



Super
KIMY

LE POUVOIR DES PLANTES

Comme nous l'avons déjà vu à l'occasion de l'étude de la pervenche de Madagascar, de nombreuses molécules d'origine végétale sont utilisées dans les industries pharmaceutique et cosmétique. Depuis la découverte d'anticancéreux d'origine végétale, de plus en plus de principes actifs ont été découverts à partir de plantes rares ou protégées. Mais les principes actifs (voir la définition dans le thème « Pervenche »), tels que les substances anticancéreuses, sont des molécules complexes difficiles à synthétiser chimiquement et dont la production par extraction reste faible.

Cet inconvénient majeur a été mis en évidence lors de l'extraction des principes actifs de la pervenche, la vinblastine et la vincristine. Le Taxol® (Fig 1a), remarquablement efficace contre les cancers de l'ovaire, du sein et du poumon en est une autre illustration. En effet il faut 10 kg d'écorces d'if du Pacifique (*Taxus Brevifolia*, une espèce rare) donc sacrifier 3 ifs de 150 ans pour obtenir 1 g de Taxol® nécessaire au traitement d'un patient pendant un an ! Un tel scénario conduirait à la destruction des forêts d'ifs du Pacifique. Par chance, une autre solution a été rendue possible grâce à la découverte d'un analogue du Taxol®, le Taxotère® (fig 1b). Celui-ci a été synthétisé à partir du principe actif extrait des aiguilles d'if commun, le *Taxus Baccata* par des équipes françaises dirigées par Pierre Potier à l'Institut de Chimie des Substances Naturelles. La synthèse demeure néanmoins longue et coûteuse.

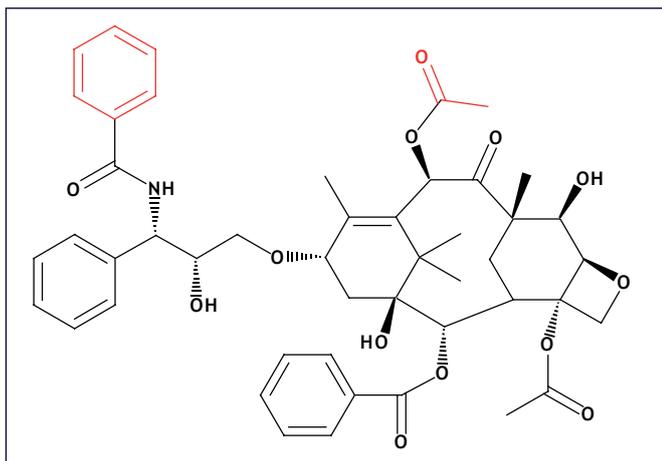


Fig. 1a - Taxol®

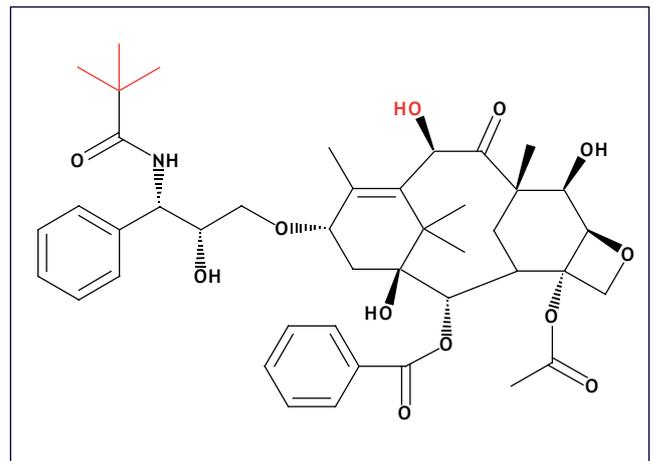


Fig. 1b - Taxotère®

Depuis quelques années, les recherches se sont orientées vers des techniques plus économiques, telles que l'exploitation in vitro de cellules ou d'organes végétaux. On cultive dans des bio-réacteurs des racines manipulées génétiquement pour produire des métabolites en grande quantité. Cependant les coûts d'infrastructure demeurent très élevés, et il est difficile de conserver des conditions de parfaite stérilité en développant cette technique à l'échelle industrielle.

C'est pourquoi deux biologistes de l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), Eric Gontier et Frédéric Bourgaud, ont imaginé une technique plus rapide de culture des plantes entières en conditions hors-sol : c'est la **culture hydroponique**. Elle consiste à cultiver les végétaux en milieu liquide et à faire extraire des racines les substances bio-actives, appelées « **métabolites secondaires** » dans le milieu nutritif. *Un métabolite secondaire est une molécule que produisent les organismes en dehors des voies métaboliques strictement nécessaires à assurer la survie (on parle de métabolisme primaire dans ce cas).*

Cette technique ne se limite pas à l'if. Elle s'applique à d'autres plantes comme l'edelweiss, la rue des jardins, la datura ou la garance qui contiennent des substances actives, telles que des alcaloïdes (voir fiche pervenche) ou des flavonoïdes, servant de colorants en cosmétique.





Fig. 2a - Edelweiss

Avec l'aimable autorisation de Thomas Gasser



Fig. 2b - Rue



Fig. 2c - Datura



Fig. 2d - Garance

Avec l'aimable autorisation du site lepetitjardinier.net



Fig. 2e - If

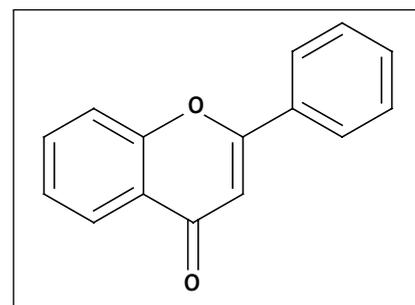


Fig. 2f - Squelette de flavonoïde

Les métabolites secondaires sont des molécules de défense qui éloignent les prédateurs ou inhibent la croissance des plantes concurrentes. Elles ne sont pas strictement nécessaires à la survie de la plante qui les synthétise en général en très petite quantité. La plante augmente leur production lorsqu'elle est agressée par un insecte, une bactérie ou un champignon, ou sous l'effet de conditions physiques hostiles telles qu'une élévation de température.

Ce procédé a été appelé « plantes à traire ». Il concerne une vingtaine de substances et a été breveté.

COMMENT TRAIRE UNE PLANTE ?

PRINCIPE DU PROCÉDE

Le système « Plantes à traire » (PAT) est une nouvelle technologie de production de métabolites secondaires à haute valeur ajoutée, (destinés au marché pharmaceutique et dermo-cosmétique) inventée au « Laboratoire Agronomie et Environnement » (LAE). Cette technologie repose sur la **récolte non destructrice de métabolites végétaux** à partir de plantes cultivées en hydroponie et pour lesquelles on obtient une excrétion de métabolites à partir des racines.

PRODUCTION DES MÉTABOLITES SECONDAIRES

Dans une première étape, la plante est cultivée sur un milieu liquide suivant une technique couramment utilisée pour faire pousser tomates et concombres. Les racines, dont les extrémités trempent dans l'eau, sont régulièrement irriguées avec une solution nutritive composée d'eau et d'éléments minéraux. L'hydroponie présente un double avantage sur la culture en terre : elle permet de doser avec précision les éléments nécessaires à la croissance de la plante et de la protéger des parasites présents dans le sol. On stimule ensuite la production des métabolites secondaires. Deux techniques complémentaires sont employées :

- **L'éliciteur** : on introduit dans la solution nutritive des extraits d'insectes ou de champignons pathogènes qui vont simuler l'attaque d'un parasite. L'éliciteur se fixe sur un récepteur situé sur la paroi de la cellule végétale et va ainsi déclencher une cascade d'événements conduisant à la production de métabolites secondaires. Les éliciteurs multiplient le rendement par six.

- **Les précurseurs** : ce sont des acides aminés qui, introduits dans la solution nutritive, sont absorbés par les racines et les nourrissent.

La combinaison des deux techniques permet de multiplier par huit le rendement de fabrication de métabolites secondaires qui sont stockés dans les différents tissus de la racine.

La figure 3 ci-dessous présente le processus :

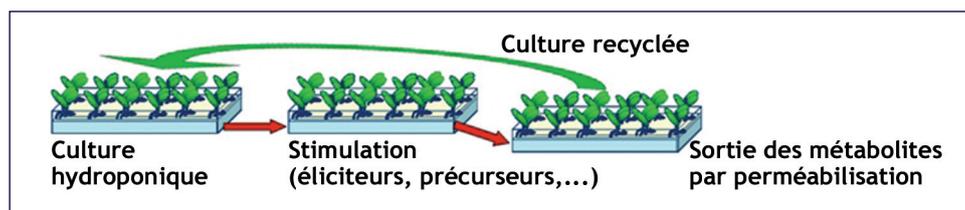


Fig. 3 - Processus de production des métabolites

EXTRACTION DES METABOLITES SECONDAIRES

La deuxième étape, qui fait toute l'originalité du procédé, est la **traite**, ou récupération des métabolites secondaires. L'excrétion est obtenue naturellement chez certaines plantes. La solution nutritive qui contient un grand nombre d'agents chimiques est remplacée par de l'eau. Progressivement, les racines libèrent les métabolites secondaires dans l'eau. Dans d'autres cas, l'excrétion doit être forcée par des moyens chimiques (ajout de tensioactifs) ou physiques (ultra-sons, élévation de température). Ainsi, l'ajout de tensioactifs dans la solution nutritive rend les parois des racines perméables en augmentant la différence de pression entre l'intérieur de la cellule et le milieu nutritif et permet de récupérer de 20 à 80 % des métabolites secondaires contenus dans les racines.

Les méthodes classiques de la chimie organique sont utilisées pour isoler les métabolites du milieu : extraction par un solvant, chromatographie... La figure 4 présente l'ensemble du processus de production pilote développé par l'équipe de Nancy.

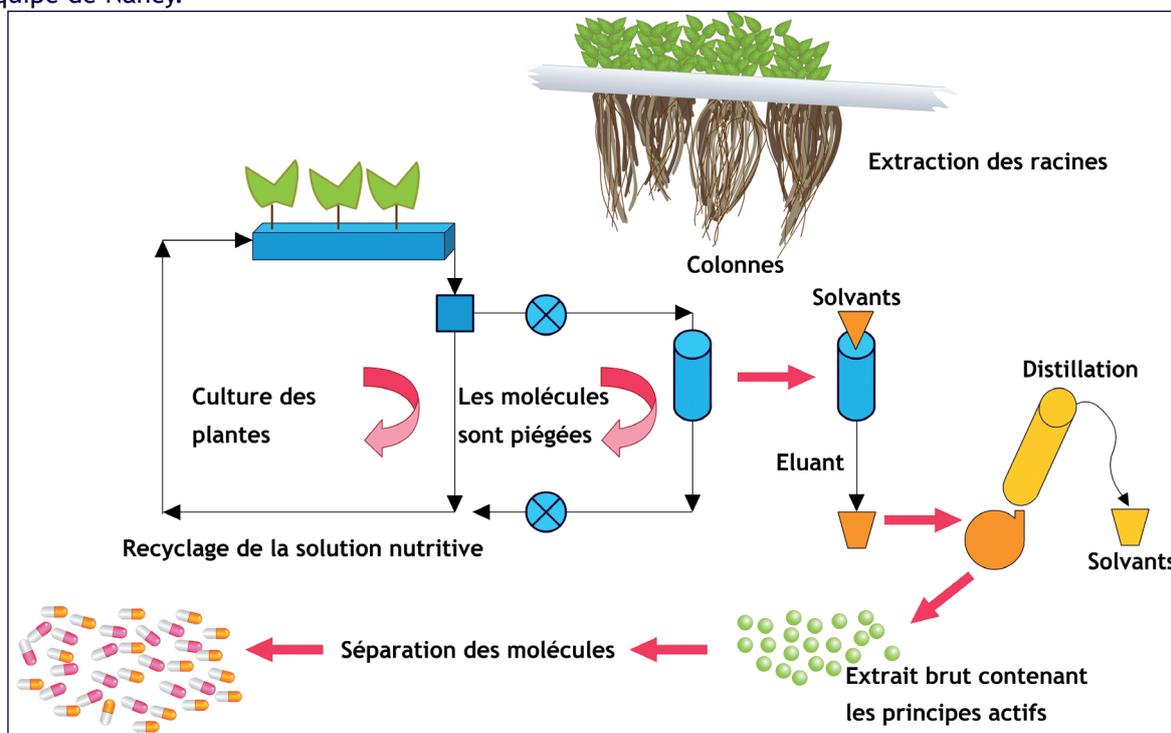


Fig. 4 - Processus de production pilote développé par l'équipe de Nancy

La plante continue de pousser et, un mois plus tard, on peut renouveler le même processus d'élicitation et de perméabilisation puis de traite.

QUELS RESULTATS ?

Dans le cas de *Datura innoxia* (psychotrope), la traite permet d'obtenir trois fois plus de métabolites secondaires en un an que l'extraction à partir de champs cultivés, à surfaces égales. Les alcaloïdes extraits, l'hyoscyamine et la scopolamine, présentent différentes activités, notamment pour tonifier le cœur et dilater la pupille.

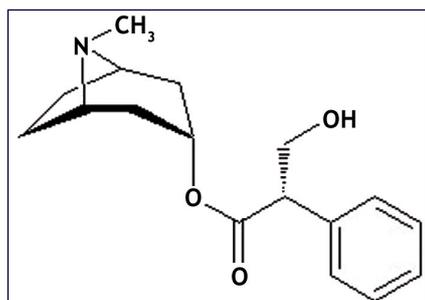


Fig. 5a - Hyoscyamine

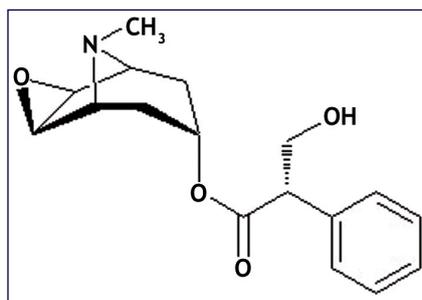


Fig. 5b - Scopolamine

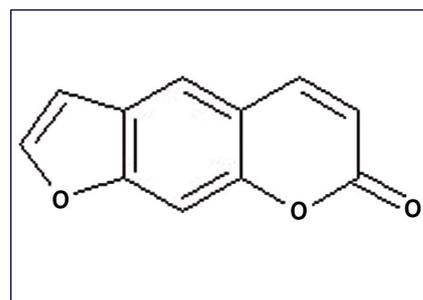


Fig. 5c - Psolarène

De bons résultats ont également été obtenus avec la ruta graveoleons (la rue des jardins, à vertus toniques et stimulantes) qui contient des furocoumarines (psolarène), utilisées dans le traitement de l'eczéma et du psoriasis et avec l'edelweiss (propriétés anti-inflammatoires), riche en antioxydants comme les flavonoïdes. Ce procédé permet également de produire du Taxol®.

L'étude des « **plantes à traire** » montre l'intérêt de la recherche fondamentale et met en évidence un exemple de collaboration fructueuse entre laboratoires publics et privés.

CETTE TECHNOLOGIE OFFRE DE NOMBREUX AVANTAGES :

- Accès aux molécules présentes dans les racines, difficilement accessibles par culture traditionnelle.
- Préservation de la ressource végétale puisque le procédé n'est pas destructeur.
- Utilisation des systèmes de culture en serre, déjà existants.

PROPOSITIONS D'EXPERIENCES SUR LE POUVOIR DES PLANTES

On illustre le thème du fonctionnement du vivant, et en particulier les conditions de développement des végétaux, ainsi que leur adaptation aux conditions du milieu. On montre également comment les végétaux peuvent fournir des médicaments naturels bénéfiques pour la santé de l'homme.

Les échanges transcrits ci-dessous, entre le professeur P et ses élèves E, sont donnés à titre indicatif pour illustrer les étapes possibles du travail de classe et pourront être adaptés si nécessaire à l'âge et au niveau de connaissance des élèves.

Remarque : on a écrit en italique les notions que le professeur peut aborder, sans toutefois que les connaissances et le vocabulaire spécifique correspondant soient à maîtriser et à retenir par les élèves.

I - MATERIEL REQUIS :

- divers échantillons de sols apportés par les élèves,
- deux plants de tomate, deux pots de fleurs, de la terre de jardin, un substrat, une solution nutritive,
- échantillons de branches d'if,
- du café en poudre, un sachet de thé, un filtre à café et son support, une tasse à café, une tasse à thé, une casserole d'eau,
- un saladier, 5 aiguilles à coudre, du papier à cigarette, du poivre (ou du safran) moulu, un morceau de sucre,
- une reproduction du schéma du cycle de l'azote,
- une reproduction de la culture hydroponique de tomates,
- une reproduction d'un caféier et d'un théier (Wikipedia),
- le tableau des teneurs en azote, phosphore et potassium dans différents types d'engrais,
- le tableau de la teneur en caféine de différents produits végétaux,
- organisation par le professeur de la visite d'une jardinerie pour y découvrir les plantations hors sol et les divers substrats qui y sont utilisés. Si impossible, le professeur invitera les élèves à faire la visite par eux-mêmes.

II - CONNAISSANCES ABORDEES

- Conditions de développement des végétaux.
- Le cycle de l'azote.
- La culture hors sol ou *hydroponie*.
- *L'extraction de médicaments à partir de plantes.*
- Les propriétés des tensioactifs.

DUREE APPROXIMATIVE DE LA SEANCE COMPLETE : 1H30 À 2H

I - LE SOL. SES PROPRIETES. SON ENRICHISSEMENT

On illustre essentiellement les conditions de développement des végétaux. Le cycle de l'azote est abordé.

P : comment fait-on pousser une plante ?

E : on fait un trou dans la terre du jardin ou d'un pot dans lequel on met le plant, par exemple un plant de tomate, de salade ou de cerisier. On recouvre les racines avec la terre et souvent on ajoute un engrais. On arrose

régulièrement.

P : faites donc vous-mêmes cette plantation chez vous en choisissant la plante que vous souhaitez faire pousser.

P : recherchez dans le dictionnaire ce qu'est la terre ou plutôt le sol (en agriculture).

E : le sol ou terre arable est la couche terrestre superficielle qui est propre à la culture des plantes.

P : de quoi est composé le sol ?

E : réponses diverses.

P : le sol contient différents composants grâce auxquels la vie végétale est possible. Les racines des plantes absorbent les matières minérales et organiques nécessaires à leur développement. En questionnant votre environnement et en vous rappelant ce qui est nécessaire à la vie d'un être humain, quels sont les éléments essentiels à la vie d'une plante ?

E : l'eau.

P : oui mais aussi les éléments minéraux : calcium, azote, phosphore, potassium, des oligo-éléments et enfin de l'oxygène. Quel est le rôle de l'oxygène ?

E : réponses diverses.

P : comme pour les humains, l'oxygène permet aux racines et aux feuilles de respirer. Quels sont les autres facteurs importants pour le développement d'une plante ? (se référer à la vie humaine).

E : la température et la lumière.

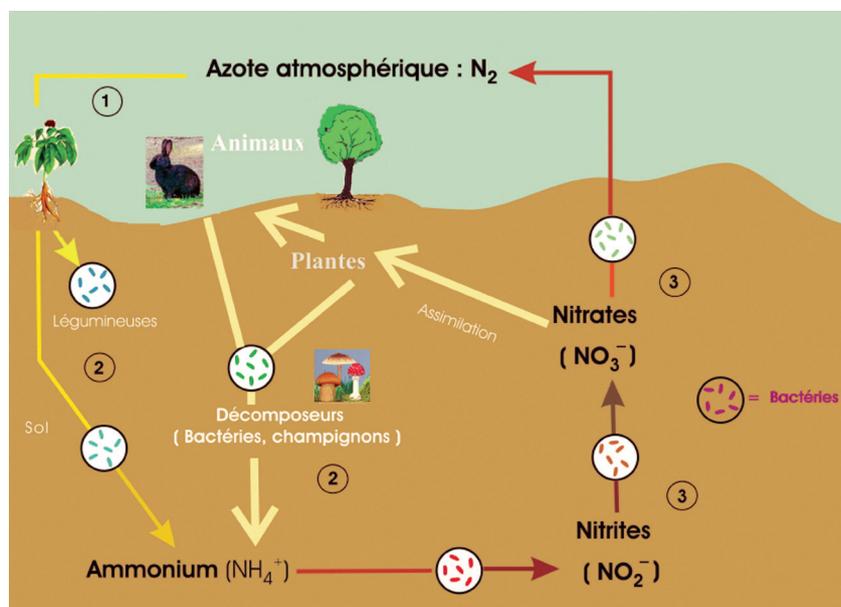
P : que se passe-t-il si la plante est mise dans un pot ou une jardinière ?

E : réponses diverses.

P : A mesure que le temps passe, la terre se tasse et peut étouffer les racines qui se sont développées dans le pot. La terre s'appauvrit en éléments nutritifs et les extrémités des racines vont mourir. Le cycle biologique ne se fait plus ! C'est ce que vous pourrez observer dans votre plantation au bout de quelques semaines.

Un exemple de cycle biologique est celui du **cycle de l'azote**, essentiel à la vie. *L'azote est indispensable à la formation des protéines. Ces protéines sont des molécules nécessaires, car ce sont les agents actifs de l'organisme. L'homme, comme les animaux, se les procure par l'alimentation ; il n'en va pas de même pour les végétaux. Or si ceux-ci sont capables grâce à la photosynthèse de capter le CO₂ atmosphérique, il n'en est pas de même pour l'azote. L'azote est sous forme de diazote N₂ très stable et n'est pas assimilable par les plantes. Celles-ci ne sont capables d'absorber l'azote que sous deux formes chimiques : les ions ammonium (NH₄⁺) et nitrate (NO₃⁻).*

P : essayez de décrire à partir du schéma les étapes du cycle de l'azote.



E : diverses réponses.

P : sur le schéma présenté, on voit apparaître 3 sources d'ions ammonium :

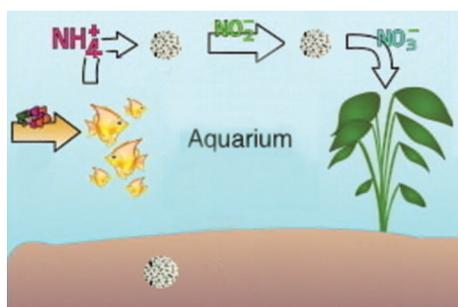
1 - L'azote de l'air est absorbé par des bactéries dans le sol grâce à une enzyme appelée la nitrogénase. Elles produisent des ions ammonium à partir de l'azote et de l'hydrogène de l'eau contenue dans le sol.

2 - Certaines de ces bactéries vivent en symbiose avec les plantes produisant également des ions ammonium. Ces derniers peuvent aussi provenir de la décomposition d'organismes morts par des bactéries.

3 - Dans les sols bien oxygénés, des bactéries transforment les ions ammonium NH_4^+ en nitrites NO_2^- puis en nitrates NO_3^- .

Grâce à leurs racines, les végétaux absorbent les nitrates et les incorporent dans les acides aminés et les protéines. Les végétaux constituent ainsi la source primaire d'azote assimilable par les animaux.

On retrouve le cycle de l'azote dans l'équilibre d'un aquarium.



P : malheureusement tous les sols ne sont pas fertiles. Citez différentes catégories de terre que vous connaissez. Rapportez les échantillons variés de sol que vous trouvez.

E : la terre du jardin.

P : comment rendre une terre fertile ?

E : en ajoutant des engrais.

P : bien. Connaissez-vous des engrais ?

E : diverses réponses : « or brun », fumier.

P : bien. D'autres engrais naturels proviennent des algues, du compost qui est le produit de la décomposition des végétaux. D'après ce qui a été dit précédemment sur les besoins des plantes, que doit contenir un engrais ?

E : azote, potassium, phosphore.

P : oui. Voici un tableau donnant les quantités en pourcentage de chaque élément azote N, phosphore P, potassium K, dans différents types d'engrais. Que constatez-vous ?

Engrais	Fumier de vache	Fumier de cheval	Fumier de porc	Fumier de poule	Fumier de mouton	Fumier de lapin	Guano	Cendres de bois	Os	Farine de poisson
% azote	4	6	4	23	8	24	10	0	4	9
% phosphore	1	1	1	10	1	5	13	1	20	12
% potassium	4	5	5	17	7	0,5	2	10	0	4

E : réponses variées.

P : on voit que les différents engrais naturels présentent des pourcentages très variés des éléments essentiels N (azote), K (potassium), P (phosphore). Dans le cycle de l'azote, on voit apparaître le mot nitrate. Avez-vous déjà entendu ce mot ?

E : diverses réponses.

P : pour ceux qui ont répondu que ce sont des polluants ou qu'ils fabriquent des algues vertes sur les plages en Bretagne, vous avez raison. En effet, l'excès de nitrates est mauvais, non seulement pour l'homme mais aussi pour la nature : il provoque le développement anarchique de certaines plantes comme les algues vertes. Il est donc primordial de bien doser la quantité d'engrais strictement nécessaire. Le sol se comporte exactement comme un être humain : quand on le nourrit trop, il rejette l'excès de nourriture.

II - LES CULTURES HYDROPONIQUES ET LA PRODUCTION DE MEDICAMENTS

On montre comment les végétaux peuvent fournir des médicaments naturels bénéfiques pour la santé de l'homme.

On va tout d'abord discuter de la possibilité de cultiver les plantes sans terre.

P : L'existence de terres peu fertiles a conduit à développer des cultures sans terre ou hors sol depuis l'Antiquité. Les jardins suspendus de Babylone en sont un exemple. Les chinois utilisent encore des techniques millénaires sur gravier.

La culture hors sol moderne est née en Allemagne au XIX^e siècle dans le cadre de la recherche universitaire afin de découvrir de quoi se nourrissaient les plantes. Pour cela il fallait mettre en place un processus de culture sans terre sur des supports inertes dans lesquels les racines sont nourries par les sels minéraux apportés par l'eau de l'arrosage. Ainsi naquit l'hydroponie (du grec hudôr = eau et ponos = travail, peine, fruit du travail).

A l'heure actuelle, la culture hors sol est pratiquée en agriculture sur des millions d'hectares dans le monde. Recherchez auprès de votre entourage des exemples de culture hors sol.

E : les tomates, les concombres, les poivrons, les carottes... cultivés en serre.

P : oui. C'est aussi le cas de la majorité des fleurs coupées.

P : d'après ce qui a été dit précédemment, de quoi a-t-on besoin pour faire de la culture hors sol ?

E : réponses variées.

P : d'un support et d'une solution aqueuse contenant des sels minéraux ; il faut également une température convenable et de la lumière. Nous allons (ou vous allez) nous rendre dans une jardinerie pour connaître les différents types de substrats et en faire la liste.

E : le substrat doit être neutre. Ce peut être des billes d'argile, du sable ou de la laine de roche, de la perlite qui ressemble à la litière pour chats, des fibres de coco fabriquées à partir de l'écorce de noix de coco. La solution nutritive est ajoutée par un système de goutte-à-goutte ou en continu.

P : (en début d'année). Apporter 2 plants de tomate, 2 pots remplis de terre, un substrat et une solution nutritive. Faire pousser les 2 plants et observer la différence de croissance des plants de tomates dans la terre et en hydroponie tout au long de l'année. Quels sont les avantages du système hydroponique ?

Le schéma ci-dessous montre la culture hydroponique de tomates.



Certaines plantes sont cultivées en hydroponie pour « extraire » des médicaments de leurs racines. C'est le cas de l'if.

P : recherchez les ifs dans votre environnement et en rapporter des échantillons. Décrire l'arbuste.

E : tiges avec des épines et des baies rouges.

P : savez-vous ce que signifie le terme extraction ? Connaissez-vous des exemples d'extraction ?

E : exemple d'extraction d'une dent, d'une balle ?

P : oui, mais on extrait aussi le charbon des mines, le pétrole de la terre. Dans la vie quotidienne, on pratique couramment l'« extraction » du café ou du thé.

Faire l'expérience suivante : un groupe d'élèves met à chauffer dans une casserole de l'eau avec de la poudre de café. Après quelques minutes à l'ébullition, filtrer le mélange sur un filtre à café. Un autre groupe trempe un sachet de thé dans un verre d'eau chaude puis après quelques minutes enlève le sachet.

Que constatez-vous ?

E : l'eau est colorée en marron dans les 2 cas, mais plus claire pour le thé.

P : oui, on dit que l'eau chaude a extrait du café ou du thé des substances comme la caféine, des tanins, et autres. La caféine est responsable de l'effet excitant du café et du thé (autrefois, on parlait de théine pour nommer la substance excitante du thé, mais en réalité l'étude de sa structure a montré qu'elle était identique à celle de la caféine). Projeter les vues d'un caféier et d'un théier. Le tableau montre les quantités de caféine contenue dans les végétaux et les boissons que nous consommons.

Produit végétal	% de caféine du poids sec
Graine d'arabica	1,1
Graine de robusta	2,2
Fève de cacao	0,1 à 0,4
Graine de guarana	2 à 4,5
Noix de kola	1 à 3,5
Feuille de thé	2,5 à 5
Feuille de maté	0,3 à 1,7

Boisson	Portion	Caféine par portion (en mg)	Caféine par litre (en mg)
Chocolat noir	1 barre (43 g)	31	
Chocolat au lait	1 barre (43 g)	10	
Chocolat chaud	207 ml	52	250
Café moulu	207 ml	80 à 135	386 à 652
Café filtre	207 ml	115 à 175	555 à 845
Café décaféiné	207 ml	5	24
Café expresso	44 à 60 ml	100	1 691 à 2 254
Thé vert ou noir	177 ml	30 à 53	169
Coca-Cola	355 ml	46	129
«Red Bull»	250 ml	80	320

Quels commentaires pouvez-vous faire ?

E : le coca-cola et le red bull contiennent plus de caféine que le thé. D'autre part, les feuilles de thé contiennent plus de caféine que le café en grains, mais une tasse de thé en contient moins qu'une tasse de café.

P : c'est vrai. On peut expliquer ce phénomène par une moins grande infusion des feuilles de thé que de la poudre de café, ainsi que du fait que les feuilles de thé contiennent plus de tanins et d'autres substances qui adouciraient la boisson. De plus, le café est ramassé vert, puis est grillé avant d'être consommé. De ce fait, il perd beaucoup de sa caféine. Enfin, selon l'origine du café (arabica ou robusta), les quantités de caféine ne sont pas les mêmes.

P : comment produire le café décaféiné ?

E : on peut extraire la caféine.

P : c'est bien, mais comment ?

E : ?

P : *Différents procédés ont été mis au point : avec un solvant organique qui dissout la caféine et permet donc de l'extraire (c'est ce qu'on appelle l'**extraction par solvant**), avec le dioxyde de carbone CO₂ que l'on fait agir à très basse température (c'est ce qu'on appelle la lyophilisation).*

Dans le cas des plantes cultivées par la technique du hors sol (hydroponie), on extrait des médicaments des racines des plantes cultivées.

Pourtant, en général les principes actifs sont extraits des feuilles des végétaux.

P : pourquoi traiter les racines plutôt que les feuilles ?

E : ?

P : pour extraire à partir des feuilles, il faut couper les arbres donc le processus est destructif car la pousse des arbres est lente.

Par contre dans le processus d'extraction en continu des racines il n'y a pas de destruction et la plante peut continuer à vivre. On peut recommencer le processus.

P : quel est le rôle d'un médicament ?

E : c'est de soigner une maladie. On donne le produit au malade pour lutter contre une infection par exemple.

P : pouvez-vous citer des exemples où une espèce (animale ou végétale) produit une substance pour lutter contre une attaque extérieure ?

E : réponses variées.

P : ceux qui ont répondu les globules blancs ont raison. Les globules blancs sont produits chez l'homme pour lutter contre une infection.

On fait donc la même chose avec la plante. On introduit dans la solution nutritive des champignons pathogènes qui vont simuler l'attaque d'un parasite. Pour repousser l'attaque, la plante se défend en produisant des espèces appelées métabolites, lesquelles permettent de soigner un certain nombre de maladies, comme l'eczéma, certains cancers, l'insuffisance cardiaque, etc. On n'a donc plus qu'à extraire ces métabolites de la solution nutritive en « trayant » la plante comme on trait une vache pour obtenir le lait. C'est ce qu'on appelle la traite des plantes.

Pour extraire le produit des racines, il est nécessaire d'utiliser un produit appelé **tensioactif** qu'on ajoute dans la solution nutritive. Ce produit rend perméables les parois des racines et permet de récupérer de 20 à 80 % des métabolites contenus dans les racines.

On va réaliser des expériences qui vont nous permettre de visualiser les extraordinaires propriétés de ces composés.

Un tensioactif est un composé capable de modifier la tension superficielle de l'eau. La surface de l'eau se comporte en effet comme une membrane de tambour, c'est-à-dire qu'elle peut supporter des objets. Si l'on introduit un produit tensioactif, comme du liquide vaisselle par exemple, dans une solution, celui-ci se place à la surface de l'eau (et remplace la membrane de tambour). Elle ne peut donc plus rien supporter : les propriétés de l'eau ont changé.

Deux expériences simples peuvent illustrer ces propriétés :

- Les épingles qui flottent et qui coulent.

On prend un saladier qu'on remplit d'eau. On dépose sur l'eau une épingle bien sèche posée sur une feuille de papier à cigarette. Le papier se mouille et coule, l'épingle flotte. La surface de l'eau se comporte comme une membrane de tambour ; les forces de tension superficielle de l'eau sont suffisantes pour équilibrer le poids de l'épingle. On fait la même chose avec 4 ou 5 épingles qui flottent sur la surface de l'eau. On ajoute alors une goutte de liquide vaisselle (il vaut mieux le diluer auparavant). On constate que toutes les épingles coulent, plus ou moins vite selon la diffusion du tensioactif en solution. Le tensioactif a remplacé la membrane de tambour.

- Le poivre (ou le safran) qui a peur du tensioactif mais qui aime le sucre.

On prend un verre d'eau, et on saupoudre la surface avec du poivre (ou du safran, c'est plus joli). Celui-ci flotte à la surface. On ajoute une goutte de liquide vaisselle au centre du verre : le poivre (ou le safran) se sauve sur les côtés. Conclusion : le poivre a peur du tensioactif ! En fait, le tensioactif recouvre la surface et repousse les objets flottant en surface. Si on trempe un morceau de sucre juste à la surface, le poivre (ou le safran) revient vers le sucre. Conclusion : le poivre aime le sucre ! En fait, le sucre absorbe le tensioactif en surface. Le poivre revient.