##### La sénescence végétale : le cas de la maturation des fruits

# Les différentes étapes de la vie d’un fruit

Les différentes s’organisent en quatre étapes principales :

* La naissance du fruit qui trouve son origine dans la fécondation de l’appareil reproducteur femelle par l’appareil reproducteur mâle. Le fruit est l’ovaire une fois que la fleur a été fécondée.
* La nouaison correspond à la première étape qui se manifeste d’une façon visuelle. C’est la première étape de l’apparition visible du fruit. Au niveau de l’appareil reproducteur femelle, le style a disparu. Il n’y a plus que l’ovaire. Il n’y a plus que la partie basale de l’appareil reproducteur femelle.
* La croissance pendant laquelle il y a des mitoses et des mécanismes d’auxèse. Les cellules accumulent des réserves, essentiellement composées de glucides. Cette étape est primordiale car la quantité de glucides accumulée va déterminer la qualité organoleptique du fruit. L’étape de croissance se déroulera d’autant mieux si des graines se développent à l’intérieur du fruit car elles synthétisent des hormones de croissance qui régulent la croissance du fruit. Lorsque qu’on supprime les graines à l’intérieur d’un fruit, sa croissance se fait moins bien. Il n’y a presque pas de synthèse d’auxines, de cytokinines et de gibbérellines par le fruit. Il existe un cas particulier, ce sont les fruits parthénocarpiques qui sont rares à l’état naturel. Dans ce cas-là, la synthèse d’auxines est faite au niveau du réceptacle floral, en remplacement de la synthèse habituellement réalisée par les graines. La croissance se déroulera d’autant mieux que la fécondation s’est déroulée dans de bonnes conditions. Plus le fruit se forme à partir d’une fleur correctement développée, relativement grosse, plus la croissance du fruit sera importante et le fruit aura un calibre important. Plus l’ovaire à l’origine du fruit contient un nombre de cellules important, plus la croissance du fruit est importante. La croissance du fruit dépend du développement et de la taille de la fleur à l’origine du fruit.
* La maturation est une étape pendant laquelle le fruit va subir un changement physiologique dans la composition du fruit. Il va passer d’un stade immature (couleur verte) à un stade mature (changement de couleur). Ce changement d’état se manifeste au niveau des réserves que le fruit a accumulé au stade de la croissance. Ces réserves vont évoluer et le fruit va acquérir de nouvelles propriétés. Cela va aboutir à un stade final qui est la maturité. C’est à ce stade là qu’il est le plus intéressant de les consommer. La maturation se poursuit au-delà de la maturité. Progressivement, les changements physiologiques vont le conduire jusqu’à la sénescence.
* La sénescence se solde par la chute du fruit et plus précisément vers la dégradation du fruit t la mort de cet organe qui conduit à la libération des graines pour l’apparition de nouveaux individus. Ce terme est utilisé lorsque la mort est le résultat de transformations programmées, qui ont leur origine dans le patrimoine génétique de la cellule. La sénescence est gouvernée par le génome, elle est donc gouvernée de l’intérieur. C’est la dernière phase du développement cellulaire. Cette évolution est naturelle. On utilise parfois un autre terme, on peut aussi parler de vieillissement.

Le vieillissement et la sénescence ne sont pas identiques au niveau des phénomènes physiologiques. Le vieillissement est un terme utilisé lorsque la mort est la conséquence de l’usure de la « machine vivante ». C’est une usure consécutive au milieu extérieur. Cette usure est subie par la cellule et non gouvernée par elle. Le vieillissement n’est pas inscrit dans le patrimoine génétique.

# Evolution du fruit au cours de la maturation

Au cours de l’étape de maturation, le fruit acquiert un ensemble de qualités qualifiées d’organoleptiques qui se manifestent par un ensemble de changements définis par des modifications métaboliques particulières.

Les qualités organoleptiques sont à peu près synonymes des qualités gustatives. Elles constituent un ensemble de sens du consommateur. Ce sont l’ensemble des propriétés d’un fruit en tant que stimulus des divers récepteurs sensoriels du consommateur, sollicités avant, pendant et après la consommation d’un fruit.

* Sensations visuelles
* Sensations olfactives
* Sensations tactiles (avant et pendant la dégustation)
* Sensations gustatives

Les principales modifications qui concourent à la définition des qualités organoleptiques d’un fruit sont :

* Changement de coloration
* Perte de la fermeté
* Augmentation de la teneur en sucres
* Diminution de l’acidité
* Expression des arômes (sensations gustative & olfactive)

## L’évolution des pigments

Quand un fruit est immature, il est de couleur verte. Les principaux pigments présents sont des pigments chlorophylliens. Ces pigments chlorophylliens permettent au fruit de faire la photosynthèse et d’accumuler des glucides pour la phase de croissance. La plante mère réalise aussi la photosynthèse et permet aussi l’accumulation de glucides dans les fruits.

Quand le fruit entre dans la phase de maturation, les pigments chlorophylliens finissent par disparaitre et sont remplacés. Les pigments sont localisés dans des chromoplastes quand il s’agit de pigments insolubles. Il s’agit essentiellement des caroténoïdes qui ont pour fonction principale de donner une couleur particulière (jaune, orangée, parfois rouge). Les pigments rouges peuvent être localisés dans les vacuoles, ce sont des pigments solubles. Ce sont principalement les anthocyanes qui sont caractéristiques des fruits rouges. Quand le pH du fruit est acide, le pigment est rouge. Quand le pH du fruit est basique, le pigment est bleu, violet. Les pigments rouges de la famille des caroténoïdes tirent plus vert l’orange et ceux de la famille des anthocyanes tirent plus vert le violet.

## La respiration et la production d’éthylène

Lorsqu’un fruit entre dans les processus de maturation, les pigments chlorophylliens disparaissent. Il n’y a plus de production d’énergie par le biais de la photosynthèse. La production d’énergie est liée au métabolisme respiratoire. L’activité respiratoire du fruit va généralement augmenter. On distingue deux catégories de fruits :

* Ceux pour lesquels l’activité respiratoire augmente de façon conséquente. Ce sont les fruits climactériques. Ils connaissent une crise respiratoire au moment de la maturation. Ils sont caractérisés par une intensification des échanges gazeux respiratoires. Il y a un rejet de CO2 et une consommation d’O2 en augmentation jusqu’à un maximum. C’est le maximum climactérique.   
  Crise respiratoire : pomme, poire, avocat, banane…  
  Il y a une transformation des glucides. Il y a un risque de fermentation en conservation. La production et l’émission d’éthylène sont importantes.
* Ceux pour lesquels l’activité respiratoire augmente lentement. Ce sont les fruits non climactériques. Il n’y a pas de crise respiratoire : cerise, orange, citron, essentiellement les agrumes… La synthèse d’éthylène est moins importante en général. Il y a peu de réaction à un apport exogène d’éthylène pour les fruits produisant peu d’éthylène. L’éthylène est une hormone peu déterminante dans la maturation.

*Voir poly, diapos 3 & 4*

**Courbe :**

Quand un fruit entre dans le processus de maturation, pendant un certain temps, il ne synthétise pas d’éthylène et n’est pas sensible à un apport exogène. C’est ce que l’on constate jusqu’au point A. c’est un stade d’insensibilité à l’éthylène. Ensuite le fruit ne synthétise toujours pas d’éthylène mais il devient sensible à un apport exogène. C’est ce que l’on constate jusqu’au point B. ces phénomènes sont constatés chez tous les fruits. C’est le système de régulation I. à partir du stade B, les fruits synthétisent un peu d’éthylène. A partir du stade C, on rentre dans une phase devenant progressivement exponentielle. Le fruit se met à synthétiser de plus en plus ‘éthylène. Le point D correspond au fait que plus le fruit synthétise de l’éthylène, plus il y est sensible. Le point D correspond au système de régulation II. On observe cela seulement chez les fruits climactériques. Le point D est un point autocatalytique. Le sommet de la courbe correspond au seuil de la crise respiratoire.

On connait les gènes qui codent pour chacune de ses étapes de la synthèse de l’éthylène, en particulier chez la tomate et chez l’avocat.

**Tableau :**

Echaudure : tâches au niveau de l’épiderme du fruit qui devient plus sensible aux chocs, aux meurtrissures

La crise climactérique se manifeste par une augmentation de l’activité respiratoire et de la synthèse de l’éthylène. En même temps que la synthèse de l’éthylène, il y a une synthèse de l’acide abscissique. Cependant, il y a une diminution des auxines et des cytokinines qui interviennent dans la phase de croissance pour stimuler les mécanismes d’auxèse.

## L’évolution des constituants organiques

Les constituants organiques accumulés pendant la phase de croissance vont évoluer pendant la phase de maturation. Ce sont essentiellement les sucres et les acides présents dans la pulpe, la chair du fruit.

*Voir poly, diapo 5*

**Courbe :**

Pendant la phase de croissance, la photosynthèse permet au fruit d’accumuler des sucres sous forme d’amidon. Il y a donc une augmentation de la teneur en amidon pendant la phase d’auxèse. Ensuite la teneur en amidon diminue car il est transformé en sucres simples au cours de la maturation. C’est l’une des premières manifestations de l’évolution des composés organiques. Les sucres simples sont essentiellement le saccharose, le fructose et le glucose. La courbe des sucres totaux augmentent donc quand l’hydrolyse de l’amidon a lieu.

L’acide malique est l’acide le plus souvent présent chez les fruits. Il est très abondant chez les pommes. On a de l’acide citrique chez les agrumes. Chez les fruits rouges et les cerises, on a de l’acide tartrique. L’acidité augmente pendant la phase de croissance. Tant qu’un fruit est vert il est acide. Pendant la phase de maturation, l’acidité diminue et le fruit prend une saveur plus agréable. Après avoir atteint un maximum, la teneur en acide malique diminue progressivement jusqu’à la sénescence du fruit.

## L’émission de substances aromatiques volatiles

Presque toutes les substances aromatiques sont volatiles. Elles sont le plus souvent ressenties de manière olfactive. Elles correspondent à des esters, des alcools ou des aldéhydes. Ils sont libérés au fur et à mesure que le fruit arrive à maturité. Ces substances aromatiques se libèrent dans l’atmosphère pendant la phase de maturation. Ce sont souvent des composés assez complexes et difficiles à doser lorsque l’on veut quantifier les émissions aromatiques.

## La synthèse des protéines enzymatiques

Les fruits, au moment de l’étape de maturation, sont le siège d’une synthèse enzymatique très importante. Ces synthèses enzymatiques servent à hydrolyser l’amidon pour obtenir des sucres simples. Ce sont donc des hydrolases. Ce sont aussi des enzymes qui vont coder à l’expression des voies métaboliques conduisant à la synthèse d’éthylène, à la dégradation de la chlorophylle, à la perte de fermeté…etc.

## La perte de fermeté

Les enzymes intervenant dans la diminution de la fermeté détruisent la paroi squelettique des cellules. Ce sont des enzymes appartenant à la famille des cellulases et des pectinases. Le fruit devient moins dur car les parois squelettiques des cellules le composant commencent à se décomposer.

## La diminution des composés phénoliques

On s’approche de l’étape de dégradation et de sénescence. Les composés phénoliques qui disparaissent sont essentiellement présents dans la peau du fruit. Ce sont essentiellement des tanins qui servent à éloigner les herbivores et les attaques des microorganismes. Ils permettent aux fruits de lutter contre les infections pouvant faire pourrir le fruit. Les tanins ont généralement une saveur astringente « décourageant » les prédateurs herbivores. Ce sont des composés protecteurs. Quand il n’y a plus de tanins, le fruit risque de pourrir. Le fruit va donc pouvoir libérer ses graines. Cependant la perte des tanins est un désavantage pour la conservation des fruits.

## La transpiration

Il y a une évolution des mécanismes de transpiration (pertes en eau) au cours de la maturation, essentiellement si le fruit est cueilli quand le fruit n’a pas totalement achevé sa maturité. Pour des questions de manutention des fruits, de transport, de mise sur le marché… il arrive que les fruits soient cueillis alors qu’ils sont relativement immatures. Le fruit est donc séparé de la plante mère et il n’est plus approvisionné en eau mais il reste un organe vivant et va continuer à avoir une activité métabolique et à transpirer. Il perd donc de l’eau sans pouvoir se réhydrater. Un fruit cueilli avant maturité se trouve en état de stress hydrique. Il va donc se flétrir. La transpiration est un processus métabolique qui va évoluer uniquement pour les fruits qui sont cueillis avant maturité.

# Le contrôle génétique de la maturation

## Les gènes de maturation

Les différents types de gènes qui contrôlent la maturation chez les fruits ont été identifiés chez certains fruits. Ils dépendent du génome de l’individu ou du génome d’une variété ou d’une espèce. Il y a des modèles qui ont été particulièrement bien étudiés. Le modèle le plus étudié est celui de la tomate.

*Voir poly diapo 2 p.4*

Chez la tomate, il y a une centaine de fruits qui codent pour la maturation du fruit. Parmi cette centaine de gènes, il y en a six qui ont été beaucoup étudiés et qui sont intéressants.

Les quatre premiers sont des gènes avec des effets pléiotropiques, ils peuvent avoir plusieurs manifestations sur le fruit. Ces gènes multiplient la vie du fruit après cueillette. Ils contrôlent l’apparition de la chlorophylle, la couleur finale du fruit et l’activité de la polygalacturonase. On parle en plus de gènes mutants car quand certaines variétés expriment ou n’expriment pas ce gène, on parle de mutant.

Les deux derniers gènes sont des gènes qui influent sur un seul type de contrôle. Ils contrôlent la destruction ou non de la chlorophylle ou la couleur finale du fruit.

Le gène alc a des effets multiples mais il peut avoir un intérêt sur la modification des variétés de tomate car il permet d’augmenter la durée de vie après la cueillette. La chair est beaucoup plus ferme. Ce gène est particulièrement intéressant par rapport aux manipulations en génie génétique.

Un autre fruit a été beaucoup étudié, c’est l’avocat. L’avocat a six gènes de cellulases. Ces gènes codent pour la fermeté de l’avocat.

## La transformation du génome

**Déclencher la maturation des fruits à volonté**

* Contrôler l’amollissement de la chair  
  Hydrolyse des pectines liées à l’expression des polygalacturonases et des cellulases
* Contrôler la synthèse d’éthylène  
  Bloquer la synthèse d’éthylène puis déclencher la maturation au moment opportun par apport d’éthylène exogène

**Bloquer la synthèse de l’éthylène**

*Voir poly diapo1 p.5*

La synthèse d’éthylène se fait à partir d’un acide aminé (méthionine). Pour passer de la méthionine à l’éthylène, il y a deux intermédiaires : la SAM (dérivé de la méthionine) et l’ACC (acide).

Il y a deux façons de bloquer la synthèse de l’éthylène :

* En utilisant un gène antisens qui va bloquer l’expression de l’enzyme permettant de passer de la SAM à l’ACC. Si la synthèse de l’ACC est bloquée, l’émission d’éthylène est bloquée.   
  On obtient une production d’éthylène nulle, un fruit vert (synthèse lycopène non initiée). Ces OGM sont sensibles à un apport exogène d’éthylène.
* On peut aussi introduire un gène bactérien que l’on fait intervenir sur l’ACC. On supprime alors le radical NH2 (ACC désaminase), on va donc obtenir une autre molécule que l’éthylène. Il n’y aura donc pas de maturation du fruit.   
  Les OGM obtenus ont une réduction de la production d’éthylène. La synthèse d’éthylène n’est pas bloquée mais fortement réduite (> 90%). Il n’y a pas de modifications phénotypiques de l’OGM obtenu. Ces OGM sont sensibles à un apport exogène d’éthylène. Ces OGM reste ferme plus longtemps (fermeté prolongée de 6 semaines).

# La conservation après récolte

Une fois que le fruit a été récolté, il est privé de la plante mère. Il n’est plus alimenté en eau, en minéraux, en éléments nutritifs, en sucres… mais cependant il reste vivant pendant un certain temps.

**Physiologie du fruit après récolte**

* Tissus vivants
* Cueillette 🡪 fruit privé des apports de la plante mère : eau glucides, sels minéraux autres métabolites et hormones  
  🡺 perte de poids

**Les enjeux de la conservation après récolte**

* Acquérir ou conserver une qualité compatible avec la commercialisation dans des conditions économiques acceptables

###### Circuits de commercialisation complexes

* + Développement des transports à l’échelle mondiale
  + Concurrence entre pays producteurs
  + Contraintes imposées par la grande distribution
* Acquérir et conserver la meilleure qualité possible, à l’issue des transports et des traitements nécessaires à la commercialisation

**Durée de vie verte DVV**

* Récolte des bananes au stade vert puis stockage
* Pendant le stockage : bananes vertes, fermes, aucun changement significatif de la couleur de la peau, de la texture, de la composition du fruit… jusqu’à ce que le fruit commence à mûrir
* Vie verte = stade préclimactérique

**Les critères de qualité commerciale**

* Qualité organoleptique
* Qualité nutritionnelle ou diététique : teneur en eau, vitamines, fibres…
* Qualité sanitaire : absence de résidus de pesticides, antioxydants…

Il y a des limites maximales sur l’utilisation des produits chimiques et phytosanitaires.

**Appréciation objective de la qualité**

###### Enquêtes consommateurs

* Analyses physico-chimiques : teneur en sucres, acidité, résidus de pesticides, couleur, calibre, texture de la chair…
* Tests à la cueillette : définir si les probabilités d’une bonne qualité sont assez élevées pour justifier la conservation (arboriculture et agronomie)

Critères visuels : calibre, forme, couleur

Critères physico-chimiques : fermeté (pénétromètre), taux de sucres (réfractomètre = degré Brix), acidité (pH), test amidon, dosage composés aromatiques

Technologie = robot pimprenelle 🡪 chacun des fruits est évalué et mesuré. Ils sont pesés (calibre). Ils sont pressés pour récolter le jus ramené au poids (jutosité).

**Les procédés de conservation**

* Conservation en fruitier ventilé : procédé « artisanal »
* Conservation en chambre froide : procédé le plus employé
* Conservation en atmosphère contrôlée : procédé qui garantit la plus longue durée de conservation