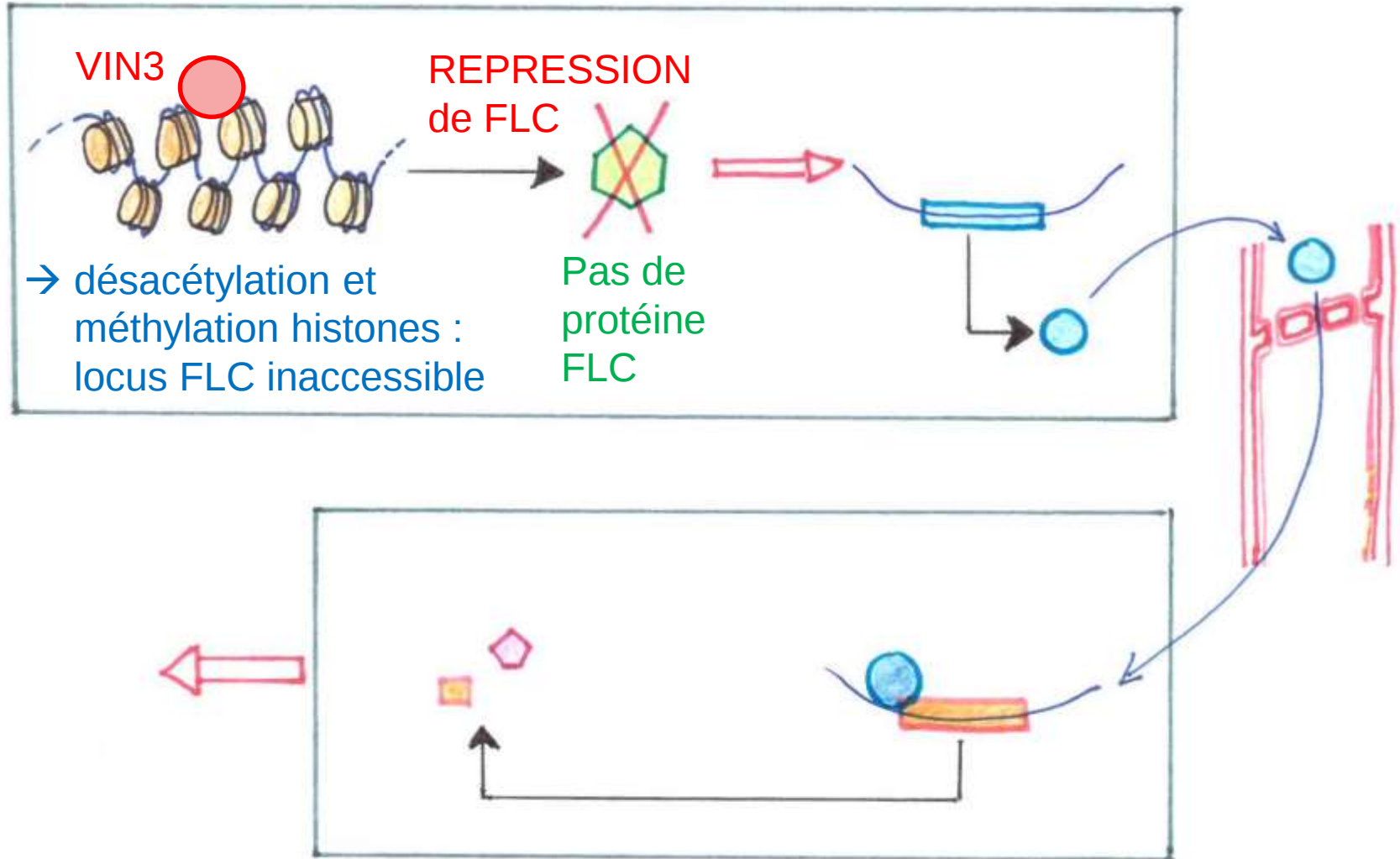
- Après une période de froid de durée suffisante



Document 6. La vernalisation et le contrôle épigénétique.

- Après une période de froid de durée suffisante

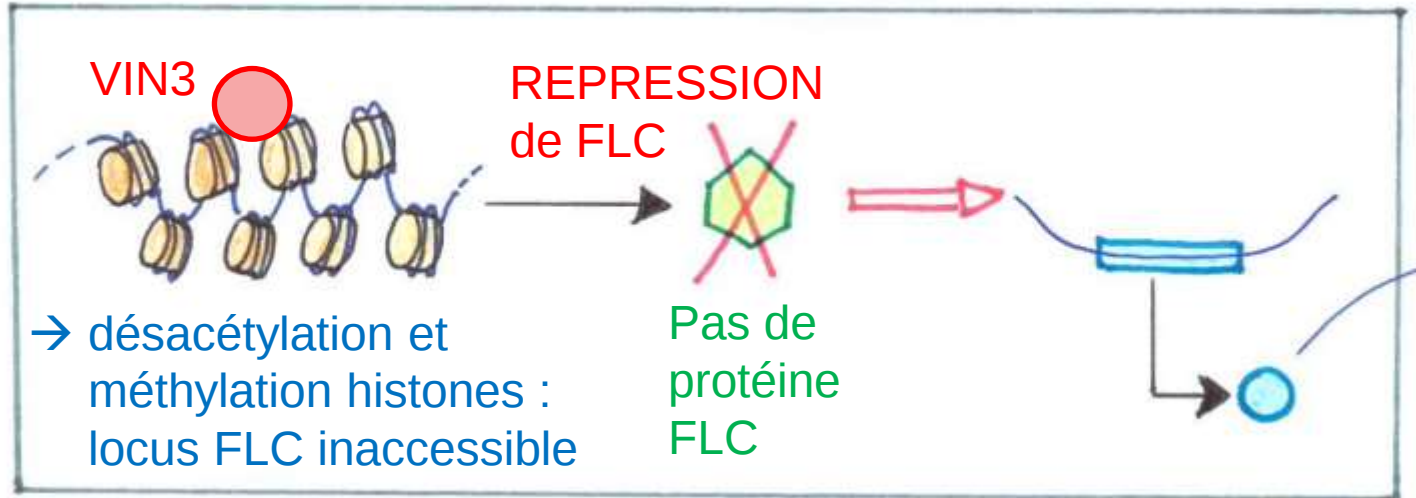
dans les cellules foliaires :



Document 6. La vernalisation et le contrôle épigénétique.

- Après une période de froid de durée suffisante

dans les cellules foliaires :

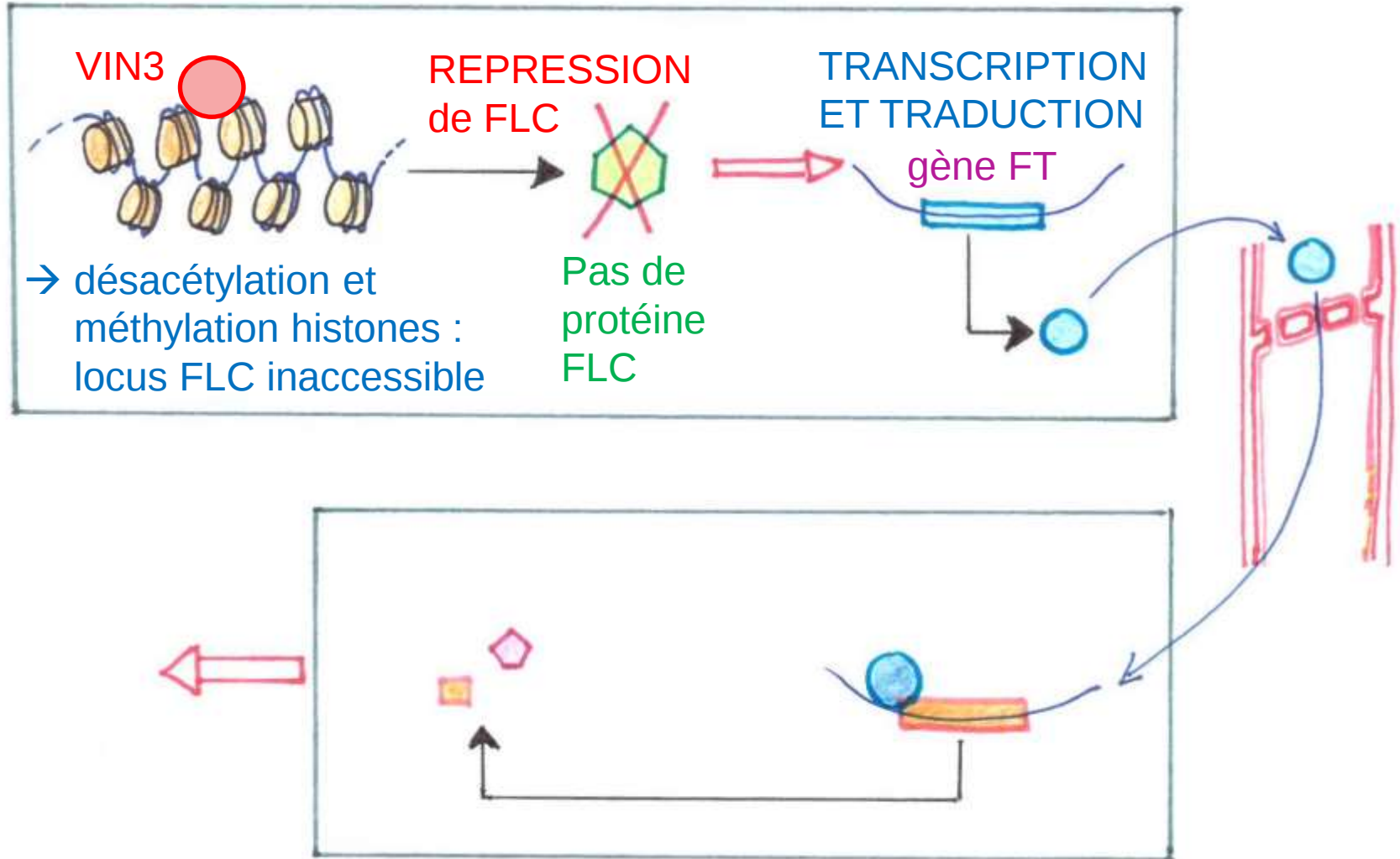


- VIN3 : interactions avec complexe enzymatique
 - désacétylation H3 et H4
 - méthylation lysines 9 et 27 de H3 (H3K9me2 et H3K27me3)
 - Blocage transitoire expression FLC
- VRN1 et VRN2 (enzymes)
 - triméthylation lysines des histones
 - Stabilisation état condensé chromatine et blocage expression FLC

Document 6. La vernalisation et le contrôle épigénétique.

- Après une période de froid de durée suffisante

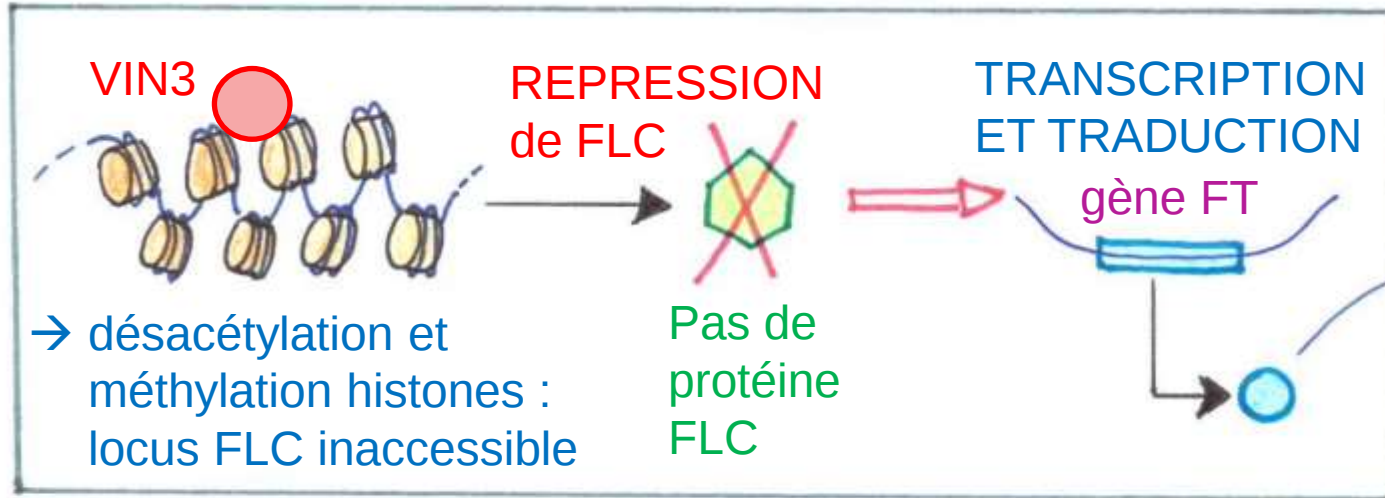
dans les cellules foliaires :



Document 6. La vernalisation et le contrôle épigénétique.

- Après une période de froid de durée suffisante

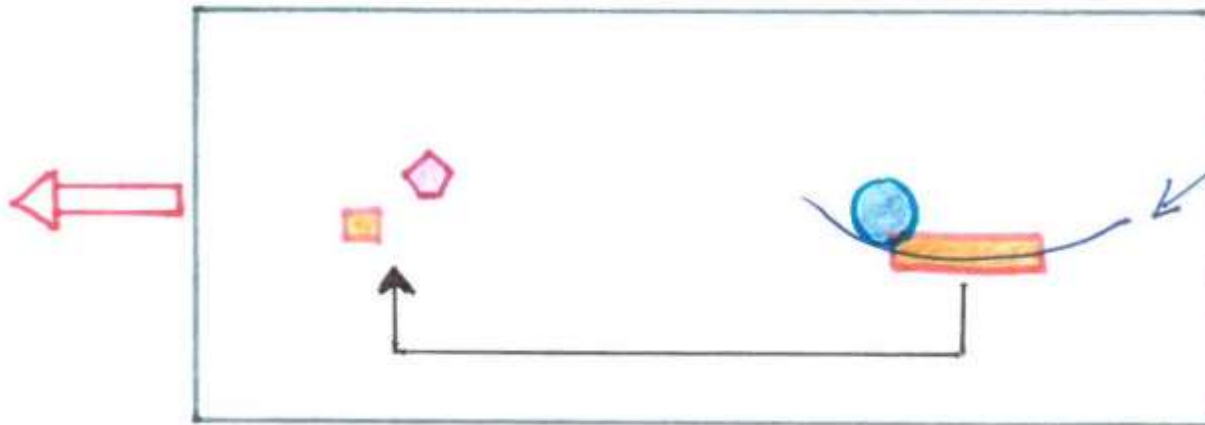
dans les cellules foliaires :



dans les tubes criblés du phloème :

protéine FT (florigène)

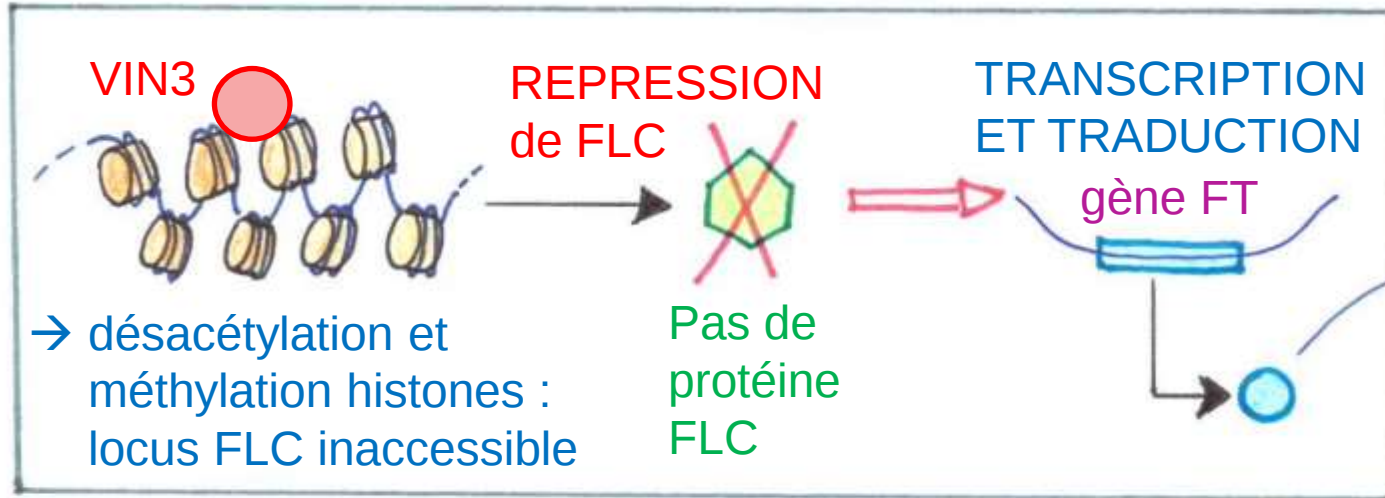
TRANSPORT par la sève élaborée



Document 6. La vernalisation et le contrôle épigénétique.

- Après une période de froid de durée suffisante

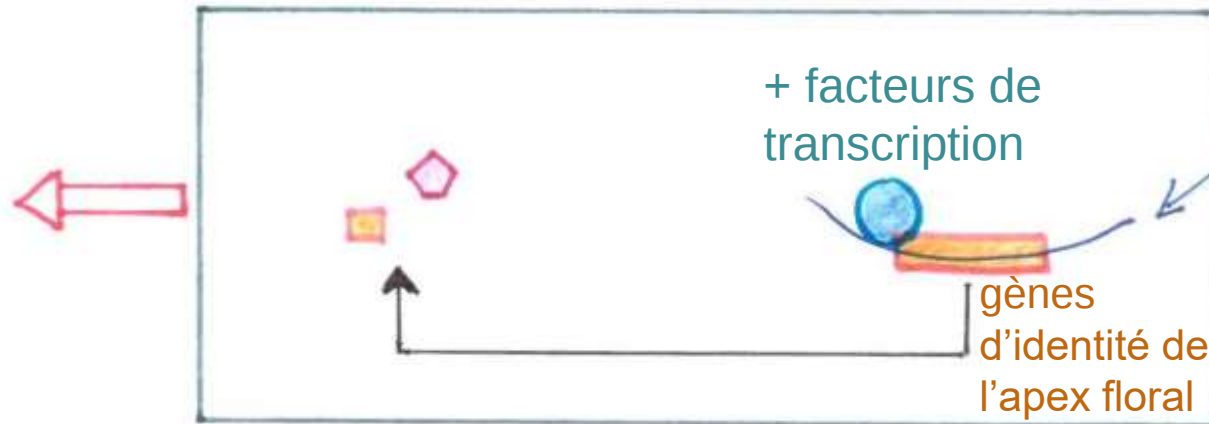
dans les cellules foliaires :



dans les tubes criblés du phloème :

protéine FT (florigène)

dans les cellules méristématiques cibles :



TRANSPORT par la sève élaborée

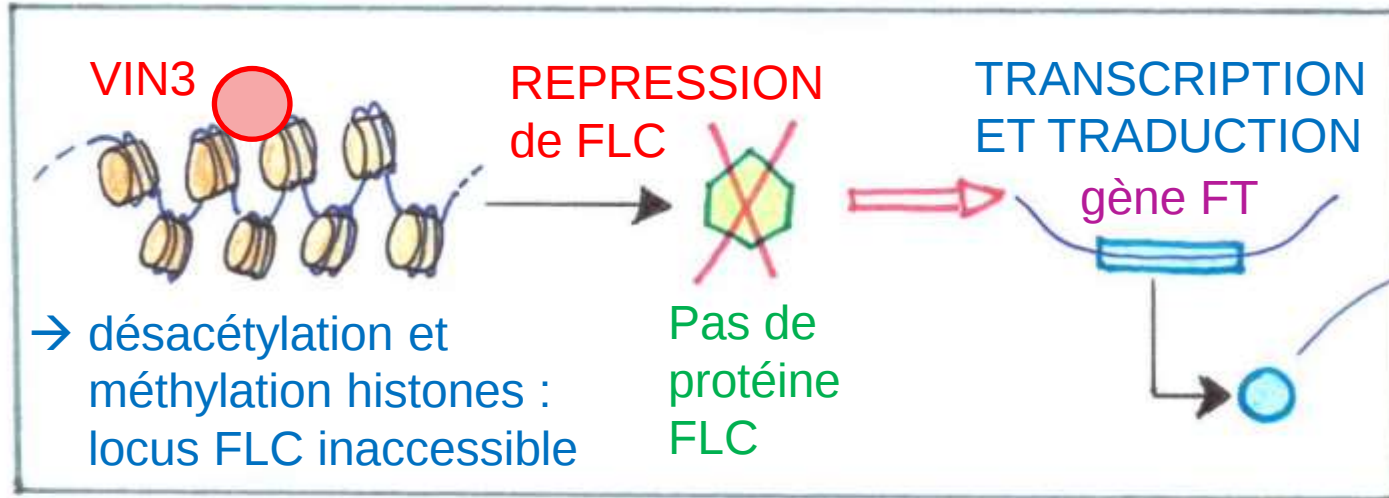
Document 6. La vernalisation et le contrôle épigénétique.

- Après une période de froid de durée suffisante

dans les cellules foliaires :

INDUCTION FLORALE

dans les tubes criblés du phloème :

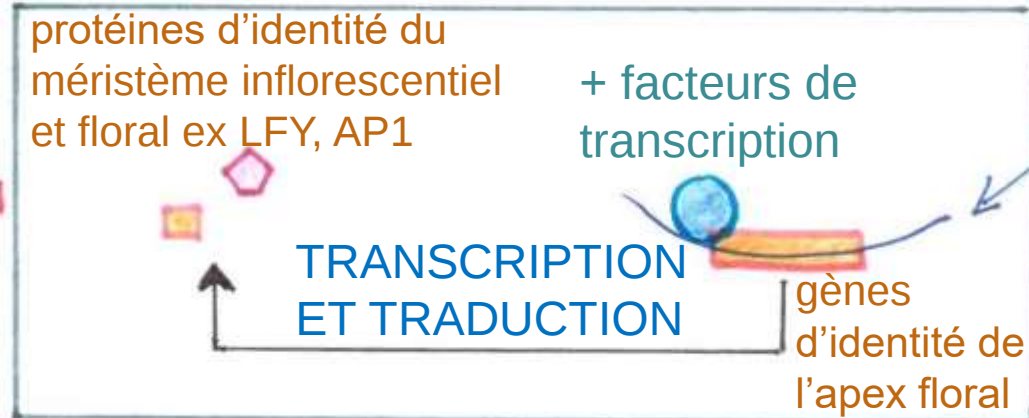


protéine FT (florigène)

dans les cellules méristématiques cibles :

INITIATION FLORALE

Expression de gènes d'identité des organes floraux



TRANSPORT par la sève élaborée

VIRAGE FLORAL

Après exposition au froid, le gène FLC est réprimé, le gène FT est exprimé et la protéine FT induit l'expression de gènes d'identité florale

Des exigences photopériodiques variables

aucune



tomate

facultatives



pomme de terre

absolues



chrysanthème



haricot



blé d'hiver



blé de printemps



maïs

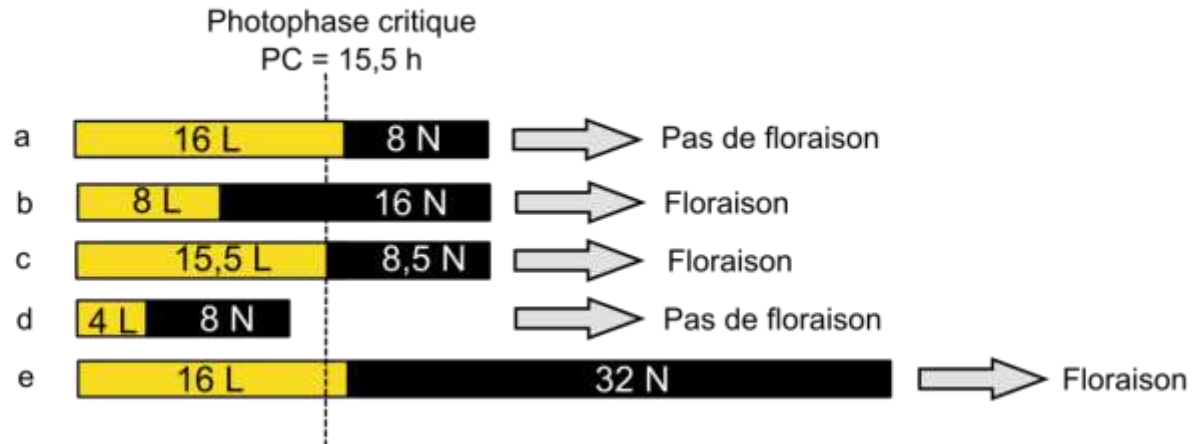
**Nombre de cycles photoinductifs
variables selon les espèces**

Ex : 2 à 4 pour le soja



Document 7. Effets des conditions photopériodiques sur la floraison de la lampourde (*Xanthium*).

Déterminations des conditions inductrices

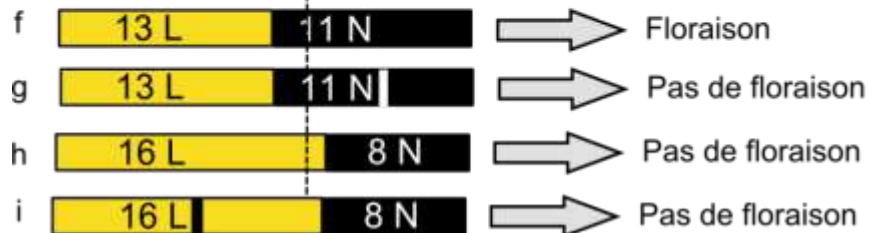


Interruption de la scotophase par des flashes lumineux

Flashes de lumière blanche

Photophase critique

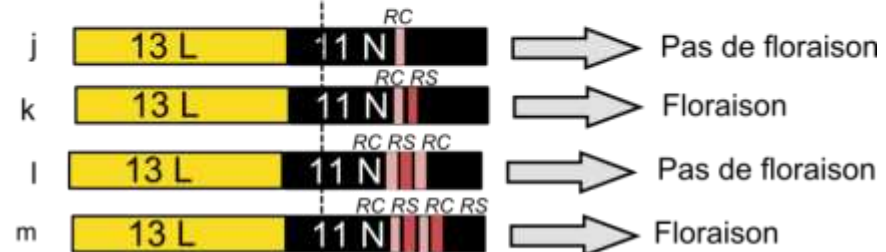
PC = 15,5 h



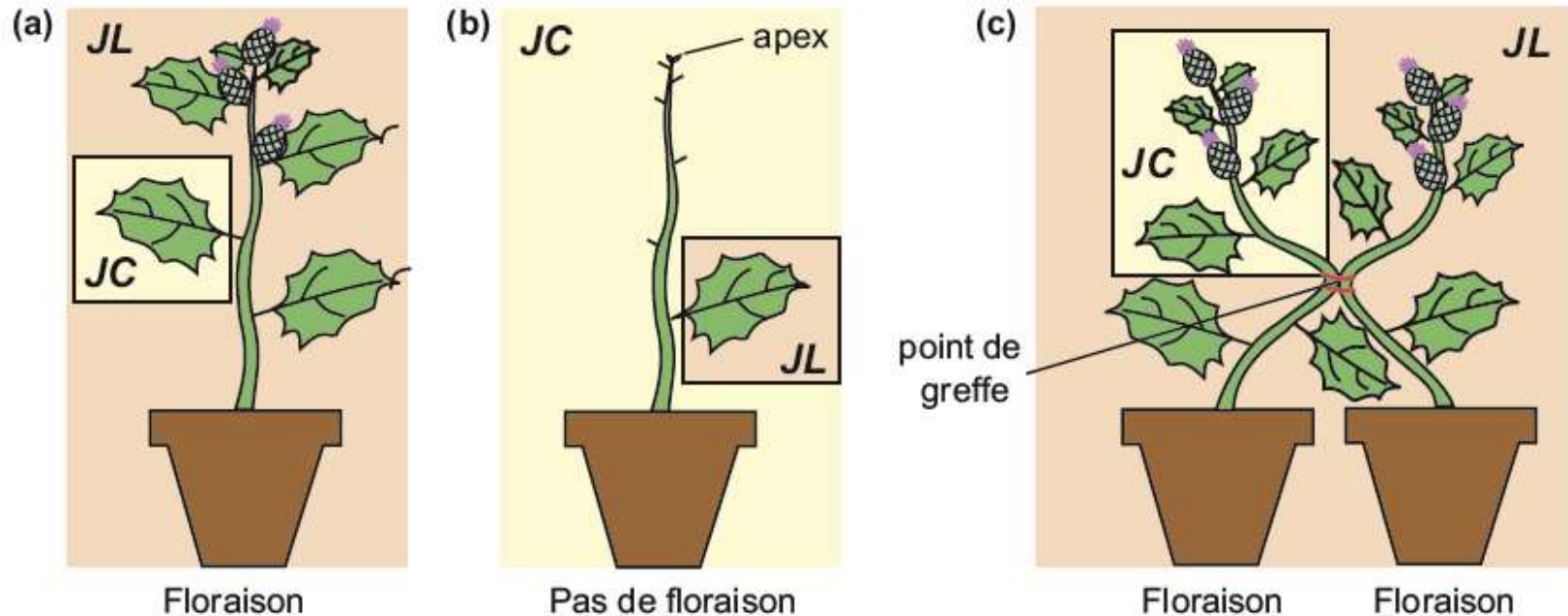
Flashes de lumière rouge

Photophase critique

PC = 15,5 h



Document 8. Détermination expérimentales des organes de perception de la photopériode chez la lampourde (*Xanthium*).



(a) Traitement inducteur d'une seule feuille

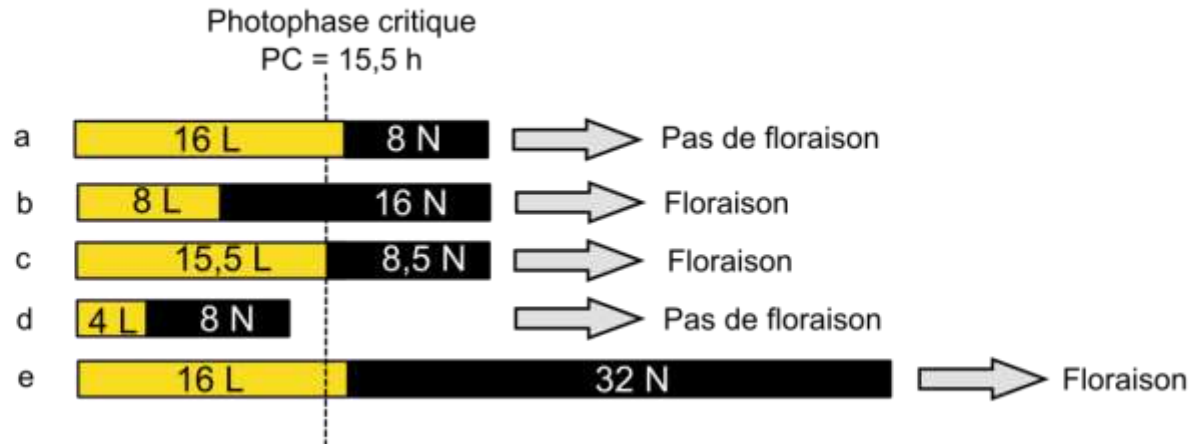
(b) Traitement inducteur d'un plant privé de ses feuilles à l'exception d'une seule maintenue en conditions non inductrices

(c) Greffe entre un plant induit et un plant non induit



Document 7. Effets des conditions photopériodiques sur la floraison de la lampourde (*Xanthium*).

Déterminations des conditions inductrices

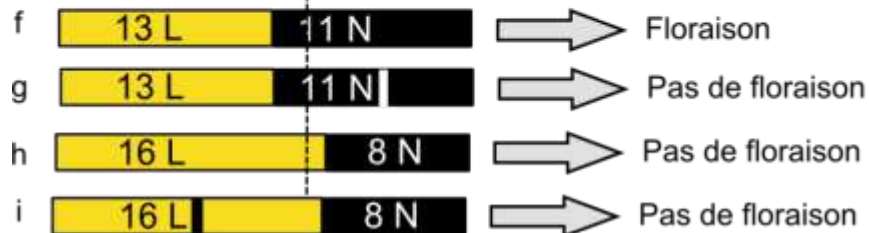


Interruption de la scotophase par des flashes lumineux

Flashes de lumière blanche

Photophase critique

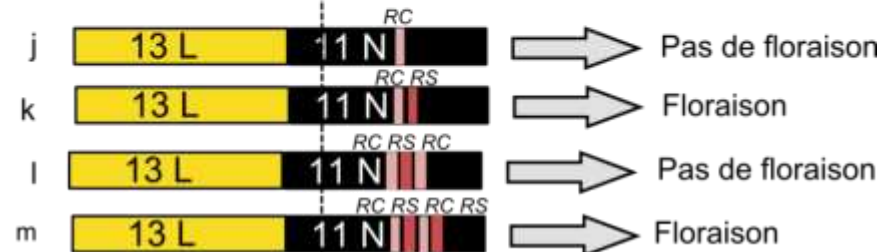
PC = 15,5 h



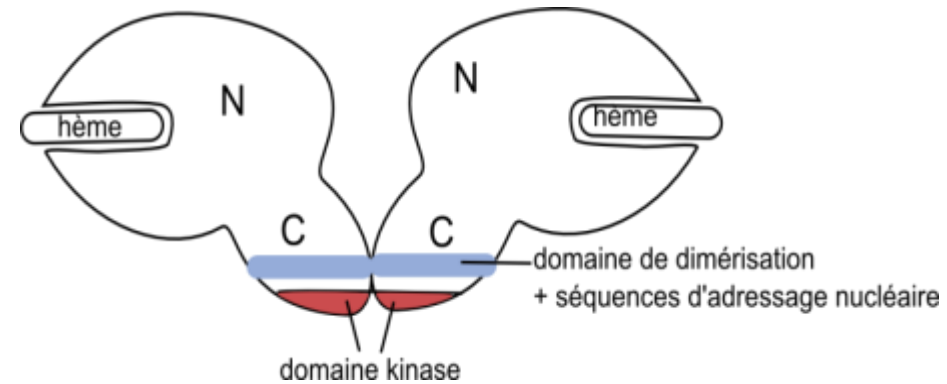
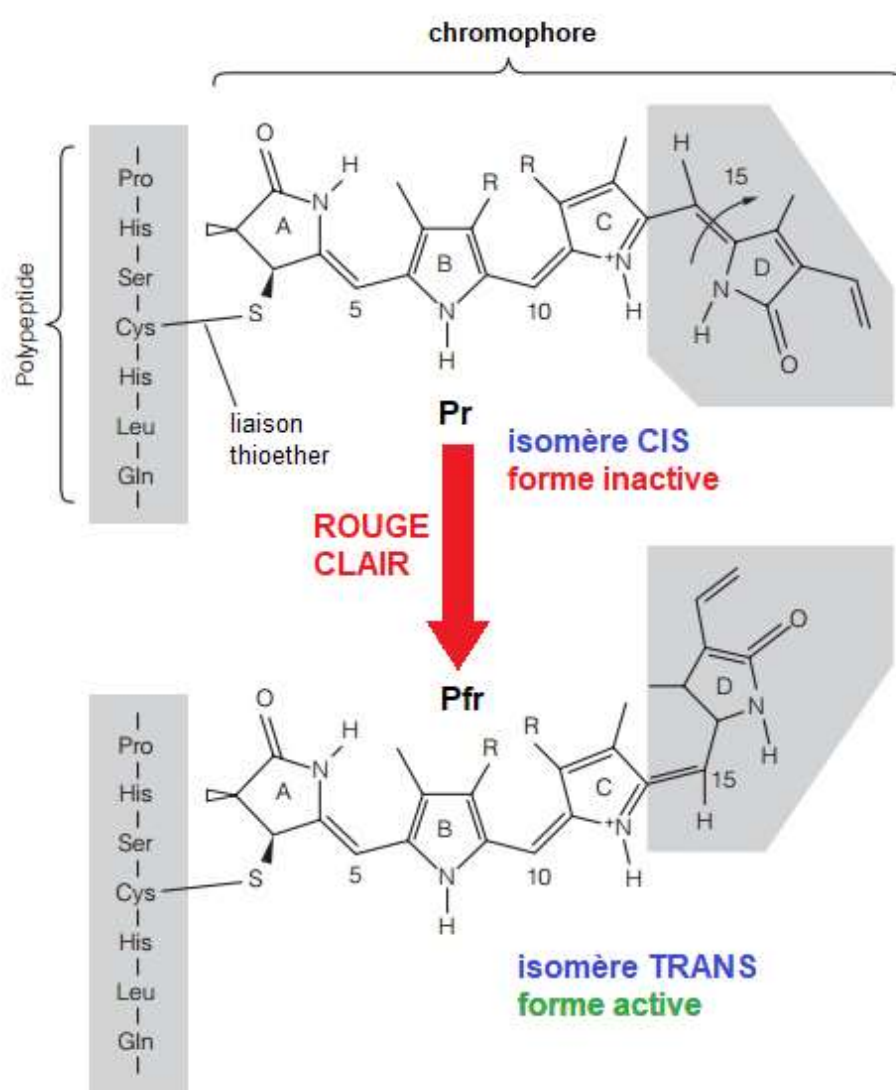
Flashes de lumière rouge

Photophase critique

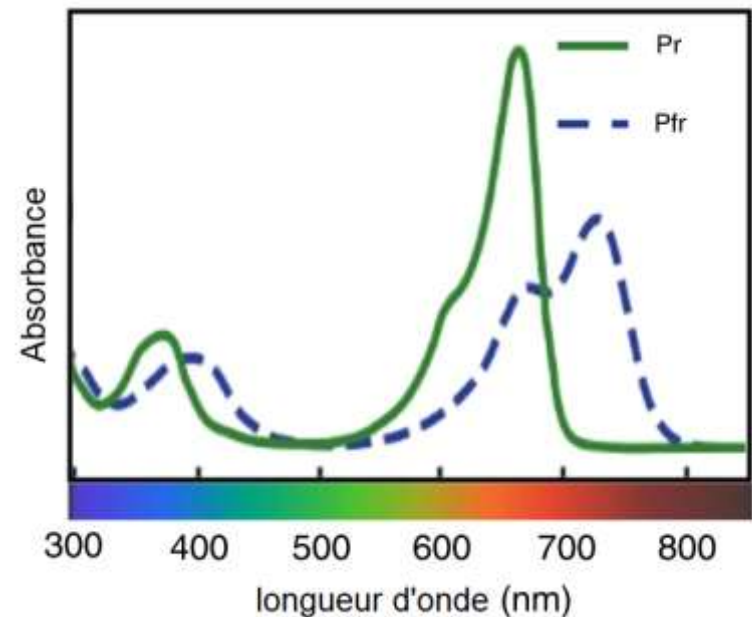
PC = 15,5 h



Document 9. Structure et propriétés du phytochrome.



Structure schématisée d'un phytochrome



Effet de la lumière rouge sur un phytochrome

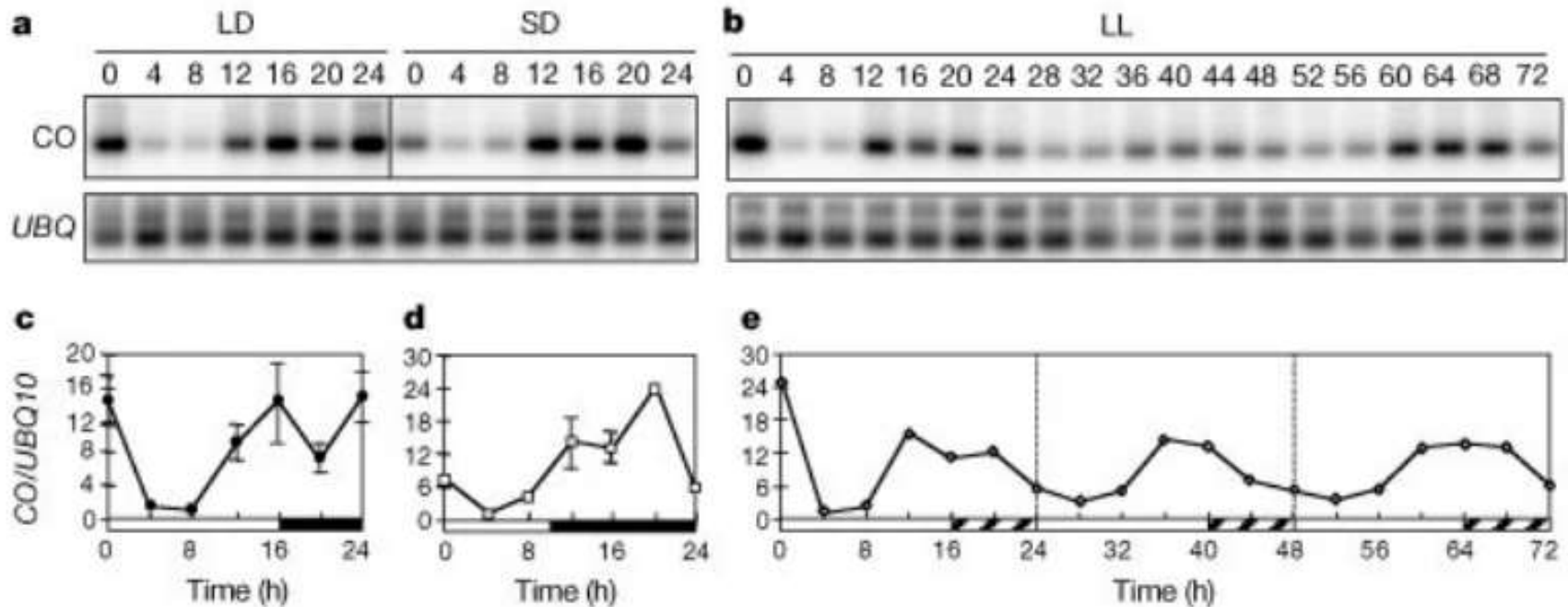
Spectre d'absorption des deux formes d'un phytochrome

Mise en évidence de la fonction du gène CONSTANS



Un plant d'*Arabidopsis thaliana* de type sauvage (Col-0) (à gauche) et un plant mutant perte-de-fonction constans (co-101) (à droite) ont été cultivés dans des conditions de journée longue (16 heures de lumière et 8 heures d'obscurité) à 22°C.

Document 10. Mise en évidence du contrôle de l'expression du gène CO par une horloge circadienne.



Northern blot réalisés pour des plantes cultivées en LD (jours longs) et SD (jours courts) (a), ou placées en lumière constante (b).

(c), (d), (e) : variations des quantités relatives d'ARNm de CO au cours du temps dans les trois conditions précédentes.

Les échantillons ont été prélevés aux heures indiquées après l'aube (heure = 0).

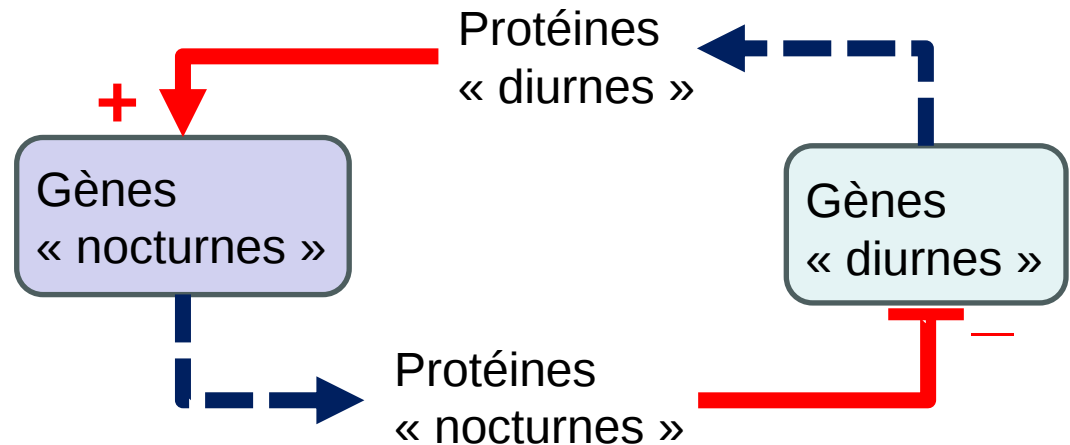
Document 11. Les composantes d'une horloge biologique.

- **Une voie d'entrée :**

- Transmet l'information liée aux variations quotidiennes de l'alternance lumière / obscurité
- Synchronise le rythme oscillant et le rythme externe
- Mobilise divers pigments : phytochromes, cryptochromes

- **Un oscillateur central :**

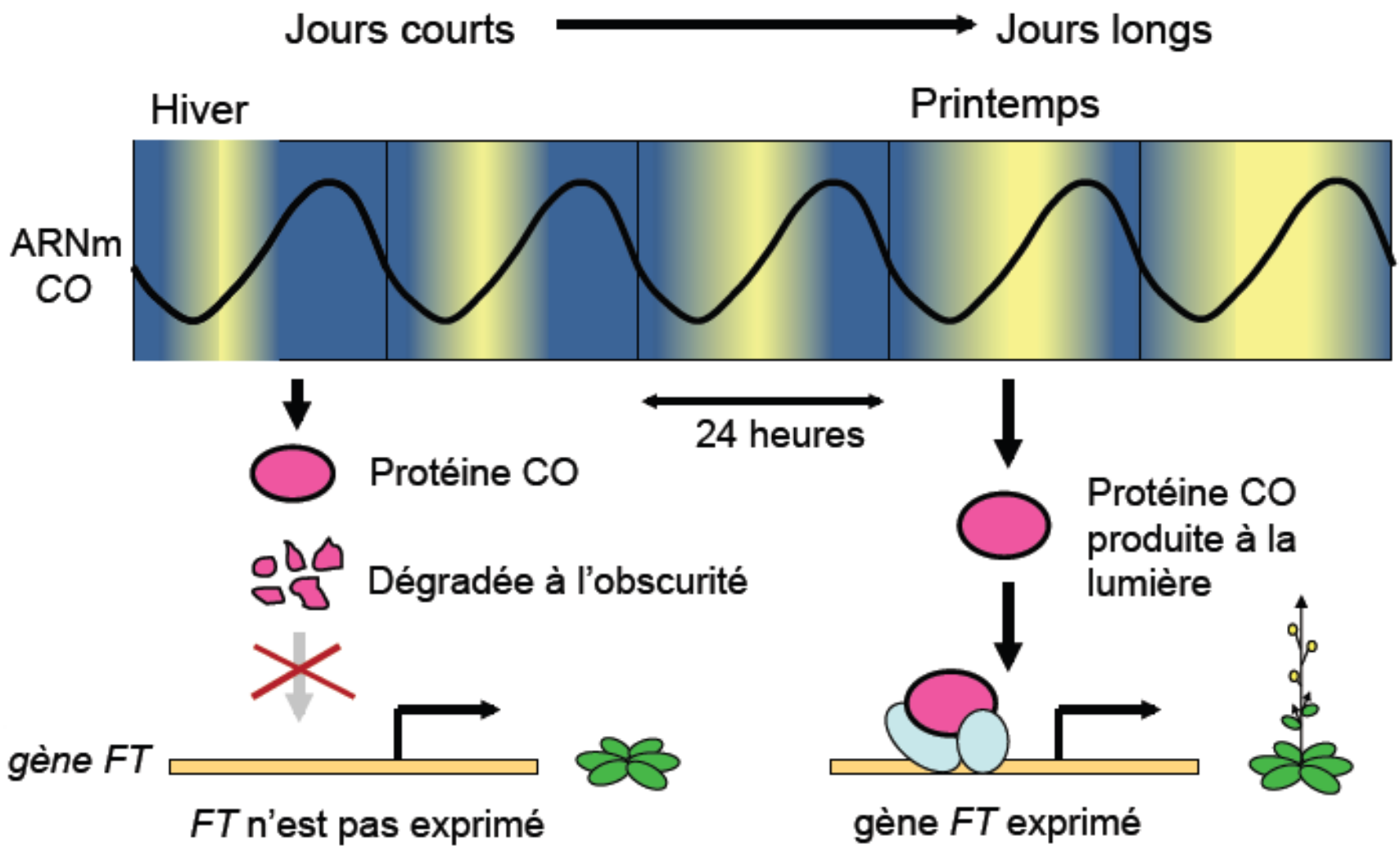
- Génère le rythme
- Fondé sur deux groupes de gènes et une boucle de rétrocontrôle négatif



- **Une voie de sortie :**

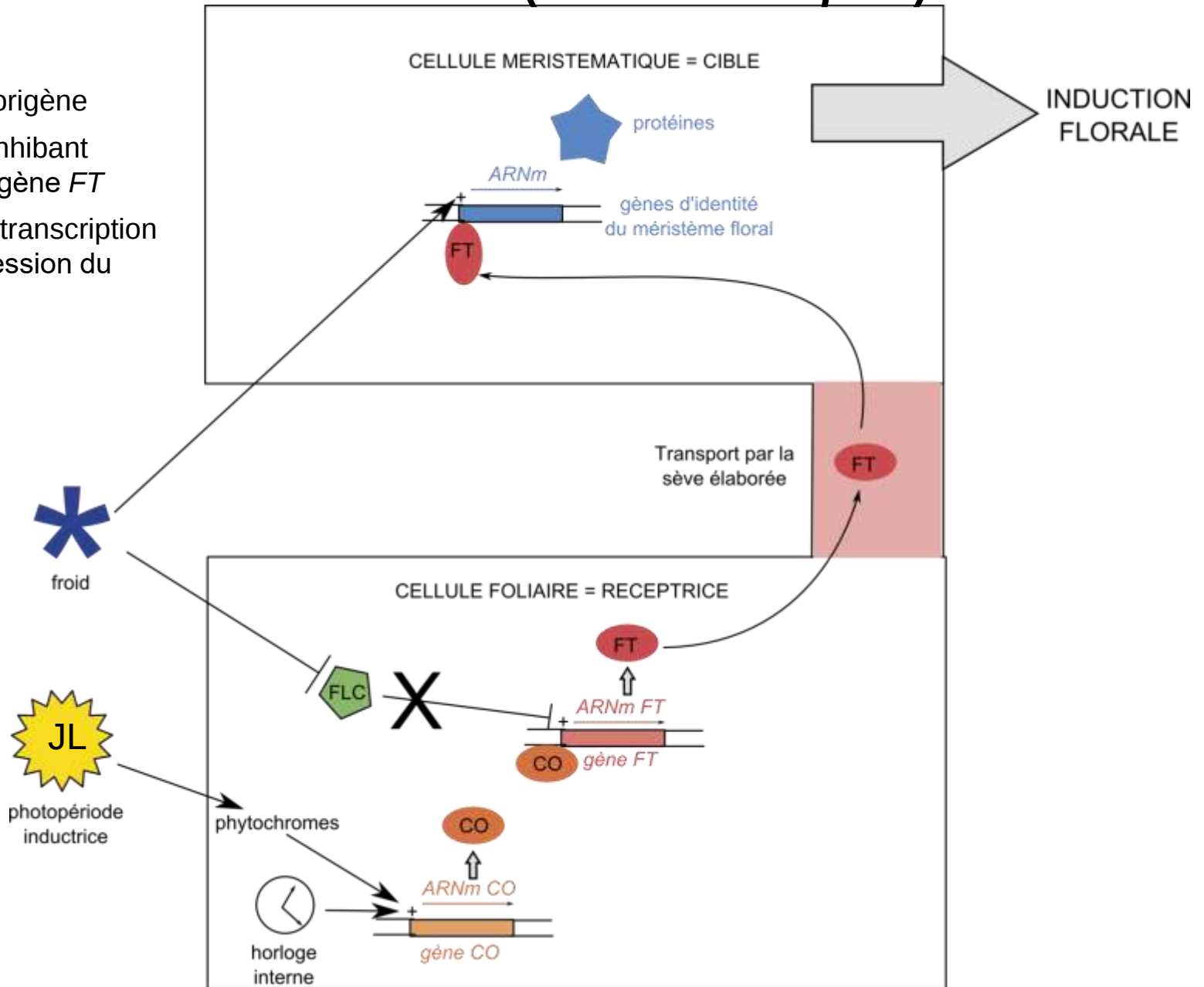
- Impose l'activité rythmique à un certain nombre de processus biologiques

Document 12. Modèle de l'action de la photopériode sur l'expression du gène CO et conséquences sur la protéine CO.



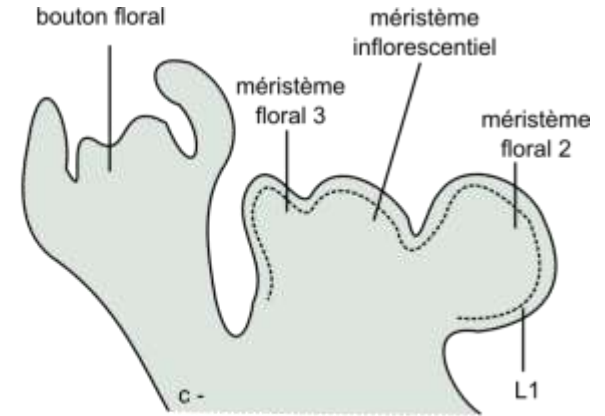
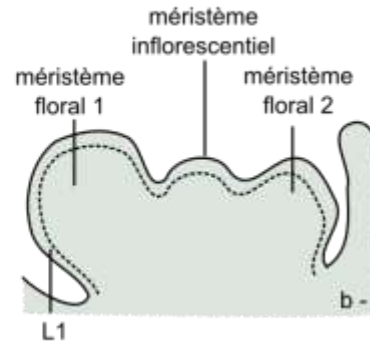
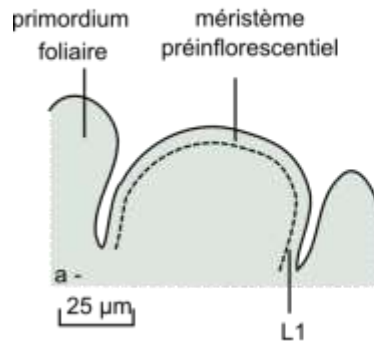
Document 13. Contrôle de la floraison par les facteurs environnementaux (chez *Arabidopsis*).

FT : hormone florigène
FLC : protéine inhibant l'expression du gène *FT*
CO : facteur de transcription stimulant l'expression du gène *FT*

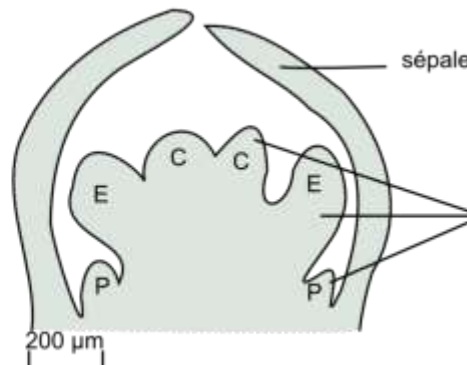


Rappels : étapes de la transformation du méristème apical caulinaire lors de la transition de l'état végétatif à l'état reproducteur chez *Arabidopsis*.

Virage floral



a à c : coupes longitudinales à 3 stades successifs



Organogénèse florale

C : carpelle
E : étamine
P : pétale

d - coupe longitudinale d'un bouton floral

<https://www.slcu.cam.ac.uk/file-1>

« La théorie de la métamorphose » de Goethe



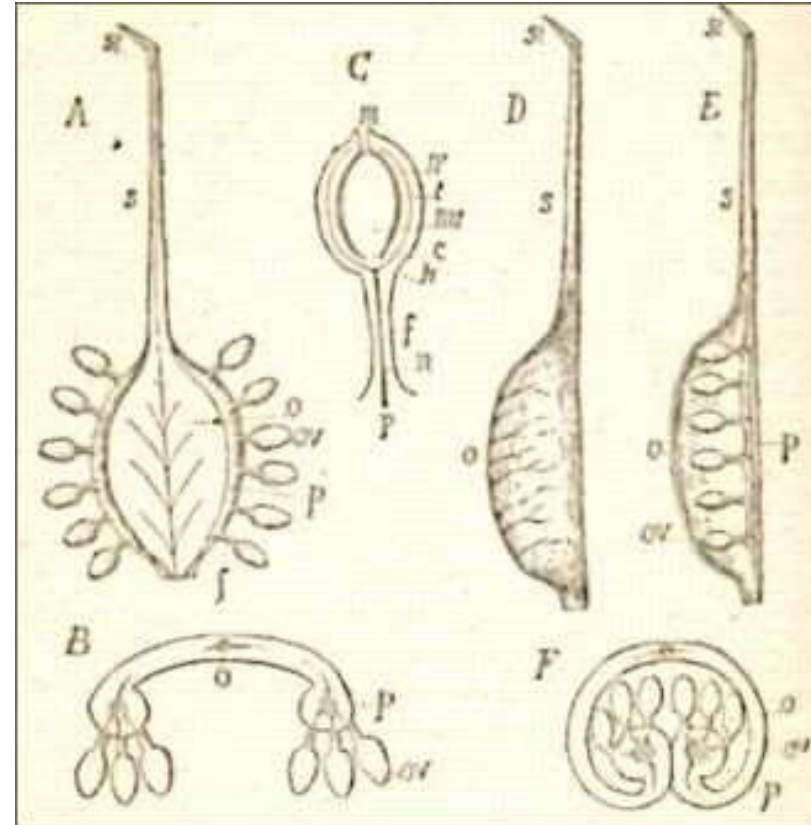
Johann
Wolfgang
Von Goethe
1749 - 1832

« La parenté secrète des différentes parties externes de la plante, à savoir des feuilles, du calice, de la corolle, des étamines, qui se forment successivement et comme naissant les unes des autres, a été reconnue depuis longtemps par les savants. On a nommé métamorphose des plantes l'action par laquelle un seul et même organe se montre à nous diversement transformé. »

Essai sur la métamorphose des plantes, GOETHE (1790)



Ci-contre, dessin paru dans *Éléments de Botanique* de Van TIEGHEM (1898) montrant l'origine foliaire des carpelles



Document 14. Architecture des fleurs de type sauvage et de divers mutants des gènes des classes (A, B et C).



type sauvage



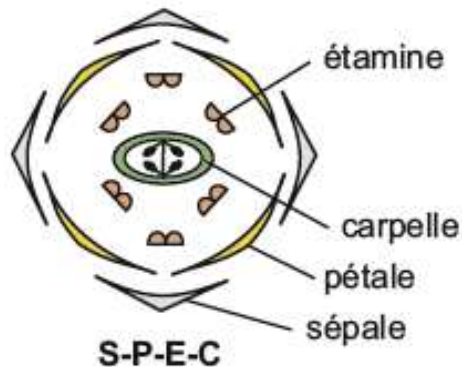
mutant de classe A
(*apetala1* / *apetala2*)



mutant de classe B
(*apetala3* / *pistillata*)



mutant de classe C
(*agamous*)



$S \rightarrow C$
 $P \rightarrow E$



$P \rightarrow S$
 $E \rightarrow C$

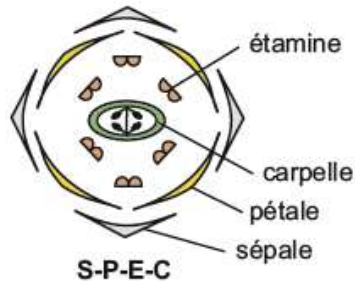


$E \rightarrow P$
 $C \rightarrow S$

Document 14. Architecture des fleurs de type sauvage et de divers mutants des gènes des classes (A, B et C).



type sauvage



mutant de classe A
(*apetala1* / *apetala2*)



mutant de classe B
(*apetala3* / *pistillata*)



mutant de classe C
(*agamous*)

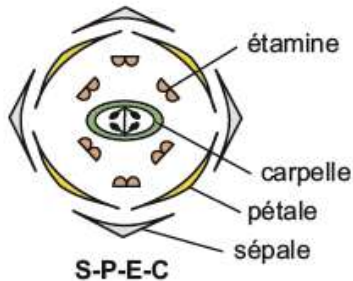


- 4 combinaisons seulement → un nombre restreint de gènes spécifient l'identité et la position des pièces florales : gènes A, B, C

Document 14. Architecture des fleurs de type sauvage et de divers mutants des gènes des classes (A, B et C).



type sauvage



mutant de classe A
(*apetala1* / *apetala2*)



mutant de classe B
(*apetala3* / *pistillata*)



mutant de classe C
(*agamous*)

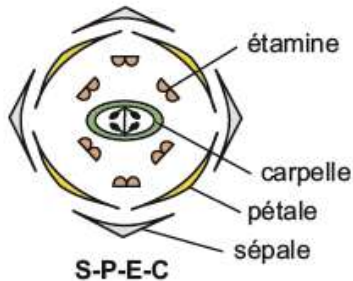


- 4 combinaisons seulement → un nombre restreint de gènes spécifient l'identité et la position des pièces florales : gènes A, B, C
- Chaque mutation entraîne la modification de deux verticilles adjacents → chaque gène contrôle les caractères de deux verticilles adjacents

Document 14. Architecture des fleurs de type sauvage et de divers mutants des gènes des classes (A, B et C).



type sauvage



mutant de classe A
(*apetala1* / *apetala2*)



mutant de classe B
(*apetala3* / *pistillata*)

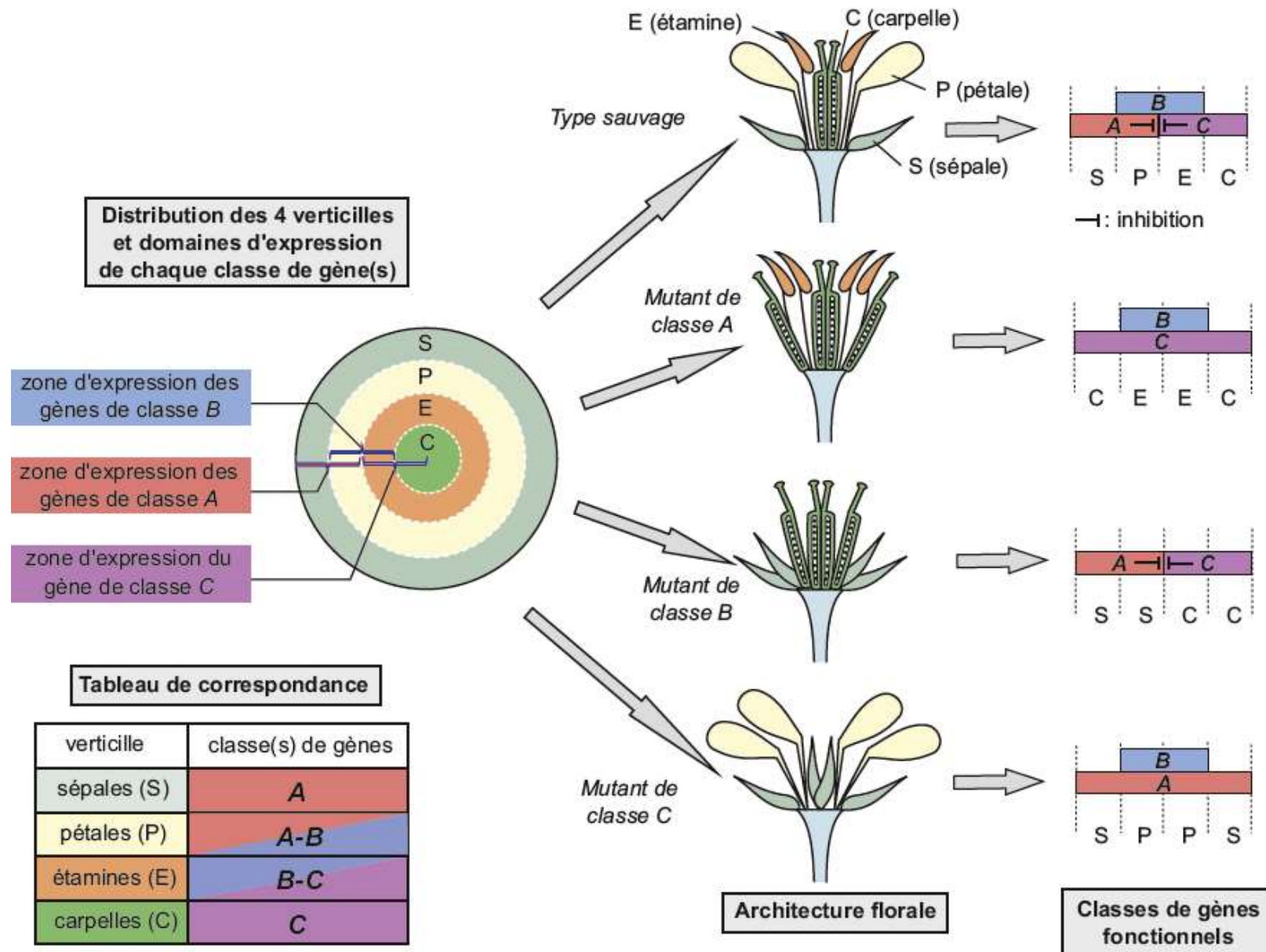


mutant de classe C
(*agamous*)

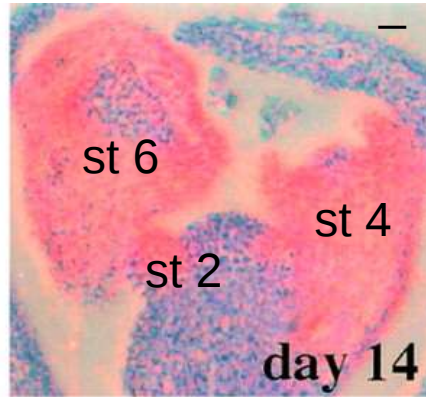
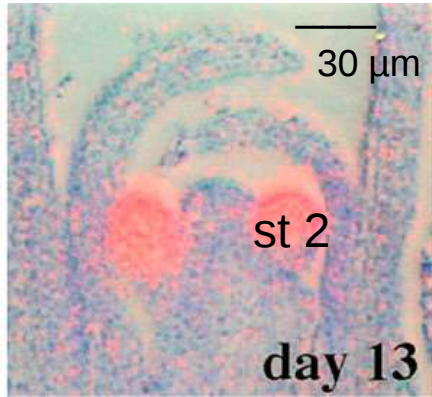


- 4 combinaisons seulement → un nombre restreint de gènes spécifient l'identité et la position des pièces florales : gènes A, B, C
- Chaque mutation entraîne la modification de deux verticilles adjacents → chaque gène contrôle les caractères de deux verticilles adjacents
- Si le gène A n'est pas fonctionnel, le gène C s'exprime et réciproquement → les gènes des classes A et C s'inhibent réciproquement

Document 15. Le modèle ABC appliqué à la forme sauvage et aux trois classes de mutants.



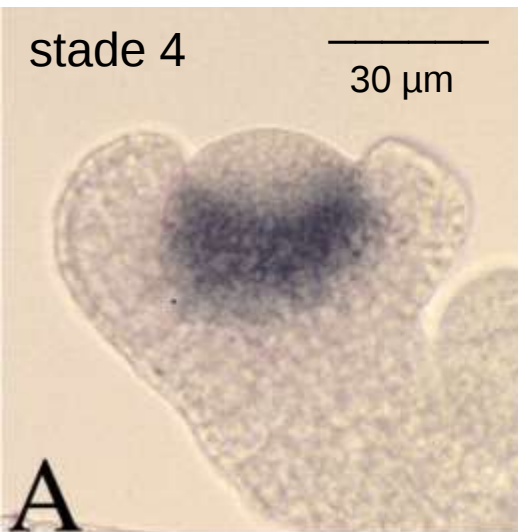
Détermination des domaines d'expression des gènes de classe A, B et C



Mise en évidence du domaine d'expression de *AP1* – gène de classe A – par hybridation *in situ* utilisant des sondes radioactives (révélation par autoradiographie) sur des coupes longitudinales de méristème inflorescentiel.

D'après Liljegren, S. J., et al. Plant Cell 1999;11:1007-1018

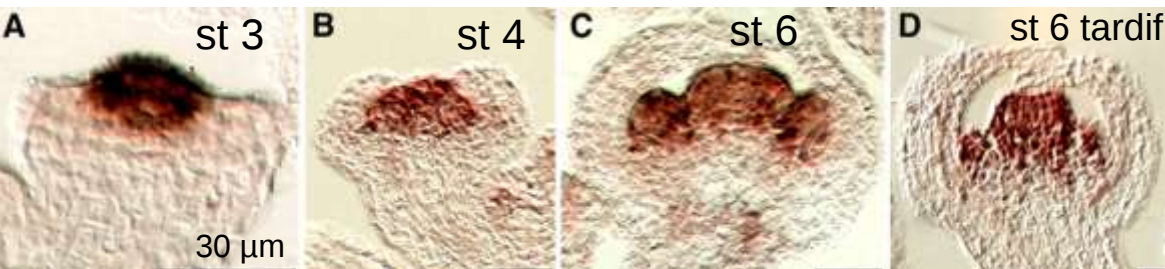
<https://doi.org/10.1105/tpc.11.6.1007>



Mise en évidence du domaine d'expression de *AP3* – gène de classe B – grâce au gène rapporteur *GUS* (*A. thaliana* *AP3::GUS*) sur des coupes longitudinales de méristème floral.

D'après Lamb. et al., 2002 development 129:2079-2086

<https://journals.biologists.com/dev/article/129/9/2079/41876/Regulation-of-APETALA3-floral-homeotic-gene>

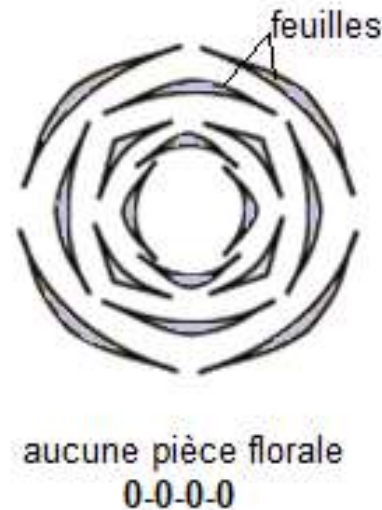


Mise en évidence du domaine d'expression de *agamous* – gène de classe C – par hybridation *in situ* (sondes reconnues par des Ac spécifiques couplés à une enzyme transformant un substrat incolore en produit coloré) sur des coupes longitudinales de méristème floral.

D'après Prunet et al., Plant cell 2008 20:907-919 <https://doi.org/10.1105/tpc.107.053306>

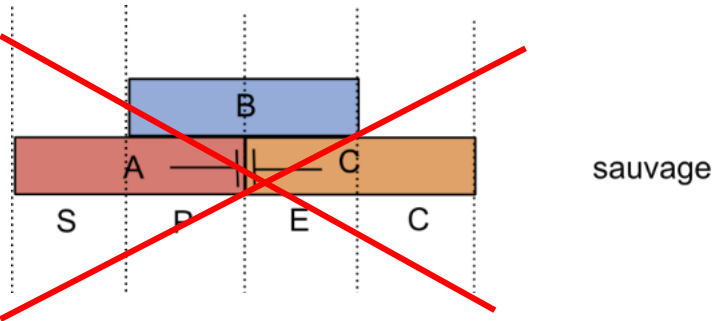
Le modèle révisé ABCE

- La co-expression des gènes de classe A et B dans des tissus végétatifs qui ne les expriment pas naturellement n'induit pas la formation de pétales
 - L'expression de ces deux gènes ne suffit donc pas à déterminer une identité de pétale.
 - Les produits des gènes A, B, C sont nécessaires mais non suffisants pour définir l'identité des pièces florales.
- Observation de quadruples mutants *sepallata*

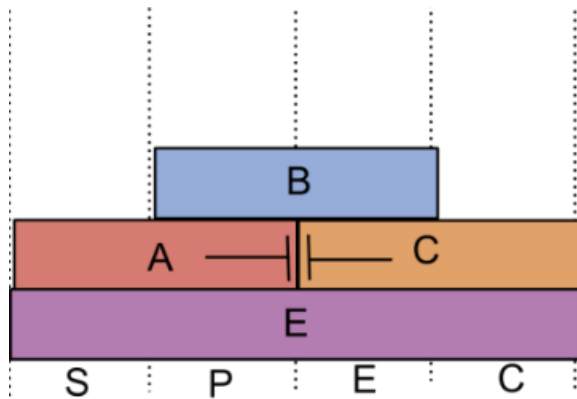


- Le modèle ABC ne suffit pas à expliquer complètement l'identité des pièces florales.
- La fonction des gènes des classes A, B et C nécessite l'expression de gènes d'une autre classe, E.

Rappel : le modèle ABC

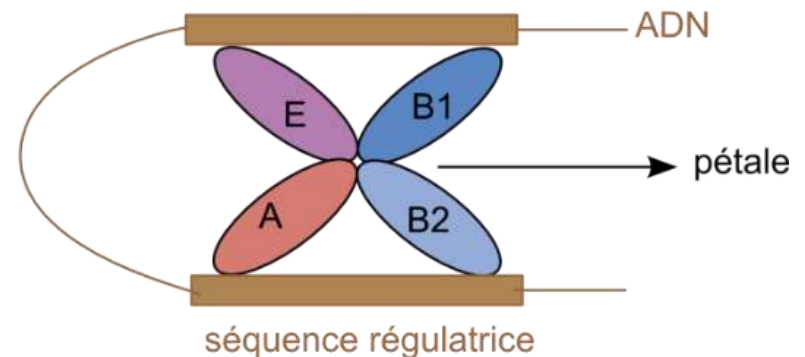
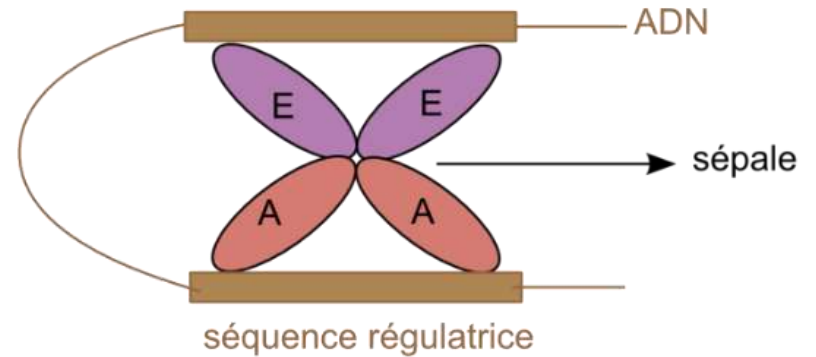


Document 16. Détermination de l'identité florale dans le modèle ABCE (formation de tétramères).

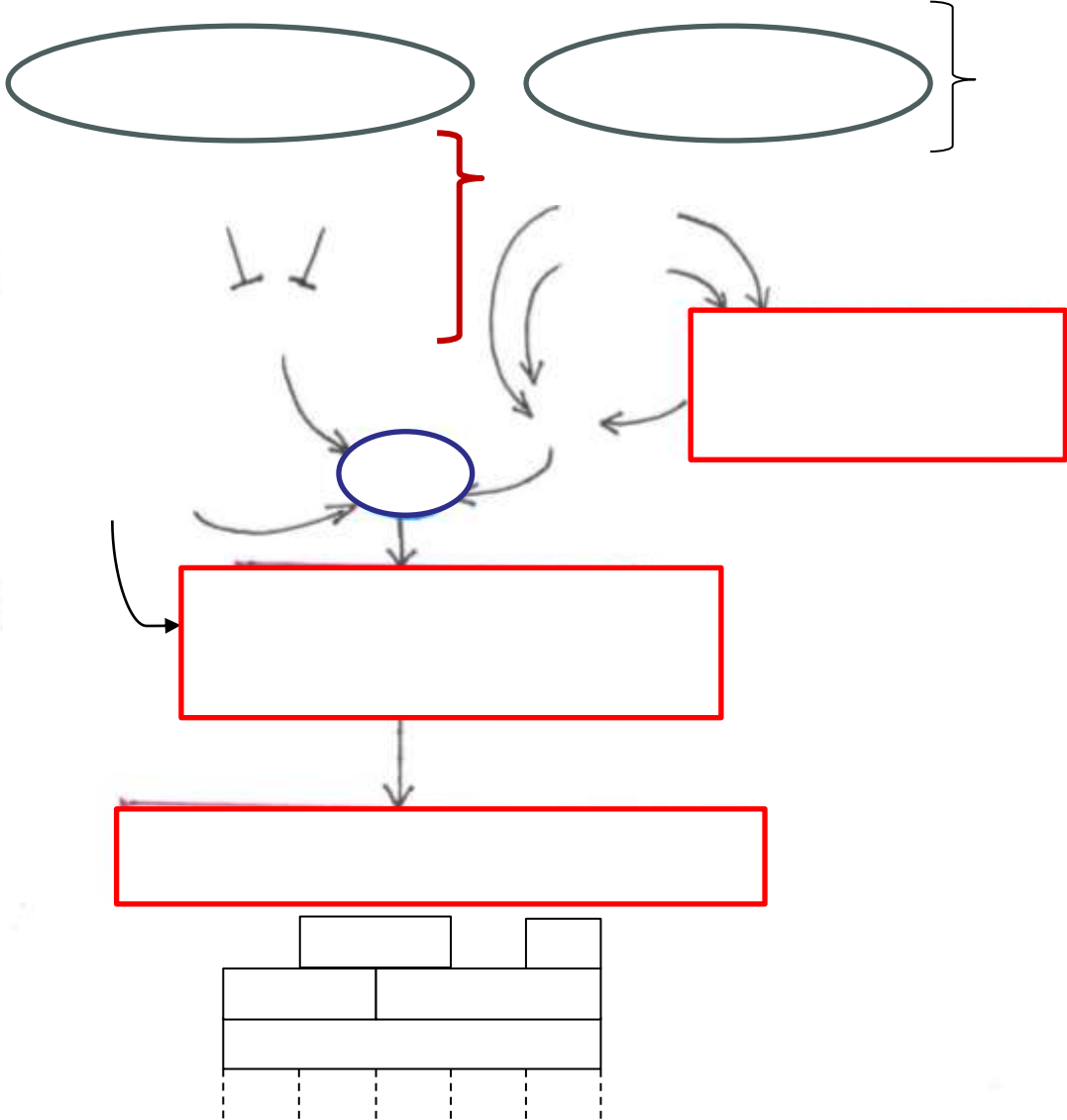
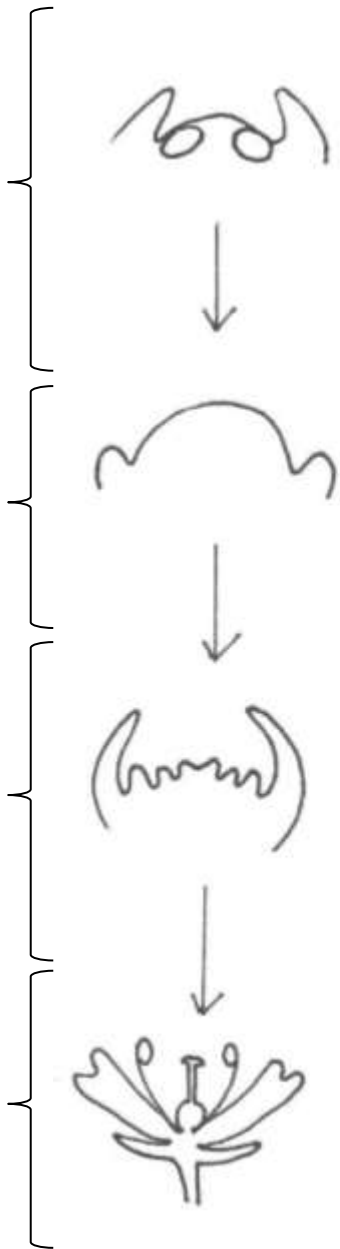


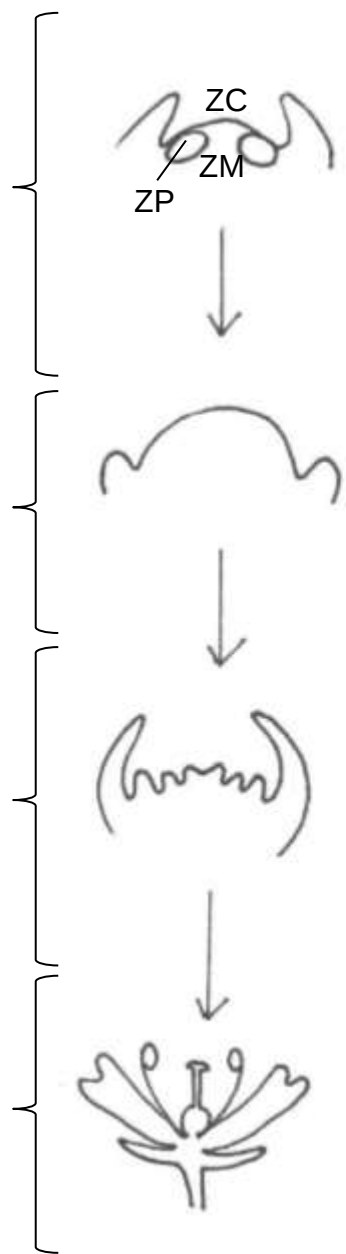
Le modèle ABCE

sauvage



**Son interprétation moléculaire
(formation de tétramères)**

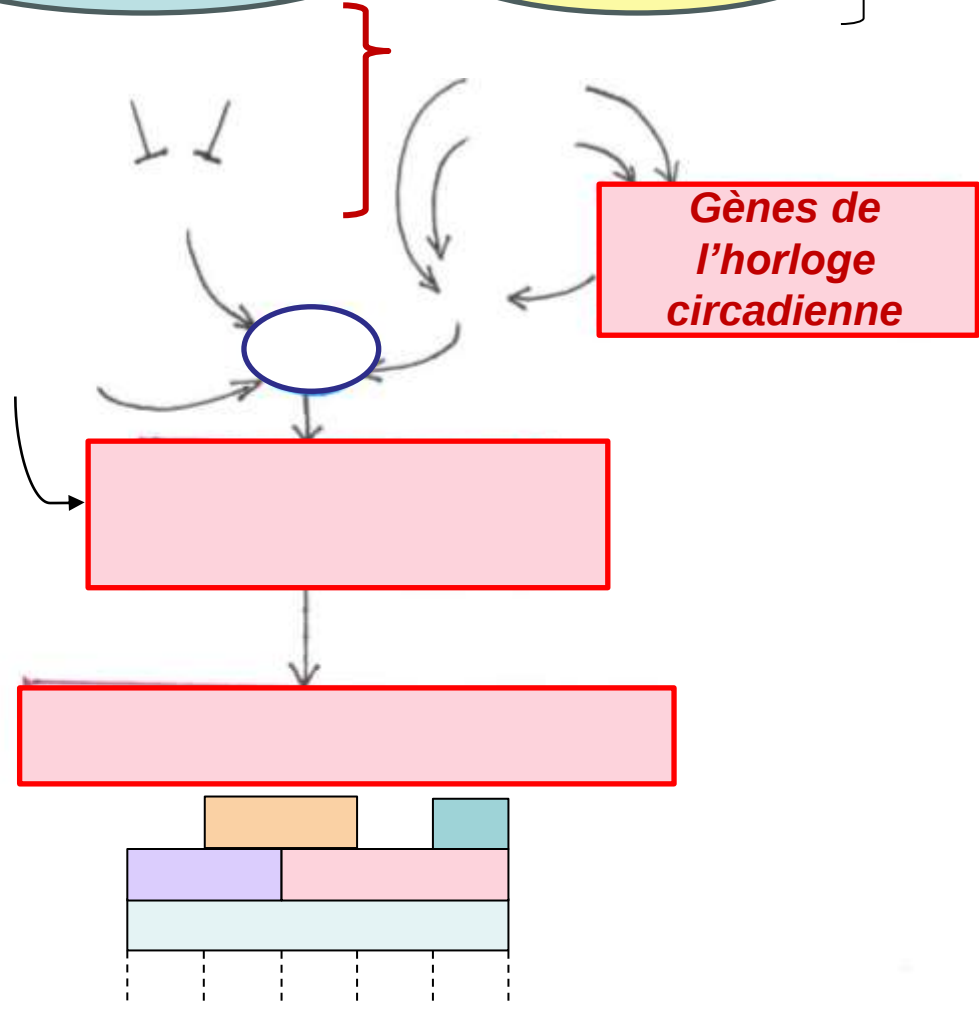




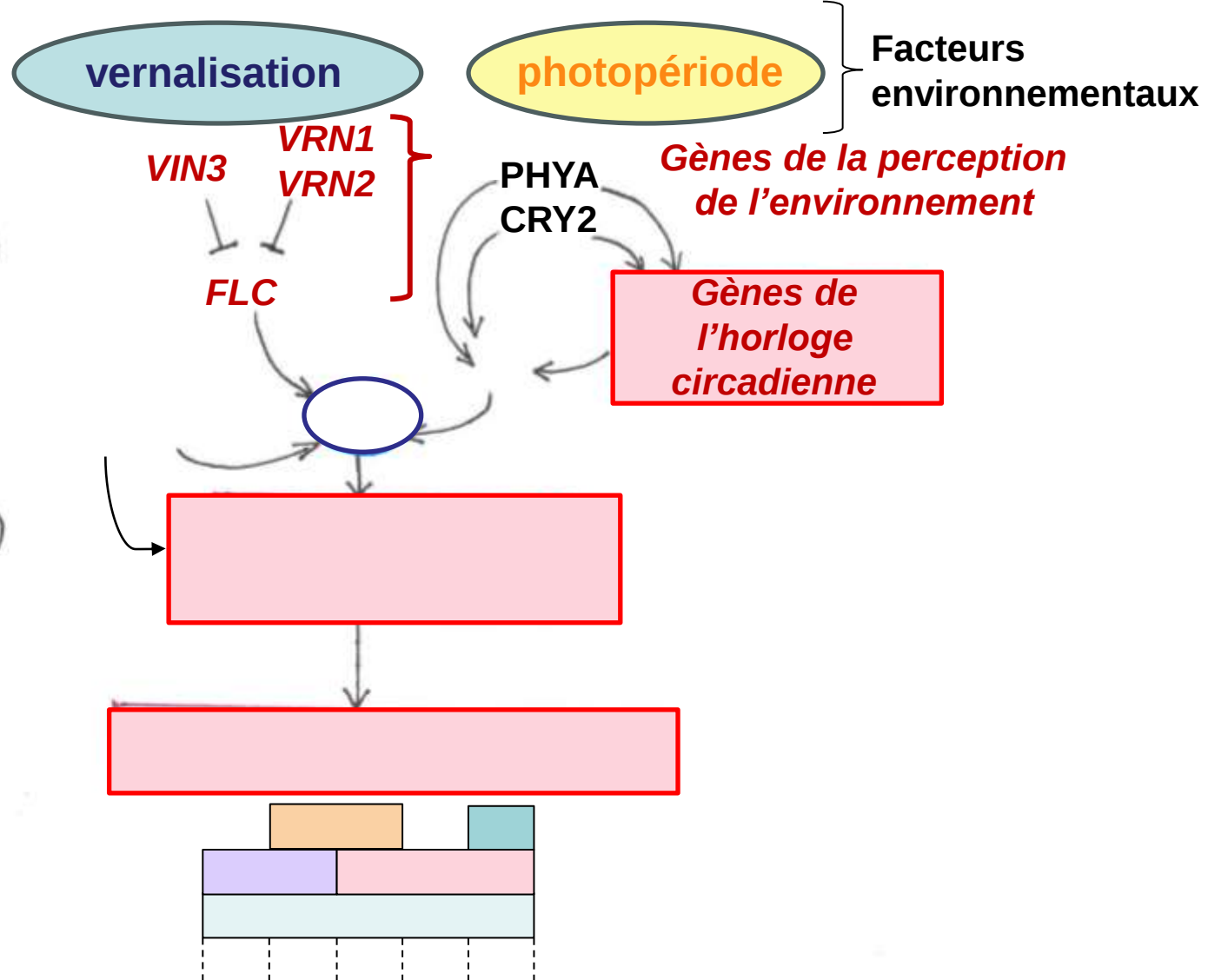
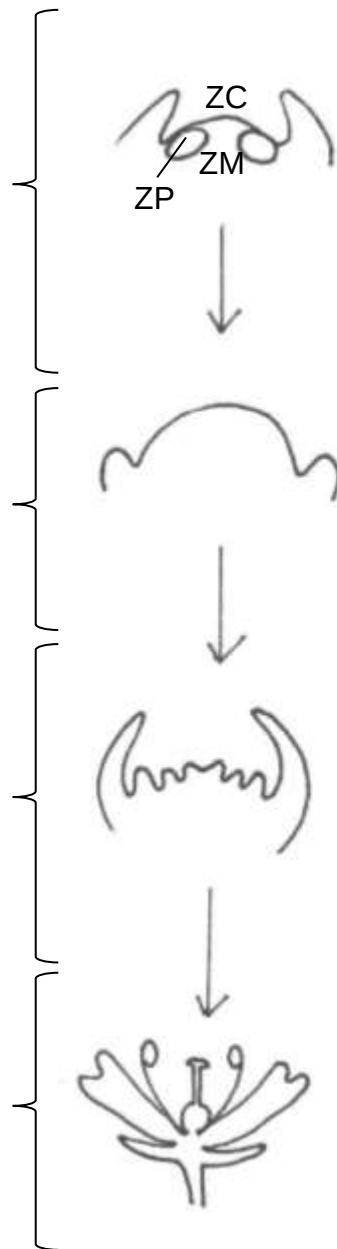
vernalisation

photopériode

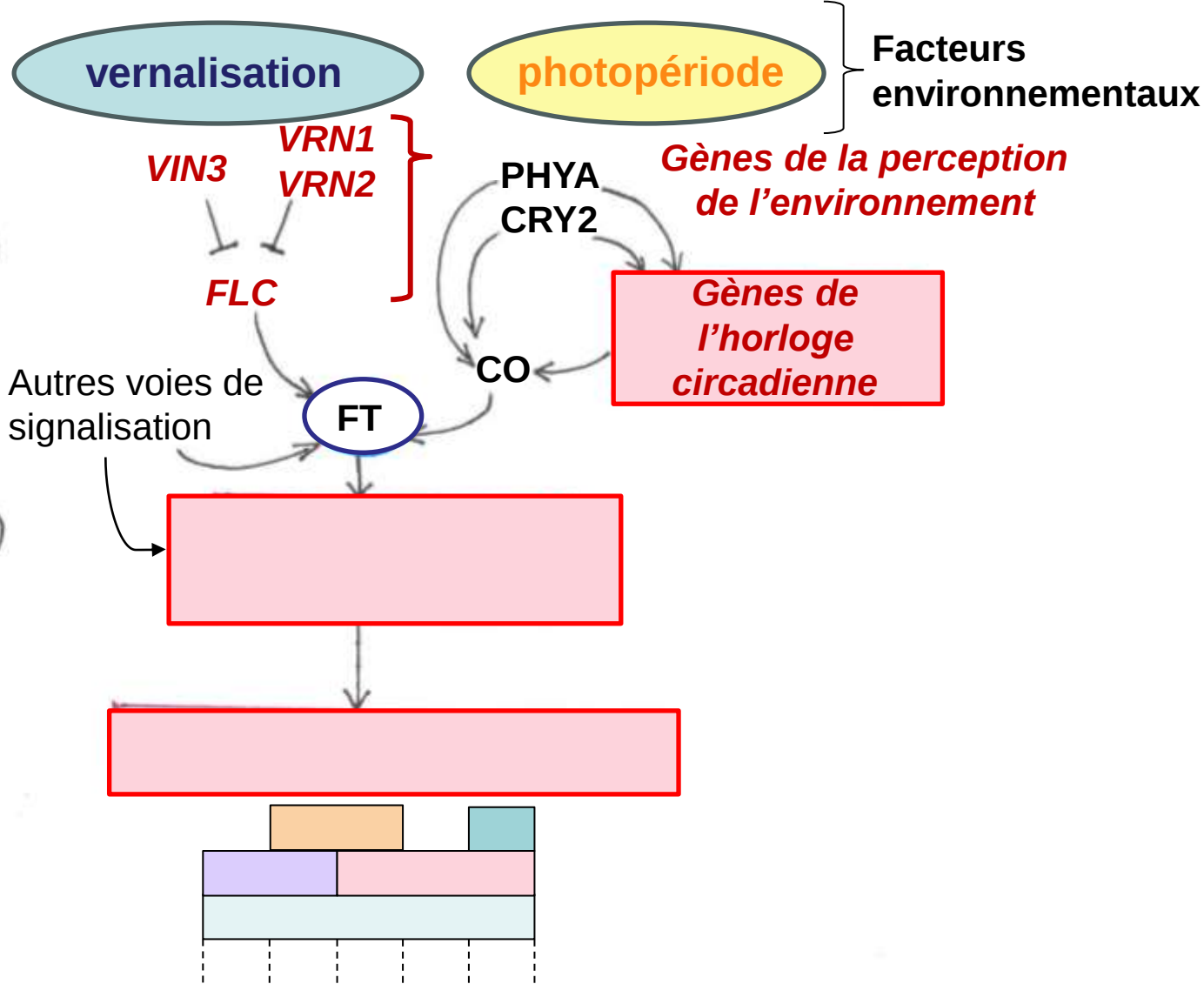
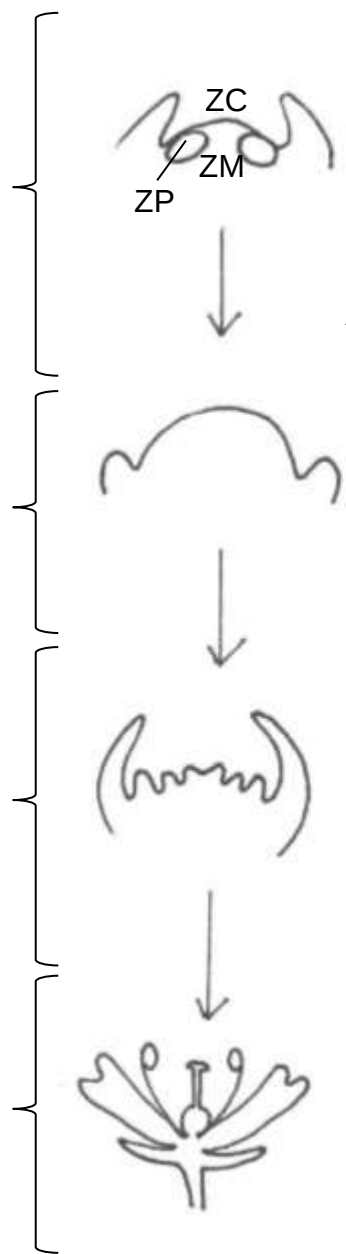
Facteurs
environnementaux



INDUCTION
FLORALE

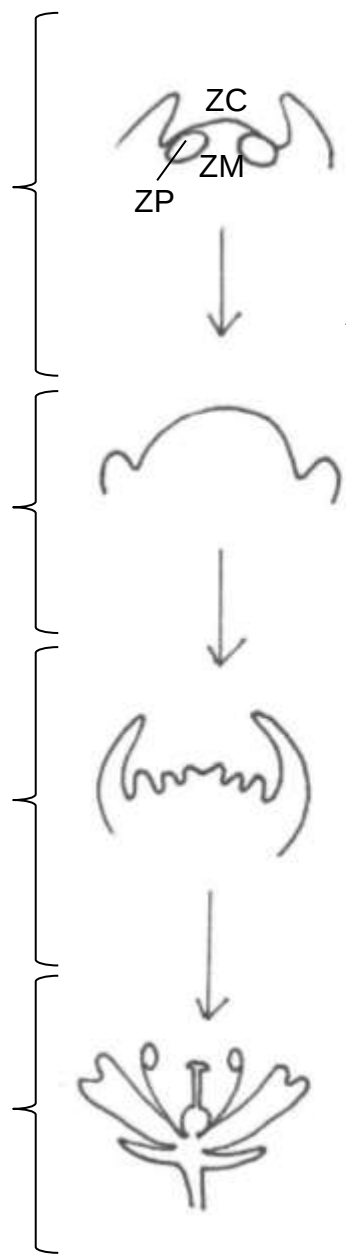


INDUCTION
FLORALE



INDUCTION
FLORALE

VIRAGE
FLORAL



vernalisation

photopériode

Facteurs
environnementaux

VIN3
VRN1
VRN2
FLC

PHYA
CRY2

*Gènes de la perception
de l'environnement*

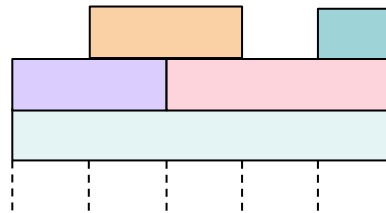
*Gènes de
l'horloge
circadienne*

Autres voies de
signalisation

FT

CO

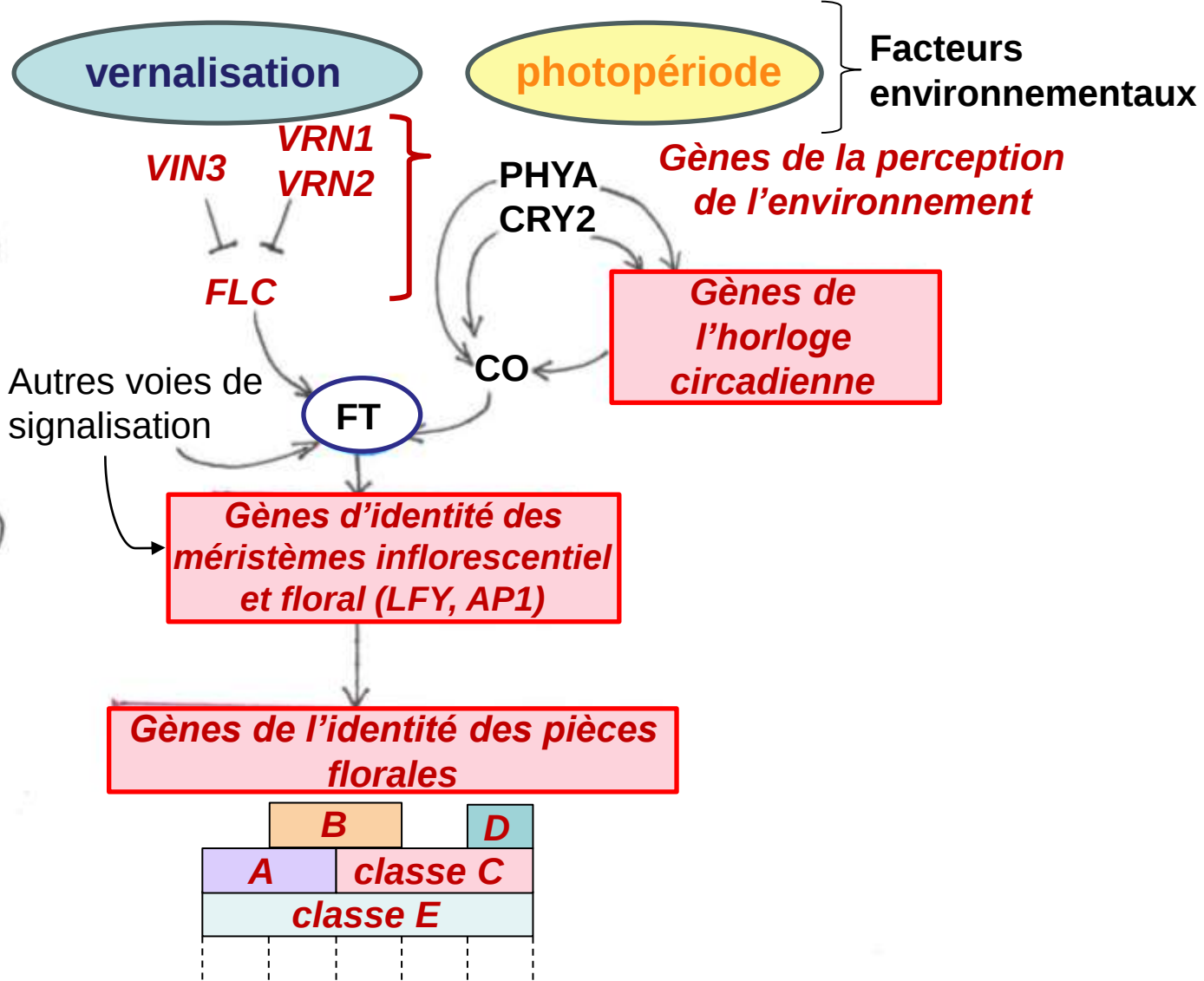
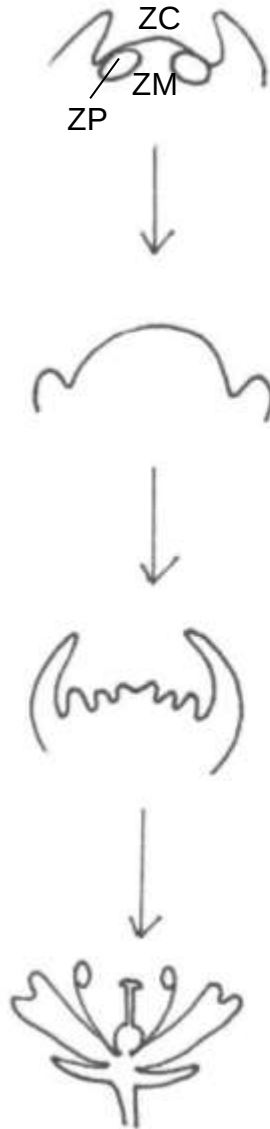
*Gènes d'identité des
méristèmes inflorescentiel
et floral (LFY, AP1)*



INDUCTION
FLORALE

VIRAGE
FLORAL

INITIATION
FLORALE



INDUCTION
FLORALE

VIRAGE
FLORAL

INITIATION
FLORALE

FLORAISON
SST

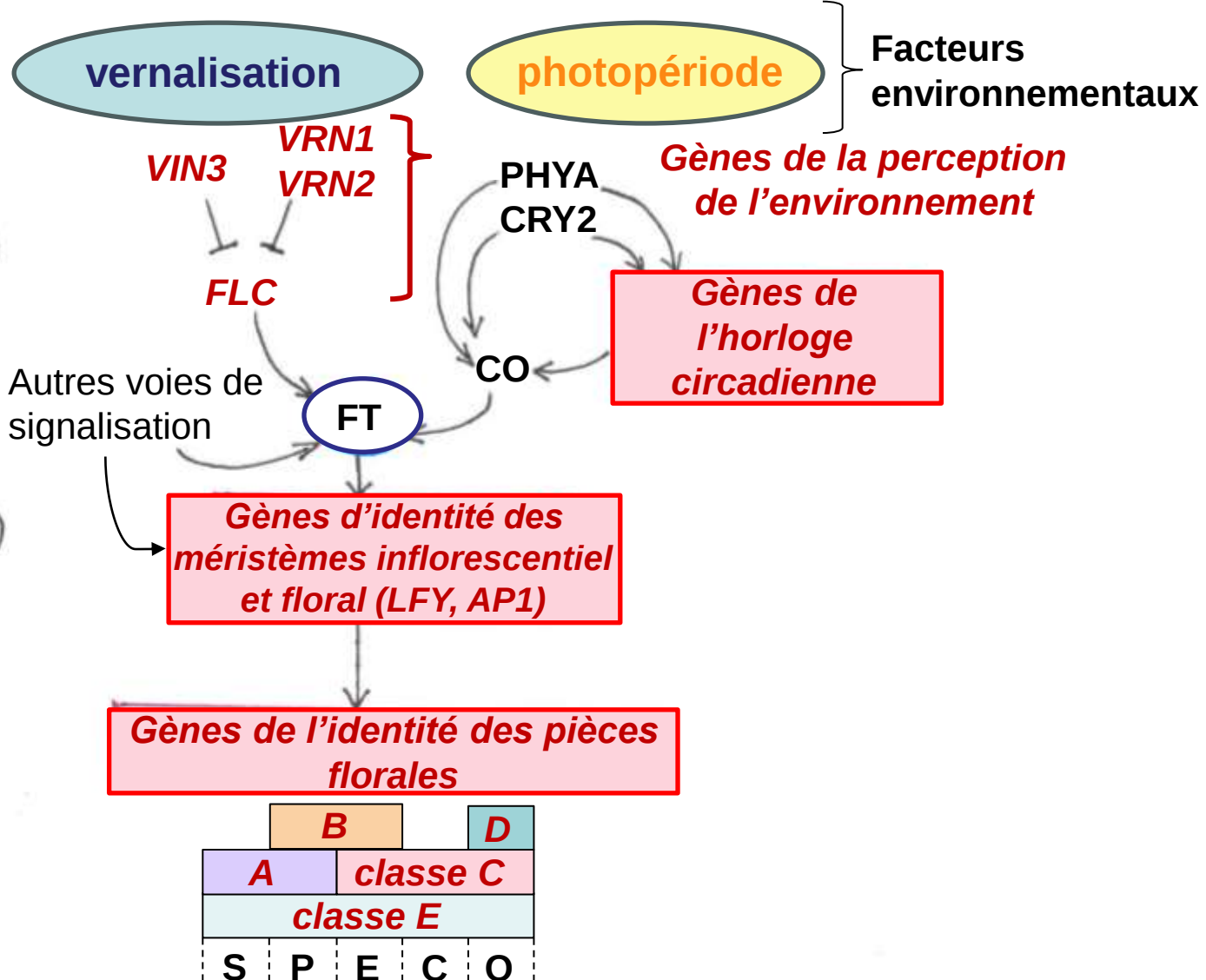
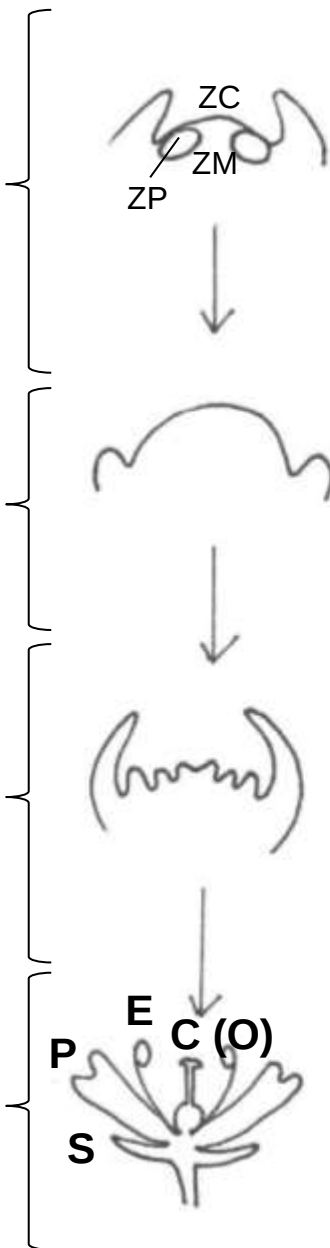


Schéma bilan :

Les étapes du passage à l'état reproducteur et leur contrôle