

Vers une représentation formelle des plantes

Rey H., Godin C., Guédon Y.

Introduction

Nous nous intéressons dans cet article au problème de la mesure et de la représentation formelle de la structure des plantes. D'une manière générale, l'automatisation de l'observation et de la mesure d'un phénomène physique dépend essentiellement de la nature de l'objet étudié ainsi que du matériel existant pour analyser cet objet (caméras, microphones et autres senseurs). Dans certains cas, comme celui du signal vocal par exemple, l'acquisition des données à modéliser se fait sans inconvénient : il suffit d'un microphone et d'un système d'échantillonnage du signal adapté. Au contraire, dans le cas de l'observation des plantes, il n'existe pas (encore) de capteur spécialisé permettant de remplacer le regard et le langage de l'homme pour ce qui concerne la description de leur structure. Ceci est un inconvénient majeur pour les problèmes de modélisation du fonctionnement de la plante : la modélisation elle-même encourt le risque de se voir limitée par la complexité de la description du phénomène observé (Françon, 1990). Ce manque de capteur adéquat pour saisir la structure des plantes confère une importance toute particulière au problème de la description des plantes dans le cadre de la modélisation de leur fonctionnement.

C'est en essayant de systématiser cette première étape du processus de modélisation que nous avons développé une méthode de représentation des plantes. Cette méthode s'est dessinée petit à petit sous l'influence de deux approches complémentaires qui coexistent au sein de notre laboratoire. Une première approche s'inspire des travaux de *Hallé et Oldeman* (1970). Elle développe l'analyse architecturale des plantes et privilégie l'étude de leur morphogénèse. En identifiant chez les végétaux un nombre limité de modes de croissances et de structures résultantes, l'analyse architecturale confère un caractère universel à cette méthode de représentation des plantes. La seconde approche, initiée par *de Reffye* (1979), constitue le fondement de notre réflexion sur la modélisation des végétaux. Elle s'intéresse au fonctionnement des méristèmes en privilégiant un point de vue statistique. Les modèles développés dans cet esprit rendent compte à la fois des fonctionnements moyens des méristèmes de la plante et des variabilités des phénomènes observés dans le processus de croissance. Cette approche statistique nous apprend à observer des populations d'individus et des collections d'événements et à tirer parti de l'information sur le processus de croissance contenue potentiellement dans toute une population.

Ces deux aspects de la modélisation des végétaux ont nécessité le développement d'un véritable « langage » dédié à la description des plantes. Ce langage s'est ainsi naturellement élaboré pour décrire la structure des plantes d'une part, en extraire des collections de données destinées à des traitements ultérieurs d'autre part. Il peut être considéré comme un outil permettant à un observateur de parler d'une réalité observée (un arbre par exemple) sans être tributaire d'un dessin ou de l'ambiguïté du langage courant. Ce langage de représentation des plantes est destiné à parler de façon non-ambigüe de la structure des plantes. Il permet notamment de communiquer ces structures à des ordinateurs tout en gardant suffisamment de souplesse pour s'adapter naturellement à la description de n'importe quelle plante.

Nous exposons dans cet article les principes de ce langage de description des plantes, encore appelé « codage des plantes ».

Dans la pratique, cette phase de « codage » intervient au moment du passage de l'observation de la plante *in situ* à son image numérique dans un ordinateur. Le codage est donc réalisé à l'issue d'une phase de relevés sur le terrain. La plupart des critères d'observations sont basés sur des caractères morphologiques classiques. Un grand nombre d'observations est réalisé, afin de bien mettre en évidence, d'une part toutes les entités qui participent à l'élaboration

de la structure, d'autre part leur variabilité. Ceci est nécessaire pour pouvoir tester puis faire ressortir correctement les lois de probabilité qui sont susceptibles de reproduire, voire de permettre la compréhension des fonctionnements observés. Les traitements statistiques qui permettent de répondre à ces préoccupations demandent en général des capacités de calculs importantes.

Dans une première partie, nous introduisons les éléments qui sont utilisés afin de réaliser ce codage. Nous illustrons dans une seconde partie comment est construit un tel codage. Cette description du codage de la structure est complétée dans une troisième partie par la définition d'attributs qui peuvent être associés à chaque entité. Une quatrième partie aborde le problème de la description de l'architecture d'une plante en croissance dont on veut suivre l'évolution. Une cinquième partie nous permet de conclure et de donner quelques exemples de codage.

La structure : entités et relations

Le concept d'architecture est à la base de notre représentation des plantes. « L'architecture d'une plante peut être définie comme l'ensemble des formes structurales qu'elle présente à un moment donné de son existence. » (Barthélémy, 1988). Cette définition nous permet de distinguer dans la notion d'architecture deux aspects caractéristiques :

- la « *forme structurale* » exprime qu'on peut décrire d'une part la structure d'une plante, c'est-à-dire l'agencement des diverses entités constitutives de cette plante, la manière dont ses différents pièces botaniques sont disposées entre elles, d'autre part la répartition dans l'espace de cette structure,
- le « *moment donné* » rappelle qu'une forme structurale est le résultat de la mise en place dynamique des entités qui la composent, et peut donc évoluer dans le temps.

Une plante peut donc être vue comme un agencement d'entités construites par le fonctionnement primaire de ses méristèmes. Du point de vue de sa structure, l'arrangement de ses entités résulte, d'une part, des alternances de phases d'allongement et de repos des méristèmes primaires, d'autre part, de la création de méristèmes axillaires par les méristèmes apicaux. Afin de développer peu à peu le langage de description des plantes faisant l'objet de cet article, nous présentons dans un premier temps les notions botaniques qui sont directement tra-

duites dans le codage, c'est-à-dire les entités et leur nature, qui peuvent être utilisées pour décrire une plante. Nous évoquons par la suite les relations nécessaires à la description de leur agencement les unes par rapport aux autres.

Définition des entités botaniques simples

L'« entre-noeud »

Nous nous situons à un niveau de description macroscopique des plantes. A cette échelle, le noeud est la plus petite entité morphologique qui permette de construire la plante. Il résulte du fonctionnement du méristème apical. Il porte la ou les feuilles et le ou les bourgeons axillaires qui peuvent donner naissance aux productions axillaires. La portion de tige strictement comprise entre deux noeuds consécutifs (exclus) s'appelle un entre-noeud. Nous associons systématiquement un noeud (avec feuille(s) et bourgeon(s) axillaire(s)) et l'entre-noeud précédent et définissons alors un métamère. Pour des commodités de langage, nous assimilons le métamère à l'« entre-noeud » (**fig. 1**).

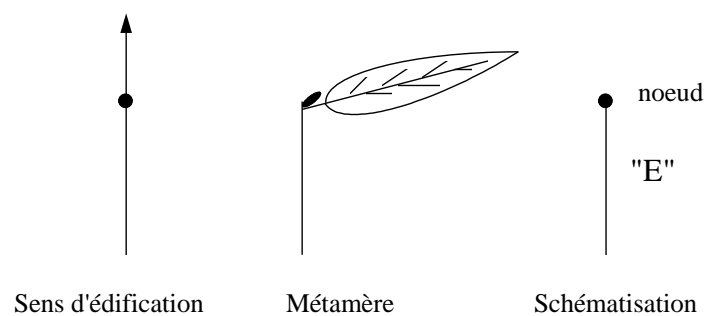


Figure 1 : l'« entre-noeud »

Une entité botanique ayant les caractéristiques d'un « entre-noeud » est dite de type « E ».

L'unité

L'unité est le terme générique utilisé pour symboliser une succession d'entre-noeuds mis en place pendant une unité de temps déterminée. Dans le cas où le temps de développement est explicité (les pousses de printemps par exemple), l'entité « unité » possède alors une correspondance botanique et elle peut être nommée de diverses manières en fonction des critères morphologiques et botaniques qui permettent de l'identifier correctement sur l'arbre. En particulier, dans le cas où cette unité correspond par exemple à une vague de croissance limitée par des arrêts de croissance (**fig. 2**), elle sera nommée unité de croissance. Elle est dans ce cas représentée par le nombre d'entre-noeuds successifs mis en place pendant la période considérée.

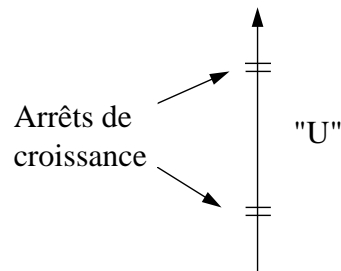


Figure 2 : schéma de l'unité

L'unité peut donc être qualifiée de diverses manières. A titre d'exemples, nous pouvons distinguer :

- l'unité d'organogenèse (création des entre-noeuds),
- l'unité d'allongement (allongement des entre-noeuds),
- l'unité de longueur (pour les racines par exemple),
- l'unité de croissance (organogenèse et allongement).

Dans le cadre des travaux réalisés actuellement au sein de notre unité, nous nous intéressons essentiellement à l'unité de croissance qui est la seule observée actuellement (parce que la plus facile à observer), fruit de l'organogenèse et de l'allongement.

Une entité botanique ayant les caractéristiques d'une unité de croissance est dite de type « U ».

L'axe

L'axe est un organe globalement cylindrique ou conique, parfois à section anguleuse, terminé par une partie embryonnaire : le méristème apical (**fig. 3**).

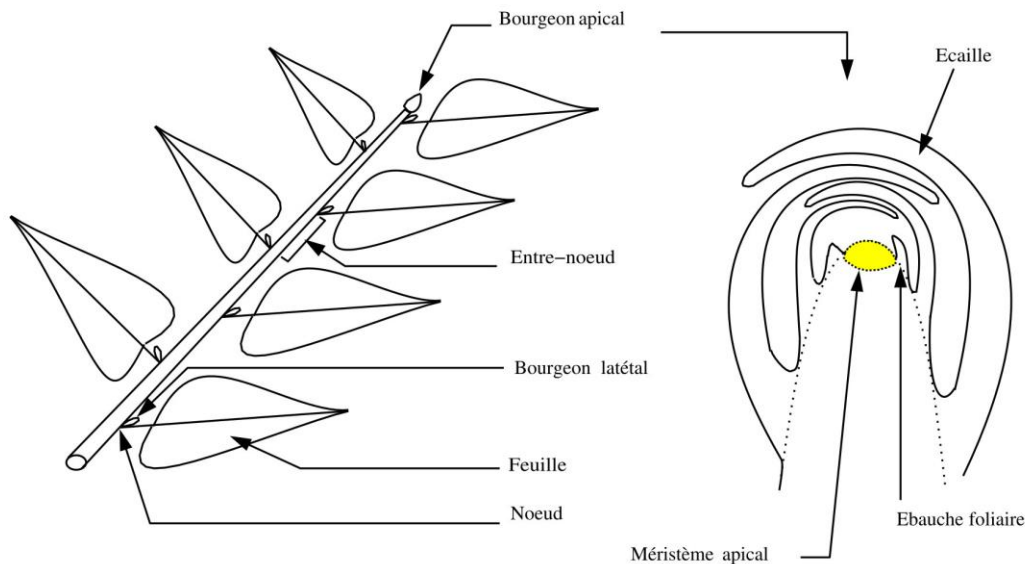


Figure 3 : l'axe feuillé et le bourgeon apical

Il constitue la structure élémentaire couramment utilisée pour la description de l'architecture aérienne d'une plante. Il est défini comme l'ensemble des éléments d'une plante construit à partir du fonctionnement d'un même méristème (le méristème apical). Il débute dans sa partie basale par les premiers entre-noeuds fabriqués par le fonctionnement du méristème apical et se termine dans sa partie distale, soit par la mortalité naturelle ou accidentelle du méristème édificateur, soit par sa transformation, floraison, épine, vrille, parenchymatisation... (**fig. 4**). En ce sens, il se distingue facilement de la notion d'unité puisque cette dernière ne constitue qu'une partie d'un axe, généralement limitée par des arrêts de croissance. Dans le cas de l'unité, le méristème peut dormir, mais il n'est pas mort et garde intacte sa capacité de produire de nouvelles entités lors d'une nouvelle vague de croissance, alors que l'axe est obligatoirement délimité par l'incapacité du méristème terminal de produire de nouvelles entités.

Cette notion d'axe s'applique indistinctement aux parties caulinaires ou racinaires d'une plante.

Une entité botanique ayant les caractéristiques d'un axe est dite de type « A ».

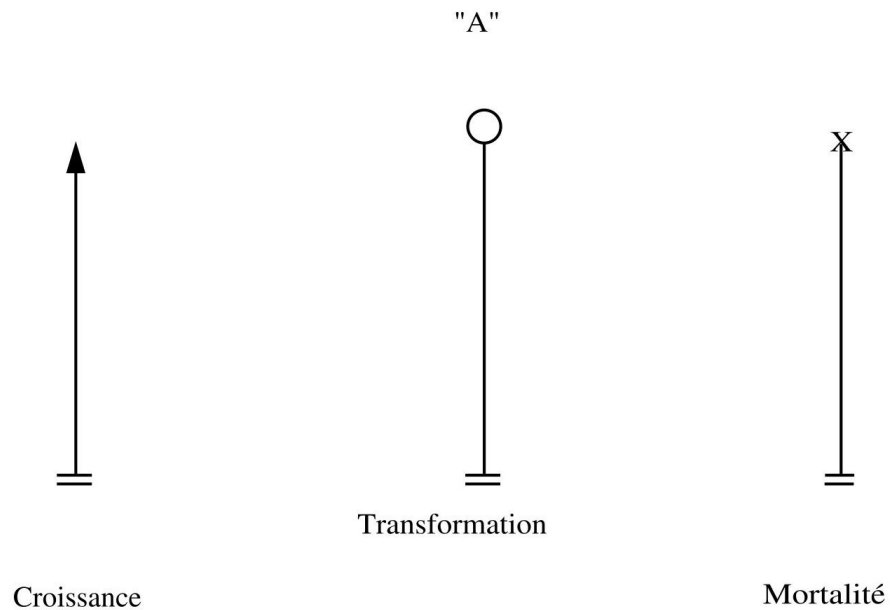


Figure 4 : schémas de l'Axe

Définition des Relations entre les Entités

D'un point de vue purement botanique, la croissance primaire d'un axe feuillé s'effectue dans sa partie distale grâce à l'activité de son méristème apical. Nous avons vu que l'entité qui résulte d'une phase d'allongement d'une durée donnée est appelée unité de croissance. De ce point de vue, l'axe est une succession d'unités qui peuvent être identifiables sur le terrain par un certain nombre de marqueurs botaniques et morphologiques (présence d'écaillés, de feuilles réduites, ou d'entre-noeuds très courts, ramification rythmique...). D'autre part, la portion d'axe comprise entre deux noeuds est un entre-noeud. De cet autre point de vue, l'axe est une succession d'entre-noeuds. Enfin, entre deux arrêts de croissance, l'unité de croissance est composée d'entre-noeuds.

Par ailleurs, les feuilles sont insérées sur l'axe au niveau des noeuds. Un ou plusieurs bourgeons latéraux existent à l'aisselle de chacune d'entre-elles, c'est-à-dire au niveau de leur jonction avec la tige. Ils contiennent chacun un méristème apical susceptible lui-même de se développer pour donner un nouvel axe. C'est le processus de ramification qui donne naissance à des rameaux.

Ces considérations botaniques nous permettent d'explicitier des relations qui existent entre les différentes entités constitutives d'un arbre à cette échelle d'analyse :

- des entre-noeuds peuvent se succéder les uns aux autres,
- des unités peuvent se succéder entre-elles,

- un entre-noeud peut donner naissance à un autre entre-noeud,
- une unité peut donner naissance à une autre unité,
- un axe est susceptible de donner naissance à un autre axe,

- un axe est composé d'unités (successives),
- un axe est composé d'entre-noeuds (successifs),
- une unité est composée d'entre-noeuds (successifs).

La traduction de l'ensemble de ces informations peut alors commencer au moyen d'un formalisme approprié. La représentation formelle d'une plante et de l'ensemble des entités précédemment introduites, ainsi que des relations qu'elles peuvent entretenir entre-elles, peut se réaliser au moyen d'un graphe multi-niveaux.

Un graphe peut être défini par un ensemble d'entités (ou sommets) et par un ensemble de relation (ou arcs) existants entre ces sommets. A titre d'exemples, on trouve diverses applications des graphes dans les méthodes structurelles pour la reconnaissance des formes, dans le traitement du signal (reconnaissance de la parole) ou l'analyse d'images (Miclet, 1984).

Dans le cas que nous présentons, il est possible de définir un graphe multi-niveaux dont les principales caractéristiques s'inspirent des informations que nous possédons à présent sur la manière de décrire une plante :

- A chaque type d'entité peut correspondre un niveau du graphe multi-niveau. Les ni-

veaux du graphe multi-niveau sont donc associés aux trois types d'entités A, U et E et sont constitués chacun par un graphe. Cette notion de niveau correspond par conséquent à différents degrés de finesse de description que l'on peut avoir d'une plante quand on cherche à la décrire.

- Entre chaque niveau, il existe une relation qui permet de passer d'un niveau de description à un autre : une entité de type A peut se décomposer en entités de type U par exemple. Nous appelons cette relation « relation d'échelle ». Elle peut s'exprimer de la manière suivante : une entité « est composée » d'autres entités, ou inversement ces dernières « sont des composants » de la première. Cette relation permet de respecter la cohérence de la structure de la plante quand un observateur passe d'un niveau de description à un autre.
- Pour chaque niveau, les sommets du graphe sont représentés par les diverses entités constitutives de la plante observée - remarquons qu'elles appartiennent donc *de facto* au même type d'entité. Entre chaque entité d'un même niveau, il est alors nécessaire de définir deux types de relation pour rendre compte des notions botaniques précédemment évoquées. C'est ici que la spécificité de la formalisation de la structure des plantes au travers d'une structure de graphe apparaît. En effet :
 - Des entre-noeuds peuvent être successifs sur un axe par exemple. C'est le résultat de la croissance, exprimée ici en terme d'organogenèse par le méristème apical. Il existe donc une relation particulière que nous nommons « relation de succession ». Elle peut s'exprimer de la manière suivante : une entité « est prédécesseur » d'une autre, cette dernière « est successeur » de la première.
 - Par le moyen d'un méristème axillaire, une entité d'un certain type peut donner naissance à une ou plusieurs entités de même type. C'est le processus de ramification qui est traduit directement au travers d'une seconde relation nommée « relation de parenté ». Elle peut s'exprimer en disant qu'une entité « porteuse » porte une ou plusieurs entités « portées » par cette première. Cette relation ne présage en rien des types de relation qui peuvent exister entre des entités portées. En effet, il peut très bien exister à nouveau des relations de succession ou de parenté pour les entités portées. Dans le cas de la relation de parenté, on pourrait illustrer ce fonctionnement par le tronc qui porte les branches qui portent à leur tour des rameaux. Les relations de parenté successives pour des entités de même niveau peuvent alors se retraduire botaniquement en

termes d'ordres de ramifications, ces derniers ayant une traduction directe avec la notion d'ordre dans un graphe. Cette traduction n'a en revanche plus lieu d'être dans le cas où les relations de succession et de parenté sont utilisées en combinaison.

Relation de succession

Au niveau méristématique, cette relation traduit le fait que deux entités successives sont édifiées par le même méristème. Au niveau de la plante, elle traduit le fait qu'il existe des marqueurs morphologiques qui permettent d'identifier ces deux entités successives édifiées par le même méristème. Concrètement la relation de succession est compatible avec les entités de type entre-noeud et unité (E et U, **fig. Erreur ! Signet non défini.**). En effet :

- une unité peut suivre une autre unité,
- un entre-noeud peut suivre un autre entre-noeud.

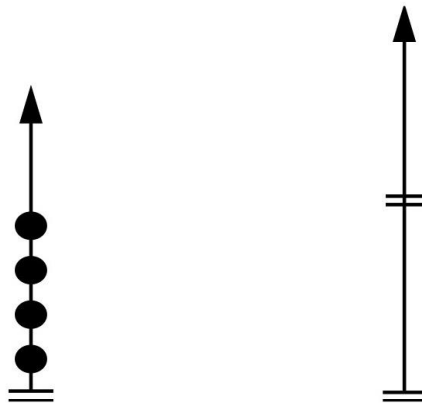


Figure 5 : entités successives

En revanche cette relation n'est pas compatible avec les entités de type axe puisque par définition un axe se termine toujours par la mortalité ou la transformation du méristème édificateur. Deux axes ne peuvent donc se suivre, ne pouvant pas être édifiés par le même méris-

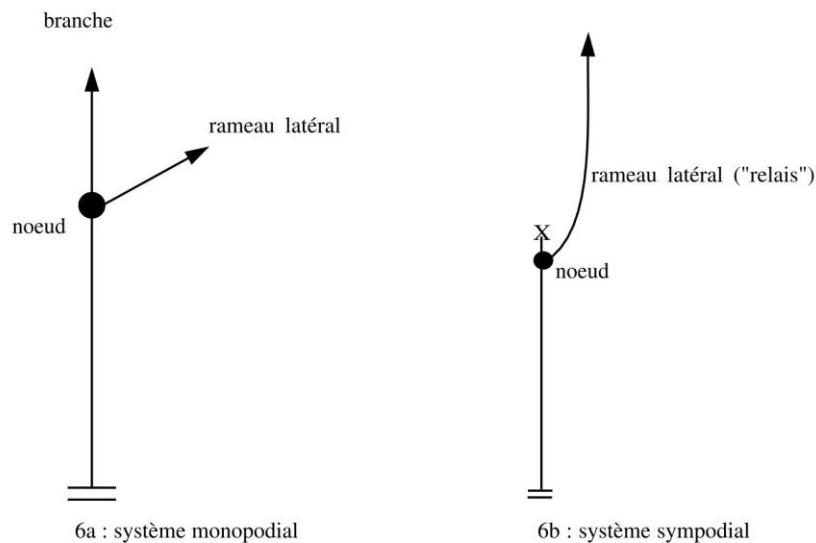
tème. La relation de succession n'est donc pas compatible avec les entités de type axe.

Relation de parenté

Au niveau méristématique, cette relation traduit le fait que le méristème terminal d'un bourgeon axillaire a fonctionné et a construit une entité de même niveau que celle qui lui a donné naissance.

Dans le cas où le méristème édificateur continue de fonctionner pendant l'établissement du rameau porté, on parle de ramification monopodiale (**fig. 6a**).

Une ramification peut également s'établir à la suite de la mortalité ou de la transformation du méristème édificateur. Nous parlons alors de ramification sympodiale (**fig. 6b**).



Figures 6 : relation de parenté

La relation de parenté est compatible avec les trois types d'entités A, U et E :

- un axe peut porter un axe,
- une unité peut porter une unité,
- un entre-noeud peut porter un entre-noeud.

Cas particuliers de la relation de parenté

Les bourgeons surnuméraires

Un noeud peut porter une ou plusieurs feuilles axillantes. Lorsqu'il existe plusieurs méristèmes à l'aisselle d'une même feuille, nous définissons des bourgeons surnuméraires. Ils peuvent chacun donner naissance à un rameau ou de façon plus générale à une production axillaire (**fig. 7** et **fig. 10**).

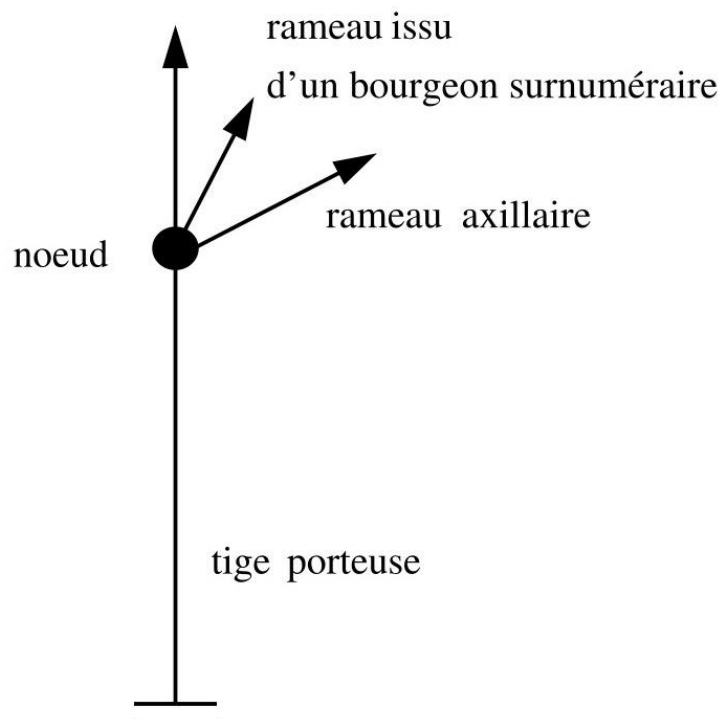


Figure 7 : production surnuméraire

Il peut donc exister plusieurs rameaux à l'aisselle d'une même feuille. Pour les ordonner, il est préférable d'utiliser la séquence dynamique d'apparition de ces rameaux lorsque cela se révèle possible. Des critères morphologiques sont utilisables dans le cas contraire. Les rameaux issus des bourgeons surnuméraires sont donc repérés par leur noeud porteur et le bourgeon qui les a engendrés. La notation « N » indique leur présence.

Le polycyclisme

Dans le cas d'une plante fonctionnant sur des cycles annuels, le méristème terminal peut venir à s'arrêter, se transformer ou mourir. Il peut donc y avoir au cours de la même année l'émission d'une seconde vague de croissance, produite par le même méristème (**fig. 8a**) ou non (**fig. 8b**), et ainsi de suite. Nous parlons alors de polycyclisme.

L'interprétation de ce phénomène fait référence aux critères morphologiques ou botaniques habituels qui permettent de lire sur les plantes les arrêts de croissance déjà évoqués et de différencier ainsi les vagues successives de croissance. Chaque vague de croissance peut alors être considérée comme une unité, que l'on pourra qualifier d'unité de croissance. Cette unité peut se confondre avec l'axe dans le cas de la mortalité ou de la transformation du méristème édificateur.

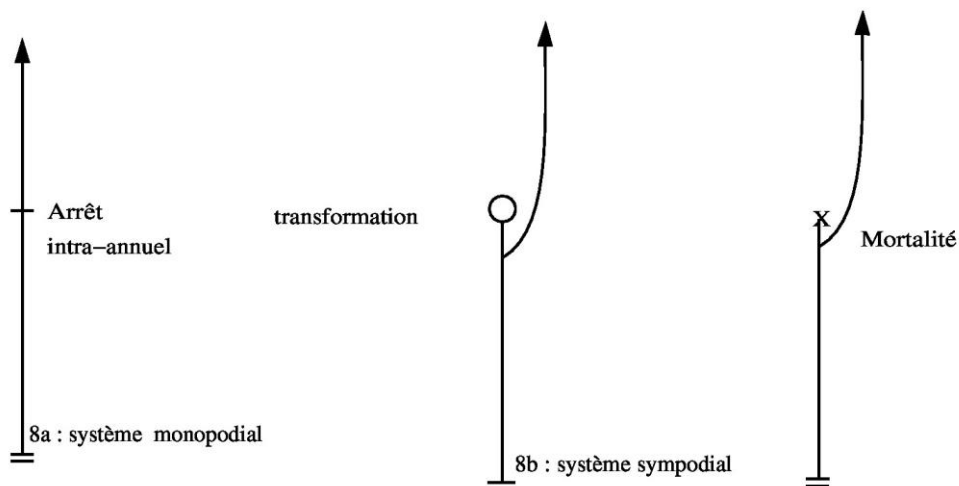


Figure 8 : cas de polycyclisme

Les verticilles

Dans le cas où sur un même noeud il existe plusieurs feuilles, chacune peut porter un (voire plusieurs) méristème axillaire. Les productions axillaires situées sur un même noeud mais à l'aisselle de feuilles différentes (**fig. 9**) forment par définition un verticille.

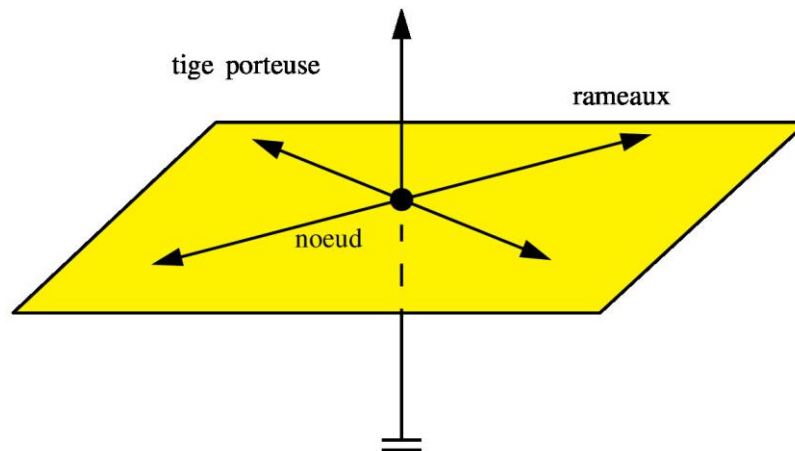


Figure 9 : ramification verticillaire

Chaque production doit pouvoir être décrite indépendamment l'une de l'autre. Elle est repérée par son noeud porteur commun aux autres productions du même noeud et sa feuille axillante.

Pour ordonner les rameaux d'un verticille, il est possible d'utiliser des critères morphologiques:

- pour décider quel est le premier rameau,
- pour décider du sens de rotation pour la description des rameaux suivants.

Dans le cas où ces critères morphologiques ne sont pas observables, il est toujours possible :

- de prendre un critère géométrique ou d'orientation (le nord par exemple) pour décider du premier rameau,
- de définir un sens de rotation arbitraire (sens trigonométrique par exemple) pour les rameaux suivants.

Dans tous les cas, il convient de rester homogène au sein d'un ensemble de descriptions (critères morphologiques ou choix arbitraire normalisé) afin de pouvoir utiliser correctement l'information sur l'ordre des rameaux d'un verticille dans des traitements ultérieurs.

Les productions axillaires autres que des rameaux

Les productions axillaires peuvent ne pas être des rameaux. En effet le fonctionnement d'un méristème axillaire peut par exemple donner naissance à des fleurs, puis à des fruits (**fig. 10**).

Du point de vue botanique, ces productions axillaires sont engendrées par un méristème axillaire, comme les rameaux. Du point de vue du codage, elles sont donc représentées de la même manière que des rameaux portés. La qualification de leur nature sera précisée par la suite.

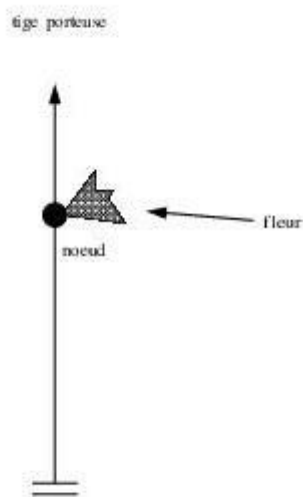


Figure 10 : production axillaire

Relation d'échelle

Nous avons vu que la relation d'échelle s'applique à tous les types d'entités :

un axe peut se décomposer en unités

En effet un axe peut être composé de l'empilement d'unités (**fig. 11**) édifiées par le même méristème. Dans le cas où la mise en place de la première unité se termine par la transformation ou la mort du méristème édificateur, l'axe se réduit à une seule unité.

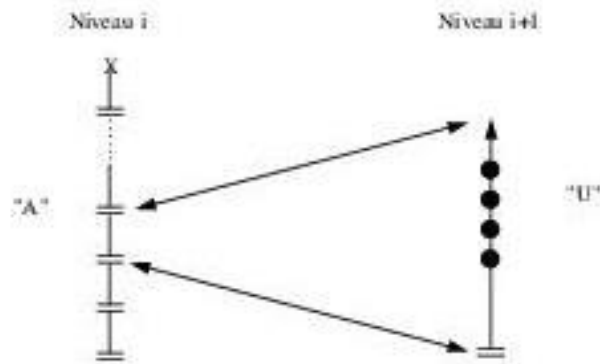


Figure 11 : l'axe et l'unité

Une unité se décompose en entre-noeuds

Une succession d'entre-noeuds résultant d'un processus d'allongement ininterrompu constitue une unité (**fig. 12**). L'entre-noeud fait donc partie intégrante de l'unité et peut être confondu avec elle dans le cas d'une unité à un seul entre-noeud.

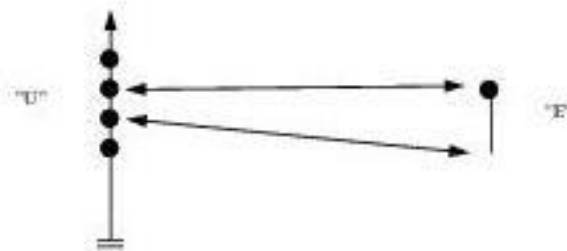


Figure 12 : l'unité et l'« entre-noeud »

Un axe se décompose en entre-noeuds

Cette relation résulte d'une combinaison des deux relations précédentes. Elle peut donc se réaliser soit directement, soit par l'intermédiaire d'une unité.

La relation d'échelle est compatible pour les entités de type :

- E (E est un élément de U ou A),
- U (U est un élément de A ou est composé de E),
- et A (A est composé de U ou E).

Synthèse

Pour chaque type d'entité, nous avons ainsi décrit les possibilités de comportement réciproques vis à vis des relations précédemment définies. Le **tableau 1** résume et présente ces comportements. Rappelons qu'en ce qui concerne les relations de succession et de parenté, ces dernières ne peuvent exister qu'entre des entités appartenant à un même niveau Axe, Unité ou « entre-noeud » (c'est-à-dire appartenant à un même graphe).

	A			U			E		
	échelle	success.	parenté	échelle	success.	parenté	échelle	success.	parenté
A	non	non	oui	oui	non	non	oui	non	non
U	oui	non	non	non	oui	oui	oui	non	non
E	oui	non	non	oui	non	non	non	oui	oui

Tableau 1 : comportements des types d'entités vis à vis des relations

Le positionnement

Le positionnement est une notion qui permet d'apporter des précisions quantitatives sur une relation que peuvent entretenir entre-elles des entités. Le type de relation est en effet une information qui mérite d'être enrichie dans la mesure où l'on ne sait pas en quel lieu physique se situe cette relation entre les entités. Nous présentons donc cette notion en fonction des relations décrites précédemment.

Après que l'utilisateur ait défini un sens de lecture de la plante (**fig. 13**) en fonction des observations qu'il désire réaliser et de sa problématique, il devient possible de décrire une entité (axe ou unité) noeud par noeud. Il est usuel de choisir préférentiellement le sens de la mise en place des éléments, *i.e.* de la base vers l'apex, mais ce n'est pas obligatoire.

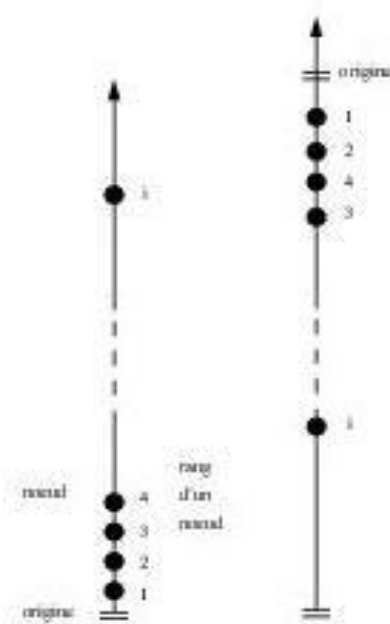


Figure 13 : positionnement d'un entre-noeud en fonction d'un sens de lecture

Le positionnement exact d'un noeud peut alors se faire de deux manières différentes, exclusives l'une de l'autre :

- soit en lui associant son rang dans une séquence d'entre-noeuds, relativement à une origine,

- soit en lui associant une longueur, qui correspond à la distance mesurée entre une origine arbitraire fixe et lui-même.

Le positionnement d'un rameau porté par une entité porteuse de même niveau se réalise alors en lui associant un numéro qui peut être soit le rang du noeud (« 4 » dans la **fig. 14**), soit la distance du noeud à l'origine (« d » pour cette même **fig. 14**), où se situe le méristème axillaire qui lui a donné naissance.

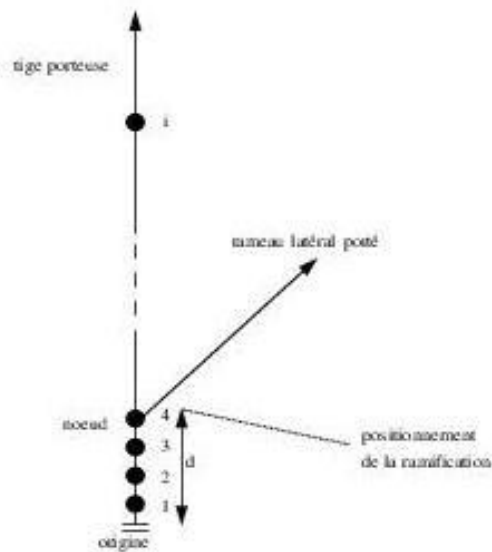


Figure 14 : positionnement d'une production axillaire

Codage de la structure de la plante

Comme nous l'avons évoqué dans l'introduction, chaque entité doit être désignée par un code univoque afin d'être compréhensible par un ordinateur et donner lieu ensuite (car c'est la finalité) à des traitements automatiques non ambigus. Un code s'exprime dans un langage qui, au travers d'une écriture formelle, désigne une entité botanique unique. Dans un premier temps il s'avère donc indispensable de définir une *syntaxe* nécessaire à la création de ce dernier. Nous aborderons ensuite la création d'un *fichier* dans lequel nous porterons les codes

d'un grand nombre d'entités constitutives d'une ou plusieurs plantes.

Label des entités

Dans un arbre (**fig. 15**), il est possible de recenser en premier lieu, et de façon exhaustive, ses entités constitutives.

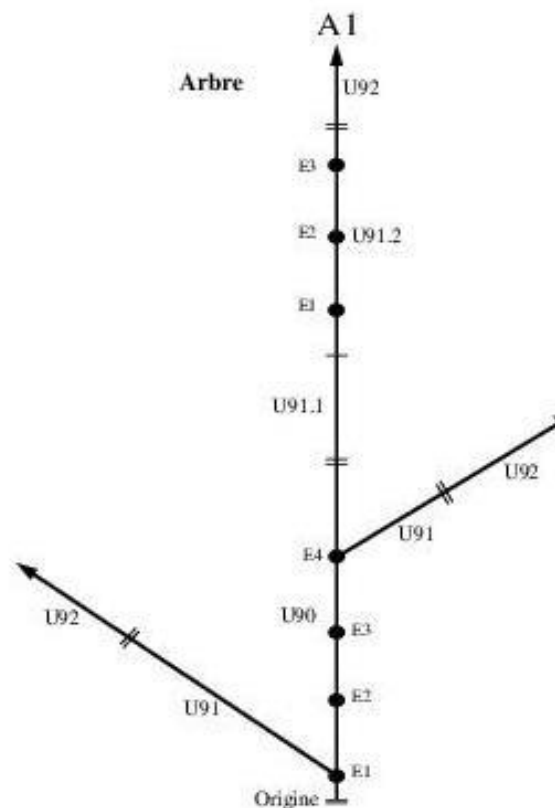


Figure 15 : exemple de codage d'un arbre

Afin de manipuler ces entités, il est nécessaire de les nommer toutes individuellement. Une première phase consiste alors à leur affecter un label que nous avons choisi de construire en utilisant le type d'entité auquel elles appartiennent.

Ce type est alors concaténé avec un indice arbitraire.

Cet indice qualifie le type. Il est renseigné par l'utilisateur et peut ne pas avoir de signi-

fication particulière, ou bien représenter par exemple un ordre de ramification (1), une année d'apparition (90), le rang de l'entité dans une séquence particulière (4), la distance de cette dernière à l'origine arbitraire (27) . Les notations formelles attachées aux entités qu'il est possible de créer en utilisant les exemples précédents peuvent alors être les suivantes :

- type : A, U, E,
- Indice : 1, 90, 4, 27
- Label = (type, indice) : A1, U90, E4, U27.

Code des entités avec leurs relations.

La figure 15 montre que le label d'une entité n'est cependant pas suffisant pour coder une plante, c'est-à-dire désigner une entité d'un arbre de façon univoque (à cette entité correspond un code et un seul et réciproquement). Dans l'exemple de cette figure 15, nous pouvons en effet remarquer qu'il existe plusieurs U91, plusieurs E2.

La représentation formelle de l'ensemble de ces entités et de leurs relations peut ensuite se faire au moyen d'une structure de graphe (**fig. 16**) qui permet la compréhension de l'organisation des entités de l'arbre.

Pour pallier les ambiguïtés de désignations non univoques des entités et continuer dans la construction du code, nous utilisons alors :

- pour la relation de succession, un indice différent du précédent (U90, U91,...),
- pour la relation de parenté, la notion de positionnement.

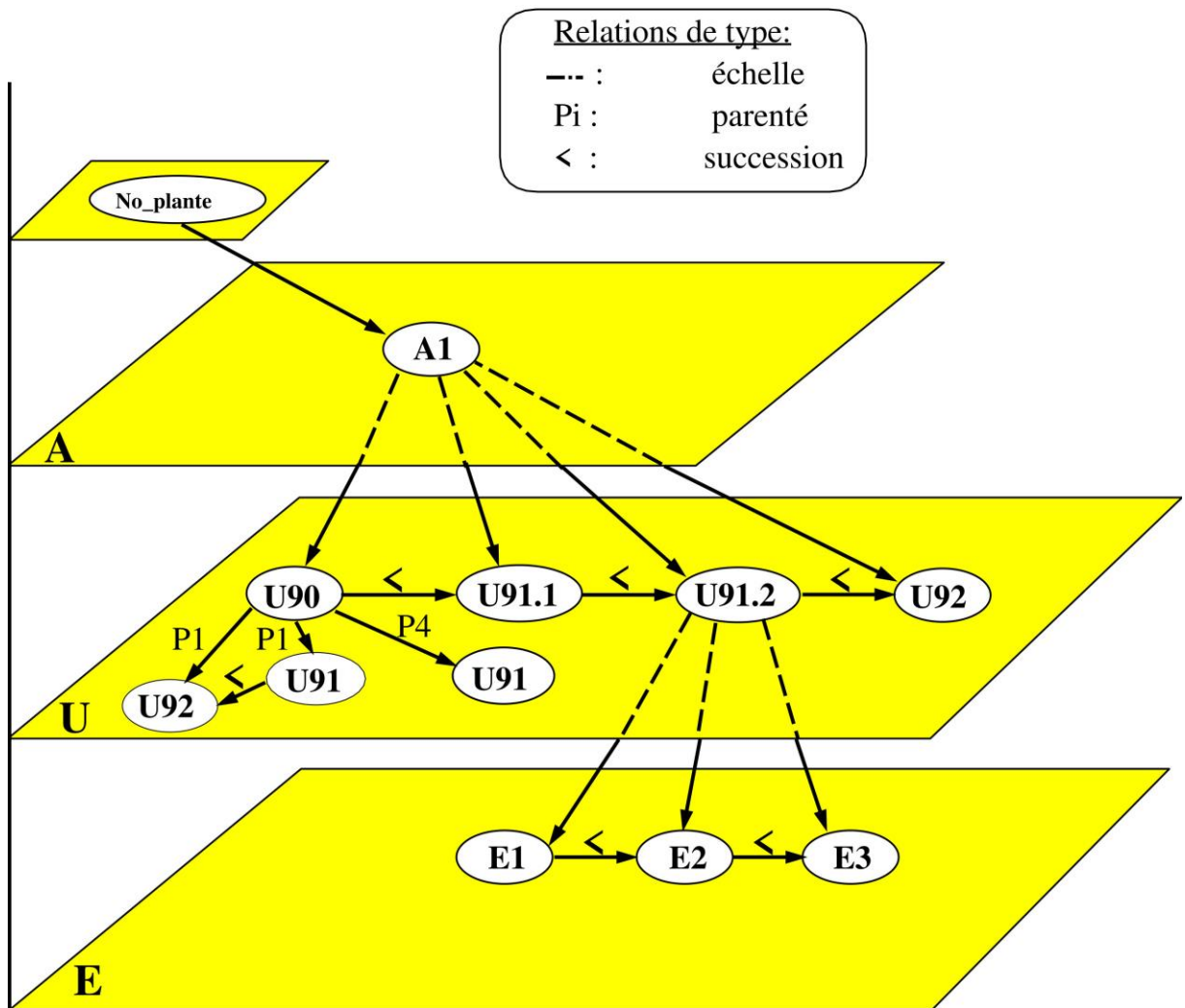


Figure 16 : exemple de représentation d'un arbre

Dans le cas de la relation de parenté, le code se construit *de façon récurrente* en désignant d'abord :

- le label de l'entité porteuse (U90 par exemple),
- le positionnement en rang d'entre-noeud (U90P2) ou en longueur (U90L27) de l'entité portée sur l'entité porteuse,
- le label de l'entité portée (U90P2U91, U90L27U91).

Nous obtenons en fin de compte le code complet de l'entité :

Code = (label de l'entité porteuse)(position)(label de l'entité portée) : U90P2U91

Si l'arbre comprend des rameaux d'ordre 3, le même schéma de construction est repris. Pour illustrer cette récurrence, prenons l'exemple où l'entité précédemment codée porte elle-même sur son quatrième entre-noeud une entité dont le label serait U92. Sa position serait alors P4 et son code : U90P2U91P4U92.

Construction du fichier de codes

A partir de l'arrangement de tous les codes d'une même plante dans un fichier, il devient alors possible de décrire cette plante en vue de traitements automatiques.

La construction du fichier fait appel à un certain nombre de règles qui concernent la succession des lignes et possèdent une signification implicite. Notons particulièrement que la notion d'échelle est traduite par la succession de deux lignes faisant référence à deux niveaux consécutifs de description de la plante :

A1	signifie que l'axe dont le code est A1 peut se décomposer
U90	(de manière non exclusive) en l'unité de code U90.

De même la relation de succession est traduite au travers d'un retour de ligne joint à la présence d'un positionnement sur porteur identique :

U90P2U91	signifie que ces deux entités se suivent et sont portées
U90P2U92	par le deuxième entre-noeud de l'entité dont le code est U90.

Toutes ces considérations permettent alors de construire le fichier de codes formalisant une structure représentative d'un arbre observé. A titre d'exemple, nous présentons le fichier de code associé à l'arbre de la figure 15.

```

N0_Plante_1-----nom de la plante codée

A1-----définition de A1
U90-----décomposition de A1 et définition de U90
E1-----décomposition de U90 et définition de E1
E2-----définition de E2, successeur de E1
E3-----définition de E3, successeur de E2
U90P1U91-----définition de U91 porté par U90 en E1
U90P1U92-----définition de U92, successeur de U91, porté par U90 en E1
U90P4U91-----définition de U91 porté par U90 en E4
U90P4U92-----définition de U92, successeur de U91, porté par U90 en E4
U91.1-----définition du premier cycle annuel de U91
U91.2-----définition du second cycle annuel de U91
E1-----décomposition de U91.2 et définition de E1
E2
E3
U92

```

Codage des attributs des Entités

Le chapitre précédent nous a permis de définir un codage de la structure d'une plante à un stade de développement donné (codage « statique »). Cette structure n'apporte cependant aucune information sur la nature morphologique des entités botaniques qui la composent, leur état (mort, en croissance), leur position et leur orientation dans l'espace, ou leurs dimensions

(géométrie). Ces informations constituent des attributs qui peuvent prendre des valeurs caractéristiques pour certaines entités. Nous définissons dans ce qui suit un mode de notation de ces attributs.

La création d'attributs n'est pas obligatoire. Elle doit permettre de répondre de manière très souple aux besoins d'un protocole donné. Dans le cas où aucun champ qualificatif n'est créé, seule l'information traduite dans le codage de la structure sera alors utilisable par analyse automatique. De même, certaines techniques d'analyse ne s'appliqueront que si certains champs prédéfinis auront été renseignés. Les notations suivantes ne sont donc qu'indicatives dans la mesure où leur renseignement n'est justifié que par l'utilisation que l'on désire en faire.

Les attributs des entités peuvent être de deux types : prédéfinis ou libres. Dans la mesure où l'utilisation d'attributs à signification particulière (prédéfinis) peut agir en retour sur l'interprétation du code, nous indiquons l'utilisation de quelques mots clés et de lettres clés afin de respecter la cohérence avec les traitements automatiques possibles par les logiciels développés au laboratoire.

En ce qui concerne le format de présentation des variables personnelles (ou libres) que l'utilisateur désire porter sur les éléments constitutifs de la plante qu'il décrit, nous n'apportons que des suggestions ayant pour objet de rendre plus homogène la lecture des attributs pour un ensemble d'utilisateurs, chaque utilisateur restant libre d'y porter ce qu'il désire.

Le fichier de saisie

Nous avons vu que les codes des entités se trouvent systématiquement dans la première colonne du fichier. Cette présentation en colonnes (champs) reste valable pour l'ensemble des éléments de description de la plante. Il est possible de créer, dans un fichier, autant de colonnes que l'utilisateur le désire. Chaque colonne contient une information homogène correspondant à un élément de description donné.

Les informations portées dans les champs seront utilisées, à la suite de sélections et d'extractions, dans divers types de traitements numériques. Quelques traitements courants sont succinctement mentionnés lorsqu'ils se rapportent directement au type de colonne qui les autorise.

Les attributs

Le nombre d'entre-noeuds

Les utilisations de ce champ qualificatif sont nombreuses. La plus immédiate consiste à construire l'histogramme du nombre d'entre-noeuds constitutifs des entités axes ou unités sélectionnées selon des critères donnés.

Différents traitements sont possibles sur des structures « porté-porteur », c'est-à-dire constituées d'une entité porteuse et des entités portées par cette entité porteuse. Ainsi, l'analyse des productions axillaires par un processus Markovien nécessite de connaître le nombre d'entre-noeuds de l'entité porteuse si les productions axillaires sont positionnées en entre-noeuds. Une analyse de cime nécessite de connaître le nombre d'entre-noeuds de l'entité porteuse et des entités portées.

La longueur

Ce champ peut être utilisé dans l'analyse des productions axillaires par un processus Markovien qui nécessite de connaître la longueur de l'entité porteuse si les productions axillaires sont positionnées en longueur.

La nature

Ce champ permet d'apporter des informations sur la nature de l'entité codée ; B : bourgeon, BFL : bourgeon floral, E : écaille, BV : bourgeon végétatif, FL : fleur, FLF : fleur femelle, FLM : fleur mâle, FR : fruit, I : indéterminé. Ce champ peut également être utilisé dans l'analyse des productions axillaires par un processus Markovien.

L'état

Ce champ permet de décrire l'état dans lequel se trouve l'entité codée ; A : avorté, D : dominant, d : dominé, C : en croissance, E : élagué ou tombé, K : cassé, P : pause, M : mort,

S : sec, T : taillé, V : vivant. L'utilisation de la mortalité et de la dominance peuvent par exemple s'avérer indispensable dans l'analyse de systèmes sympodiaux, afin de rétablir la hiérarchie des chemins dominants.

La caractérisation

Ce champ permet d'apporter des précisions quant à la caractérisation morphologique de l'entité codée ; C : court, L : long, O : orthotrope, P : plagiotrope, R : répétition. Ces caractérisations peuvent servir à réaliser des tris qualitatifs indépendamment de toute valeur du nombre d'entre-noeuds de l'entité décrite.

Le temps de développement

Cette colonne permet de renseigner la différence temporelle de développement entre l'axe codé et son porteur ; D : différé (retardé, proleptique), I : immédiat (anticipé, syllep-tique). Les calculs sur les rapports de rythme entre axes porteurs et portés sont alors possibles.

La géométrie

La direction de croissance, la géométrie porté/porteur sont des attributs qu'il est possible de renseigner en fonction des buts recherchés. On pourra tester des hypothèses sur la mise en place de la ramification en fonction de la courbure du porteur par exemple. Ces données qualitatives et/ou quantitatives pourront également être utilisées lors de la simulation puis lors de la représentation tridimensionnelle des arbres.

Codage de l'évolution des structures

Dans le chapitre précédent, nous considérons la structure de la plante à un instant donné. Le temps n'était donc pas explicitement représenté dans le codage. Nous pouvons envisager d'intégrer le temps dans le codage en indexant la description d'entités botaniques par des dates (dates d'observation, dates de taille ou d'élagage). Nous restons alors dans la même logique que celle qui consiste à caractériser une entité botanique, par exemple au moyen d'un

paramètre géométrique. Une date peut en effet être considérée comme une variable particulière. Ceci nous amène à définir un mode de codage « dynamique » où le temps est explicitement pris en compte.

Ce mode de codage dynamique s'applique au suivi de croissance. Il consiste à faire des observations à intervalles de temps plus ou moins réguliers sur des structures choisies d'une plante en croissance. Il faut alors être capable d'indexer une entité par une date d'observation.

La taille ou l'élagage de structures est un autre champ d'application du codage dynamique. Pour rendre compte de la taille, il faut en effet être capable de noter la disparition de certaines structures à une date donnée, puis de réaliser le suivi de croissance de structures nouvelles constituant la réponse de la plante à l'intervention.

Le suivi de croissance

Il se traduit par la création d'une colonne particulière appelée « Date de suivi de croissance ». Dans ce cadre, les seules « origines » stables au cours du temps sont les bases des entités, le sens de comptage est obligatoirement de la base vers l'apex. Il est en effet impossible de positionner des entités portées par rapport au sommet de leur entité porteuse puisque celle-ci évolue constamment. Une entité peut alors être reportée plusieurs fois dans le fichier, à des dates successives, ce qui constitue une différence majeure par rapport à un fichier statique. Afin d'illustrer le codage d'un suivi de croissance, prenons un exemple simple (**fig. 17**). Soit un fichier dans lequel nous codons la germination d'une graine qui donne naissance à une unité U1 sur laquelle des rameaux se développent. La troisième colonne indique le nombre d'entre-noeuds de la structure à la date d'observation.

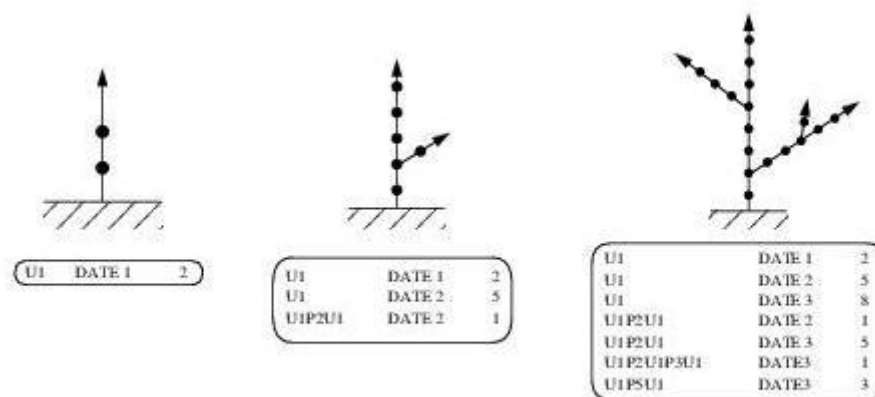


Figure 17 : exemple de codage d'un suivi de croissance

Conclusion

Le mode de représentation de la structure des plantes et de leur évolution dans le temps que nous avons défini dans cet article peut être assimilé à un langage permettant de coder les observations réalisées. Les codes contenus dans un fichier sont ensuite interprétés dans l'ordinateur au moyen d'un graphe multi-niveaux du même type que celui qui a permis de les générer et les structures sont reconstituées en respectant leur géométrie. Ce langage est suffisamment générique pour permettre de transcrire les principaux événements botaniques que l'on peut rencontrer chez la plupart des végétaux (exemples dans les **figures 18, 19, 20**). Il permet en outre de décrire des suivis de croissance et de saisir des ensembles d'attributs associés aux entités botaniques codées. Des opérations d'extraction de données sont alors envisageables et les collections de données sélectionnées peuvent être modélisées.

Cependant, le langage ainsi défini n'utilise pas encore toute les potentialités de description de l'analyse architecturale. Dans l'état où il existe actuellement, seules des entités botaniques simples linéaires, telles que les axes, les unités ou les entre-noeuds, peuvent être décrites. Nous travaillons actuellement à une extension importante de ce langage qui permettra d'intégrer dans les descriptions de plantes des entités botaniques plus complexes (notamment des entités tridimensionnelles) issues de la notion de système ramifié. Cet outil nous permettra d'aborder des problèmes de modélisation du fonctionnement de la plante tant à des échelles

finas et locales, comme le langage présenté ci-dessus nous le permet déjà, qu'à des échelles grossières et globales où le détail de la plante n'est plus utile à la description d'événements plus généraux.

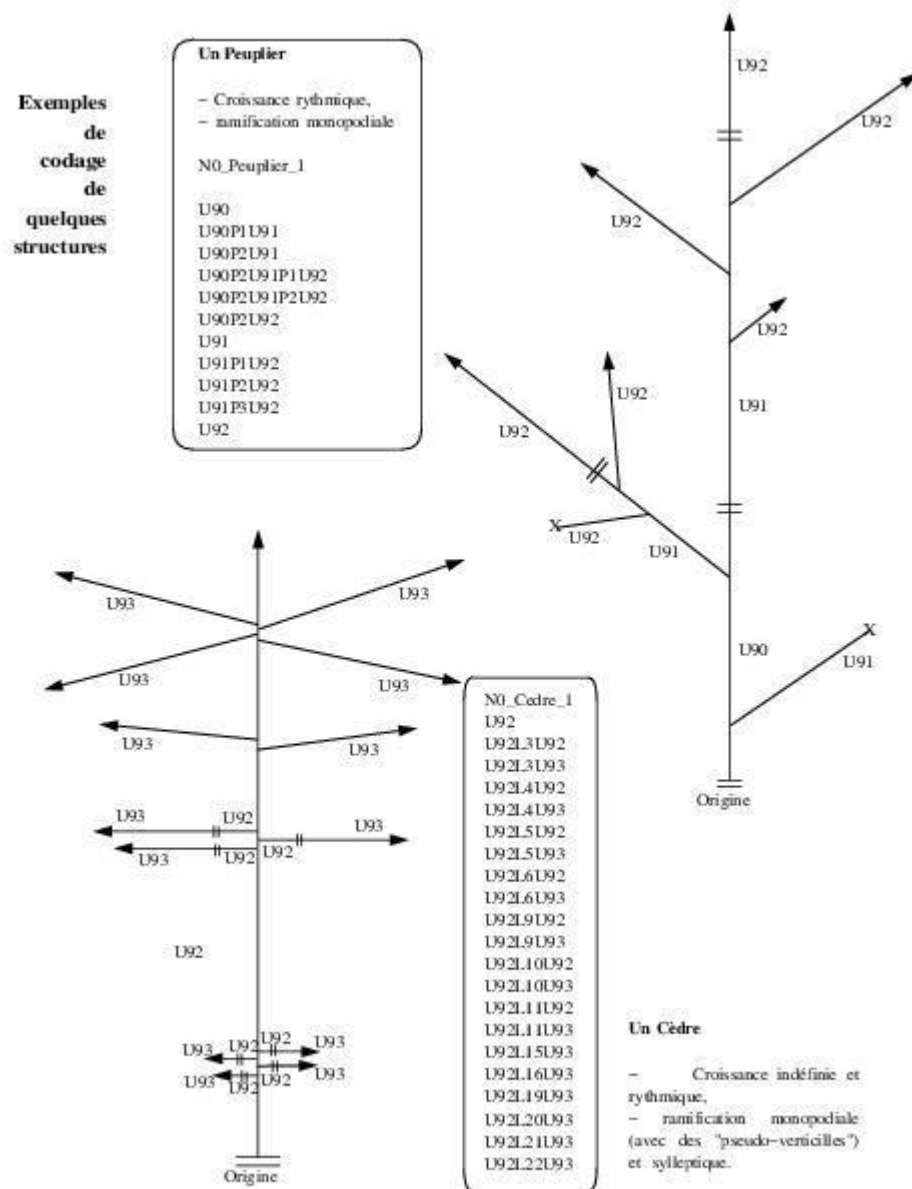


Figure 18 : exemples de codage de structures de peuplier et de cèdre.

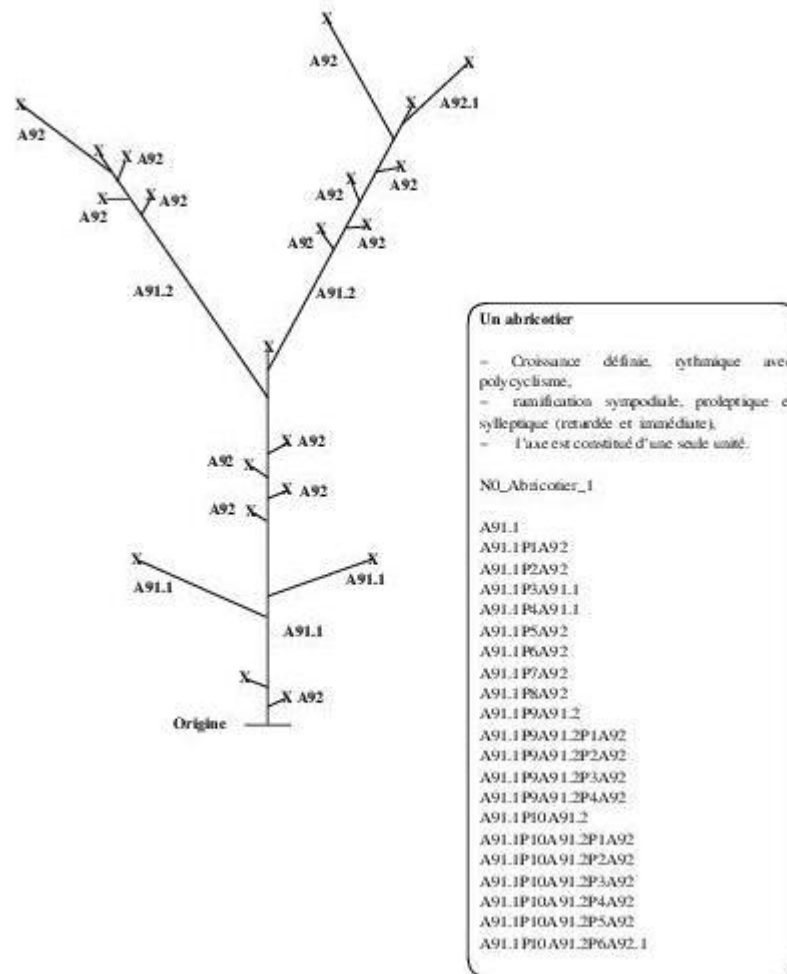


Figure 19 : exemple de codage de structures d'abricotier.

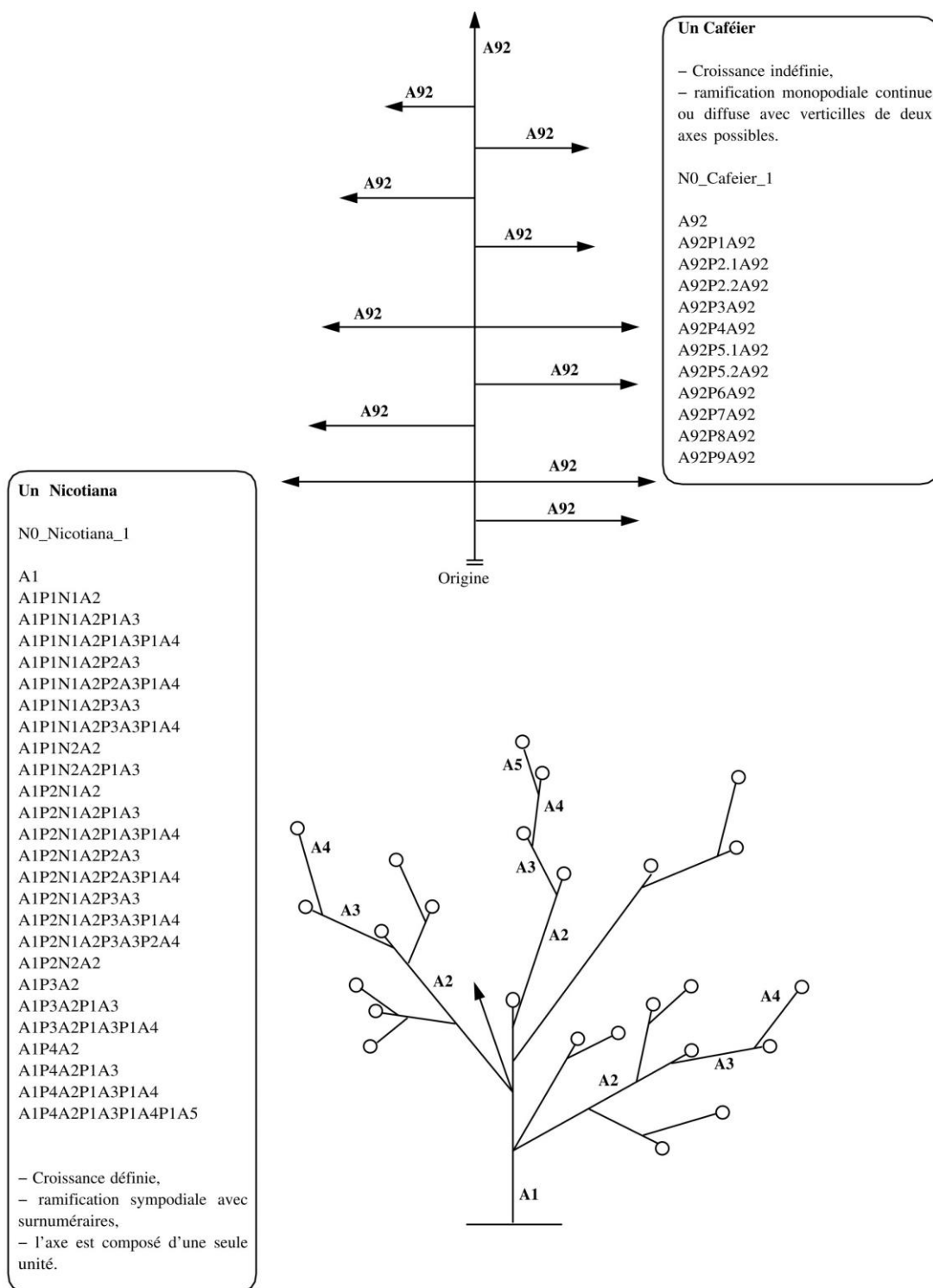


Figure 20 : exemples de codage de structures de caféier et de tabac décoratif.

Références bibliographiques

- BARTHELEMY D., 1988. *Architecture et sexualité chez quelques plantes tropicales : le concept de floraison automatique*. Th. Doct. 3^{ème} cycle, Univ. Montpellier II, 287p.
- FRANCON J., 1990. Sur la modélisation informatique de l'architecture et du développement des végétaux. In : 2^{ème} colloque international sur l'Arbre, Institut de Botanique, Montpellier, France. 10-15 septembre 1990/C. Edelin ed. *Naturalia Monspeliansia*, n° hors série, 1991, pp. 231-247.
- HALLE F. et OLDEMAN R.A.A., 1970. *Essai sur l'architecture et la dynamique de croissance des arbres tropicaux*. Masson, Paris, 178p.
- MICLET L., 1984. *Méthodes structurelles pour la reconnaissance des formes*. Eyrolles (éd.), Paris, 184p.
- REFFYE P. de, 1979. *Modélisation de l'architecture des arbres par des processus stochastiques. Simulation spatiale des modèles tropicaux sous l'effet de la pesanteur. Application au Coffea robusta*. Th. Doct. Etat, Univ. Paris-Sud Centre d'Orsay, 195p.