



Utilisation de connaissances expertes pour l'assemblage de programmes de simulation en agronomie

Pierre Martin, Pascal Clouvel, Philippe Reitz, Thérèse Libourel Rouge

► To cite this version:

Pierre Martin, Pascal Clouvel, Philippe Reitz, Thérèse Libourel Rouge. Utilisation de connaissances expertes pour l'assemblage de programmes de simulation en agronomie. RR-10018, 2010, pp.16. <lirmm-00495543>

HAL Id: lirmm-00495543

<https://hal-lirmm.ccsd.cnrs.fr/lirmm-00495543>

Submitted on 28 Jun 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Utilisation de connaissances expertes pour l'assemblage de programmes de simulation en agronomie

Pierre Martin^{*,**} — Pascal Clouvel^{**} — Philippe Reitz^{*} —
Thérèse Libourel^{*}

** Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier
Université Montpellier II / CNRS - UMR 5506
161, rue Ada, F-34392 Montpellier Cedex 5
{pmartin, libourel, reitz}@lirmm.fr*

*** CIRAD - Unité Propre de Recherche Système cultures Annuelles
Avenue Agropolis, F-34398 Montpellier Cedex 5
{pierre.martin, pascal.clouvel}@cirad.fr*

RÉSUMÉ. Le travail concerne l'assemblage de sous-systèmes biologiques pour accéder à une représentation fonctionnelle du système global, dans le cas d'interactions biologiques complexes (symbiose, etc.). La méthode proposée utilise l'énoncé de connaissances expertes décrites de façon littérale pour établir le programme d'interfaçage des sous-systèmes. L'utilisation de pronoms et adverbies interrogatifs confère un cadre formel à la production de graphes à partir des descriptions littérales. En matière de résultat, la méthode permet (i) d'accéder au vocabulaire du programme d'assemblage, (ii) d'identifier les fonctions de transformation à mettre en place, et (iii) livre la valence requise par les programmes pour assurer l'assemblage. D'un point de vue opérationnel, la démarche générique proposée est une construction théorique qui reste à valider dans des cas concrets d'application.

ABSTRACT. The work concerned the assembly of biological sub-systems to gain access to a functional representation of the overall system, in the case of complex biological interactions (symbiosis, etc.). The proposed method uses the statement of expert knowledge described in a literal way to establish the sub-system interface program. The use of interrogative pronouns and adverbs provides a formal framework to produce graphs from literal descriptions. In terms of results, the method enables (i) access to the vocabulary of the assembly program, (ii) identification of the transformation functions to be established, and (iii) an estimation of the valence required by programs to ensure assembly. From an operational perspective, the generic approach proposed is a theoretical construct that remains to be validated in concrete cases of application.

MOTS-CLÉS : système complexe, linguistique, graphe de connaissance, conception de systèmes d'information, simulation numérique, agro-écologie

KEYWORDS: complex system, linguistics, knowledge graph, information system design, numerical simulation, agro-ecology.

1. Introduction

Les sciences du vivant s'intéressent à des systèmes complexes dont le comportement n'a longtemps pu être approché que grâce à l'observation et l'expérimentation. A partir des années 1960, en agronomie, les premiers programmes heuristiques ont été développés afin d'améliorer la compréhension des mécanismes biologiques impliqués dans la croissance des plantes (Bouman, 1996). En sus d'une fonctionnalité dédiée à l'explication des mécanismes biologiques complexes, l'intérêt des programmes a rapidement été reconnu dans les domaines de l'extrapolation et de la prédiction. A partir des années 1980, l'idée d'accéder à de nouveaux savoirs par voie d'assemblage de programmes a donné naissance aux plateformes logicielles. L'hypothèse sous-jacente à la construction de telles plateformes est que l'assemblage de programmes de simulation de sous-systèmes permet d'accéder à la simulation du système global auquel ils participent. La plateforme DSSAT (Jones et al., 2003) permet par exemple, à partir d'une bibliothèque de composants « culture » (blé, soja, riz etc.), d'accéder à la dimension temporelle de l'évolution de la fertilité des sols sous l'effet des successions culturales. Avec SEAMLESS-IF (Brouwer et Ittersum, 2010), l'idée de plateforme est étendue à des constructions associant économie, sciences sociales et sciences du vivant. L'assemblage est appréhendé dans ces plateformes selon une relation binaire entre paires de programmes, établie au moyen d'une interface de liaison.

De nouvelles questions de recherche agronomiques conduisent à étudier des systèmes écologiques plus complexes. Le système biologique qui nous intéresse est celui des organismes fonctionnant de manière indépendante dans un contexte particulier, et pour lesquels une relation de dépendance s'instaure dès lors qu'ils sont mis en présence l'un de l'autre sur un substrat commun. Le domaine d'application est celui des bioagresseurs et des relations de parasitisme, symbiose, mutualisme etc. D'un point de vue informatique, ces considérations font émerger des questions nouvelles en matière de représentation de système complexe. Pris isolément, le fonctionnement de chaque organisme est appréhendé comme un sous-système et fait l'objet d'un programme de simulation numérique. La question abordée ici est celle de l'implémentation de la relation entre sous-systèmes pour reproduire le fonctionnement du système biologique global par voie d'assemblage de leurs programmes de simulation respectifs. Alors qu'au sein des plateformes logicielles évoquées ci-dessus, l'objet de l'interface de liaison est de faire dialoguer des programmes, l'opération d'assemblage des sous-systèmes biologiques requiert la construction d'un programme spécifique d'interfaçage.

Pour traiter la question, nous utilisons les connaissances expertes délivrées dans la bibliographie pour décrire l'assemblage des sous-systèmes biologiques. Les connaissances, énoncées au moyen du langage naturel, décrivent l'ensemble des actions correspondant chacune à une opération d'un système biologique sur un autre. La méthode que nous proposons consiste à (i) transcrire sous forme de graphe la description littérale de chaque action, en référence à des travaux de linguistique,

et (ii) composer ces graphes pour établir l'interface d'assemblage. L'hypothèse retenue dans la construction est que l'assemblage s'établit à partir d'une collection d'actions unitaires conduites par un sous-système sur un autre, et que la composition des actions permet de reproduire le fonctionnement du système dans sa globalité.

L'exemple choisi pour illustrer la méthode est celui de la relation mutualiste entre deux bioagresseurs de la vigne, un insecte *Lobesia botrana* et un champignon *Botrytis Cinerea*. D'un côté, la consommation du champignon favorise la croissance de l'insecte, et de l'autre, le champignon est transporté de manière active sous forme de spores (conidies) par l'insecte dans les grains de raisin, ce qui amplifie sa prolifération (Mondy et Corio-Costet, 2000). D'un point de vue théorique, l'accélération du cycle de l'insecte en lien avec la consommation d'une molécule (stérol) produite par le champignon amène à revisiter les considérations conventionnelles d'un temps linéaire ou lié à la température de l'air pour les végétaux ou les organismes poïkilothermes. La description littérale est produite à partir des travaux de Mondy et Corio-Costet (2000) et de Clouvel et al. (2008).

En préalable à la description des méthodes de transcription et d'établissement de l'interface présentées en section 3 et 4, une brève analyse des méthodes d'assemblage de programmes au sein des plateformes est présentée. Dans les constructions actuelles, les méthodes adoptées portent essentiellement sur la syntaxe de l'assemblage de programmes, et ne répondent pas à notre question qui est celle de l'assemblage des systèmes biologiques qu'ils implémentent. La conclusion et une perspective à nos travaux sont présentées en section 5.

2. L'assemblage dans les plateformes logicielles agronomiques

Le principe prévalant à la construction des plateformes logicielles en agronomie est celui de la réutilisation de supports génériques d'assemblages préexistants tels que MODCOM (Hillyer, 2003), OpenMI (Gregersen et al., 2007), ou VLE (Quesnel et al., 2009). Ces supports, élaborés dans le cadre du génie logiciel, fournissent les règles syntaxiques. Ces règles définissent l'ordre d'appel des programmes et permettent leur enchaînement à l'exemple de la relation client-serveur.

D'un point de vue sémantique, l'assemblage des programmes requiert la mise en coïncidence de leurs entrées/sorties, et s'effectue au moyen de métadonnées ou d'ontologies (Grüber, 1993). Les métadonnées sont établies par le collectif scientifique concepteur de chaque programme. Les ontologies sont élaborées en regard d'un vocabulaire « partagé » par la communauté scientifique ayant contribué à la construction des plateformes agronomiques. Martin (2009) montre que le vocabulaire établi ne permet pas de lever les questions de polysémie et de polyphonie inhérentes à des approches pluridisciplinaires.

3. Formalisation de la description littérale d'une action

Le langage naturel permet trois opérations fondamentales : décrire le monde, interroger sur le monde et changer le monde (Benveniste, 1966). L'interrogation occupe une place prépondérante dans les relations humaines (Kerbrat-Orecchioni, 1991). En effet, « l'interrogation suppose toujours une ignorance de la part du locuteur et une tension vers un état de connaissance » (Martin, 1985). L'interrogation est par conséquent l'opération fondamentale qui permet d'accéder à la description d'une action.

3.1. Le groupe fonctionnel comme support de description

Trois types d'interrogation sont permis par la langue française, global pour obtenir les conditions de vérité (réponse vrai/faux), alternatif pour proposer un choix de réponses (lequel, etc.) et partiel pour renseigner sur l'inconnu. Le type partiel porte sur un membre précis de l'énoncé et requiert en réponse un ensemble de mots formant une seule unité, le **groupe fonctionnel**. En mode direct, l'interrogation partielle se construit en remplaçant le groupe fonctionnel inconnu par un mot (i) dont la sémantique est partagée par tous les interlocuteurs et (ii) qui appelle une réponse spécifique (Kerbrat-Orecchioni, 2001). Par exemple, à la question « Où es tu ? », le groupe fonctionnel énoncé dans la réponse peut être « à la maison ».

Sept mots, pronoms ou adverbes, sont employés en Français, qui suffisent à questionner le monde (Gosselin, 1990). Le pronom « Qui » interroge sur l'identité, la détermination d'une personne (TLFi, 2009). Cette personne est de nature animée, fondamentalement un humain ou assimilée à l'humain (Gougenheim, 1950). Le pronom « Quoi » est porteur du genre inanimé (TLFi, 2009) et « interroge sur la nature, la détermination de quelque chose » (Larousse, 2003). Le pronom « Que » interroge sur quelque chose situé en complément d'objet direct ou attribut (Larousse, 2003). Les adverbes « Où », « Quand », « Comment », et « Pourquoi » requièrent respectivement en réponse un complément circonstanciel de localisation, de temporalité, de manière ou de raison (Gosselin, 1990). Vis-à-vis d'une phrase (ou action), les pronoms Qui, Quoi, Que interrogent respectivement sur les actants, le verbe, et les compléments d'objet. Touratier (2001) différencie le complément d'objet qui complète le verbe, appelé alors complément essentiel, de celui qui informe des circonstances ou complément circonstanciel. Le verbe et le complément essentiel constituent l'Acte (Mélis, 1983).

L'adjonction d'une préposition (à, pour, de, depuis, par, jusque, vers, etc.) au mot interrogatif permet de faire varier la portée de la question. Par exemple, à une question initiée avec l'adverbe « quand », la réponse attendue est un instant précis. L'adjonction de la préposition « depuis » transforme alors le statut de la réponse :

bien que ce soit un instant qui soit demandé, elle révèle une prolongation dans le temps de l'action (Maingueneau, 1994).

3.2. La structure de groupe fonctionnel

Selon Robert Martin (2002), la langue « repose sur le principe de classification et de hiérarchie ». Les types de réponse possible à une interrogation amènent donc à proposer une structure organisée de description d'un groupe fonctionnel. Une étude comparative des typologies de chaque groupe fonctionnel disponible dans la littérature permet à Pierre Martin (2009) d'identifier des traits communs. L'auteur distingue les éléments informatifs, la situation relative de ces éléments informatifs en regard d'un référentiel, et le sens effectivement véhiculé par les éléments informatifs. Trois regroupements en classes sont donc proposées, appelées respectivement Information (CI), Référentiel (CR) et Sémantique (CS). Dans l'exemple « les larves (insecte) acheminent les conidies (champignon) dans les grains de raisin de la vigne, dont elles se nourrissent », à la question de la localisation de l'acte de transport produit par les chenilles, la réponse est « dans les grains de raisin de la vigne, dont elles se nourrissent ». L'élément informatif est « les grains de raisin », le référentiel est « la vigne », et la sémantique est « dont elles se nourrissent », c'est-à-dire un aliment.

Pour CI, une structure commune à tous les groupes fonctionnels est identifiée (Martin, 2009). Celle-ci différencie l'élément permanent de la chaîne d'éléments, appréhendée selon une séquence : initial, médian (dont la longueur varie de 0 à n, et $n > 0$), et final (Figure 1). A titre d'illustration, les notions de déplacement (Hadermann, 1993) et de temporalité (Declerck, 1997) composent respectivement les chaînes de lieu initial/médian/final et de durée début/en cours/fin.



Figure 1. Organisation générale de la classe Information (GI) : typologie de la structure (à gauche) et structure de la chaîne (à droite).

Pour CS, Martin (2009) observe une récurrence du caractère discriminant intrinsèque/extrinsèque dans les diverses typologies recensées (figure 2). Pour la localisation, par exemple, Hadermann (1993) distingue le lieu dont la sémantique est propre à lui-même (intrinsèque), tel que le toponyme, du lieu dont la sémantique découle des autres lieux (extrinsèque), tel que l'élément topologique. Pour la Temporalité, Grenier (2001) différencie le temps historique (extrinsèque), pour

lequel « le contenu de chaque instant dépend du contenu de chacun des instants qui l'ont précédé », du temps physique correspondant à un système de mesure du temps universel auto-signifiant (intrinsèque).

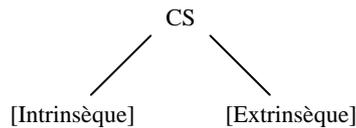


Figure 2. Organisation générale de la classe Sémantique (CS).

Pour CR, les typologies n'ont pas toutes été établies pour tous les groupes fonctionnels. À partir des typologies disponibles, Martin (2009) n'est pas parvenu à mettre en évidence une organisation commune. Pour continuer sur les exemples de localisation et de temporalité, Hadermann (1993) s'intéresse au référentiel dans le cas d'une pluralité de localisation et s'interroge sur le lien existant entre ces lieux. Le référent étant le lieu dont on parle, le référentiel est le lieu qui permet de situer le référent. Pour la Localisation, deux relations sont décrites, à savoir l'inclusion et le voisinage. L'inclusion correspond à la relation contenant/contenu, et s'explique en énonçant le contenant. Le voisinage requiert la spécification (i) des éléments voisins composant le référentiel et (ii) des liens entre le référent et les éléments du référentiel ('la maison située au bord de la mer' par exemple). Pour la temporalité, dans la mesure où la question se pose de savoir si c'est le temps qui se déplace ou si c'est nous qui nous déplaçons par rapport à lui (Fillmore, 1997), la question du référentiel est complexe. En effet, la perception du temps est de diverses natures (Mascherin, 2008) : le « temps Universel » s'écoule en dehors de l'existence de l'homme ; le « temps Conventionnel » est partagé par une communauté d'individus, et mesuré au moyen d'outils (horloge, etc.); enfin, le « temps Individuel » correspond à une perception personnelle du temps conventionnel. Ceci amène à considérer un référentiel lié à la nature du temps considérée.

Sur la figure n°3, la structure multi-niveaux du groupe fonctionnel apparaît décomposée en classes, chacune constituée d'éléments reliés par une relation (ordre, subsomption, voisinage etc.). Pour introduire une relation entre classes, Martin (2009) propose d'instaurer une relation de projection des éléments de la classe Information sur des éléments des classes Référentiel et Sémantique (figure 3). À titre d'illustration, dans la phrase « La vigne en tant qu'hôte fournit aux larves les nutriments nécessaires à leur développement dont les stérols », l'élément consommé est 'les stérols', le référent de l'élément consommé est la vigne auquel il est relié par une relation d'inclusion. En terme de sémantique, l'élément 'les stérols' est extrinsèque à la larve (l'insecte).

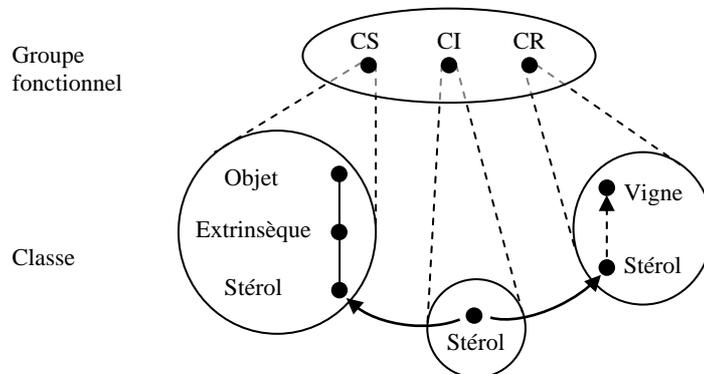


Figure 3. Description multi-niveaux d'un groupe fonctionnel. Exemple de projection de l'élément 'stérols' redevables de la classe Information (CI) dans les classes Référentiel (CR) et Sémantique (CS).

3.3. L'organisation des groupes fonctionnels pour décrire une action

Différentes notions de grammaires préparent à l'assemblage des groupes fonctionnels. Dans le cadre de la syntaxe structurale, (Tesnière, 1988) appréhende le verbe comme le descripteur d'un état ou d'une action. Le verbe d'état exprime une manière d'être, caractérisée par une qualité ou une position, et le verbe d'action une activité (courir, contaminer...). L'auteur qualifie le verbe selon le nombre d'actants qui lui sont adjoints, c'est-à-dire sa valence. Les verbes avalents ne requièrent pas la présence d'un actant, et leur valence est alors de zéro. Dans ce cas, le verbe est uniquement employé à la troisième personne du singulier ('il pleut'). Pour les autres verbes, la valence prend pour valeur 1 ('je cours'), 2 ('je mange une pomme') ou 3 ('je te donne une pomme').

Par ailleurs, Lazard (1994) analyse les constructions syntaxiques comportant zéro, un, deux ou trois actants (sans actant, uni-actancielle, bi-actancielle et tri-actancielle). Dans son analyse, l'auteur oppose l'agent, celui qui agit (agent, destinataire, etc.), à l'objet, « correspondant au patient dans les phrases d'action et à ceux qui sont traités de même dans les autres types de phrases ». Dans les constructions tri-actancielles, comme par exemple, 'il lui donne la pomme', 'lui' est considéré comme un agent périphérique (complément de direction). Ce formalisme permet d'appréhender une construction tri-actancielle sous une forme bi-actancielle. Dans les constructions sans actant ('il pleut'), l'actant ('il') ne peut être explicité par aucun substantif, et est donc dépourvu de contenu sémantique. Il est alors qualifié de « vide » et la construction est décrite sous la forme d'une uni-actancielle. Ce travail permet de distinguer les trois groupes fonctionnels d'Agent, d'Acte et d'Objet auxquels s'ajoutent les compléments circonstanciels de Temporalité, de Localisation, de Manière et de Raison.

En grammaire, l'incidence est définie comme la relation de ce qui est dit à ce qui est parlé (Ilinski, 2003). Ce principe, énoncé par (Guillaume, 1973), met en rapport au sein de la phrase le support, qui est ce dont on parle, de l'apport, qui est ce qui est dit. Ce principe formalise d'une manière prédicative le mécanisme établissant les liens entre les mots au sein de la phrase. Appliqué aux groupes fonctionnels, ce principe appréhende (i) l'agent comme l'élément support de l'action, complété par les autres éléments (les apports), (ii) l'Acte comme incident à l'agent et (iii) les circonstants comme incidents à l'acte. Dans le cas d'une construction bi-actancielle, l'objet est incident à l'acte. Exprimé sous forme de graphe (Figure 4a), l'utilisation du principe d'incidence conduit à formuler une action de la façon suivante : l'Agent commet un Acte subi par l'Objet, cet Acte se produisant dans une Localisation et une Temporalité particulières, pour une Raison particulière et selon une certaine Manière.

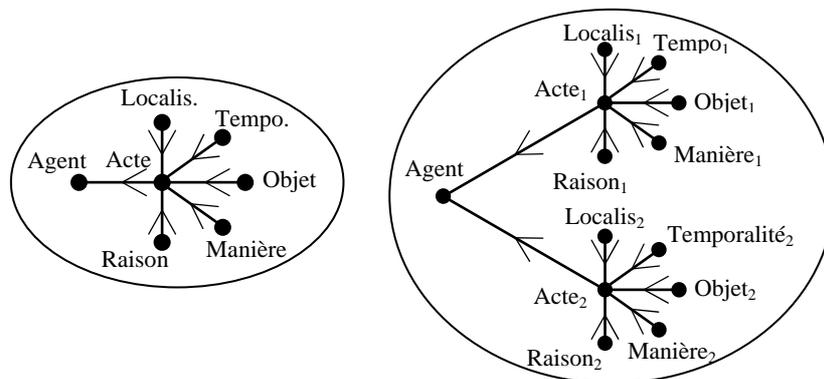


Figure 4. Représentation, sous forme de graphe, d'une action conduite par un agent sur un objet (à gauche), et sur deux objets simultanément (à droite).

Enfin, dans son analyse morphosyntaxique du circonstant de manière, El Hasnaoui (2008) distingue deux constructions syntaxiques selon que le circonstant est incident au verbe ou au sujet de la phrase. Dans la première construction, le circonstant est incident au verbe. Les termes adoptés sont alors soit de l'ordre du faire, comme par exemple 'il rentra par curiosité', soit de l'ordre du moyen utilisé pour faire, comme 'enfoncer un clou avec un marteau'. Dans la seconde construction, le circonstant est incident au sujet. Cette situation s'applique lorsque le circonstant est construit au moyen de la préposition en + gérondif, comme par exemple 'il travaille en chantant', ou de la préposition par + infinitif, comme dans 'j'ai fini par dire oui'. « Deux actes sont alors menés de front par le même sujet, sans lien logique entre les deux. Il s'agit d'une relation de simultanéité » (El Hasnaoui, 2008). Vis-à-vis des groupes fonctionnels, ces deux constructions syntaxiques permettent de différencier l'acte « série » commis par un Agent sur un

Objet, de l'Acte « Parallèle » commis par un Agent sur deux Objets simultanément (figure 4b).

A titre d'illustration, une des actions de la relation mutualiste entre les bioagresseurs de la vigne est décrite de la manière suivante :

En l'absence de B. cinerea (le champignon), les larves de L. botrana (l'insecte) se nourrissent des grains de raisin sur lesquels ils provoquent des dégâts, i.e. des lésions de la cuticule protectrice des grains et des galeries dans les grains. La vigne en tant qu'hôte fournit aux larves les nutriments nécessaires à leur développement dont les stérols. La composition en nutriments varie en fonction du stade du grain de raisin et du climat de la vigne » (Action A).

Pour cette action, la réponse à la question « Qui fait Quoi » est « la larve consomme les stérols produits par la vigne ». Dans cette réponse, l'Agent est 'la larve', l'Acte 'la consommation', et l'Objet 'les stérols de la vigne'. L'Agent et l'Objet sont des éléments permanents de cette action. Pour l'Objet, 'les stérols' est l'élément de la classe Information et 'Vigne' est l'élément Référentiel de 'les stérols', relié au moyen d'une relation d'inclusion (figure 3). A la question « Quand est-ce que qui fait quoi ? », la réponse est « le stade du grain de raisin et le climat de la vigne » qui correspond au groupe fonctionnel de temporalité. Le climat de la vigne et le grain de raisin sont représentés par deux éléments notés respectivement Climat_vigne et Stade_G_raisin dans la classe Information. Ces deux éléments s'inscrivent dans la durée (cf. § 2.2), et sont reliés au moyen d'une relation associative (Et logique). Les éléments des classes Information et Référentiel des groupes fonctionnels de Localisation, Manière et Raison sont obtenus en utilisant le même type de questionnement que celui adopté pour la temporalité.

Pour la classe Sémantique des groupes fonctionnels, l'Agent est nécessairement intrinsèque à lui-même vis-à-vis de l'Action. Dans l'illustration, l'Agent 'larve' est donc qualifié d'intrinsèque. Par contre, l'Objet 'les stérols', produits par la vigne, est extrinsèque vis-à-vis de l'Agent 'larve'. De la même façon, vis-à-vis de la temporalité, les éléments 'Climat_vigne' et 'Stade_G_Raisin' sont extrinsèques à l'Agent larve. Dans le graphe de la classe Sémantique présenté en figure 5, le sommet correspond à la Temporalité, les premiers nœuds à la discrimination intrinsèque/extrinsèque établie par Martin (2009), les nœuds suivants à la distinction entre temps physique et temps historique avancée par Grenier (2001). Les derniers nœuds correspondent aux éléments des CI.

Dans la construction proposée, la classe Sémantique (CS) est organisée selon un graphe de termes reliés au moyen de relations (subsomption, etc.). La nature du groupe fonctionnel (Localisation, temporalité, etc.) correspond au sommet du graphe. Les nœuds suivants correspondent aux classifications et hiérarchies établies en linguistique (cf. § 2.2). Les nœuds de niveau inférieur correspondent aux éléments de la classe Information (CI).

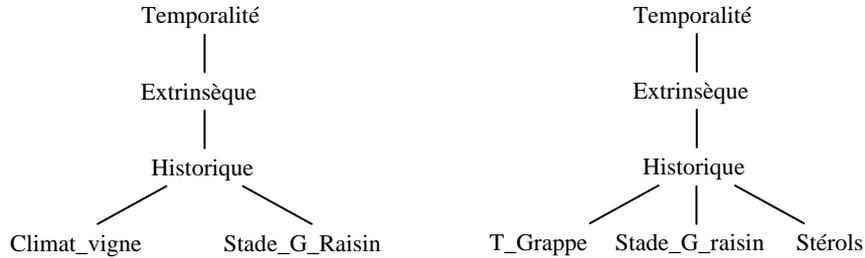


Figure 5. Graphe de la classe Sémantique du groupe fonctionnel de Temporalité de l'action A (à gauche) et de l'action B (à droite).

4. Etablissement de l'interface d'assemblage

4.1. Les concepts de l'assemblage de programmes

Les concepts directeurs de l'assemblage de programmes ont été énoncés très tôt en cybernétique. Dans cette discipline, les éléments sont appréhendés sous la forme de briques élémentaires bipolaires, c'est-à-dire disposant d'un jeu d'entrées et de sorties. Chaque brique est caractérisée par une valence (Martin, 2009), c'est-à-dire un nombre de fonctions exécutables par une source extérieure. Une brique constituée de N fonctions exécutables est multivalente (valence de N).

La valence intervient dans l'explicitation de l'ordre d'appel des briques. Selon (Klir et Valach, 1967), deux types de relations fondamentales permettent de spécifier l'ordre d'appel : la série et le parallélisme. Par relation, les auteurs entendent un lien orienté dont la source est située en sortie d'une brique et le but en entrée d'une autre brique. Vis-à-vis des fonctions exécutables des briques, la source du lien orienté se situe à la fin de l'exécution d'une fonction d'une brique donnée, et le but correspond à l'appel d'une fonction de la brique suivante. Les différentes combinaisons de relations permettent de disposer de dix huit formes possibles d'interrelations entre deux briques monovalentes, c'est-à-dire ne disposant que d'une seule fonction exécutable (Klir et Valach, 1967). Du point de vue sémantique (signification), la relation orientée correspond au concept d'action exercée par une brique sur la suivante. A ces 2 types de relations fondamentales (série et parallélisme) peuvent être associées l'action, l'interaction, la rétroaction et le parallélisme (Le Moigne, 1977) selon les schémas de mise en interrelation présentés en Figure 6.

En ce qui concerne la bipolarité, l'instauration d'une relation entre deux briques a pour objet de transmettre des données (au sens large) entre ces briques. La transmission demande que soit établie la correspondance entre les entrées/sorties des

briques. Cette opération s'effectue en regard d'un vocabulaire partagé par les briques.

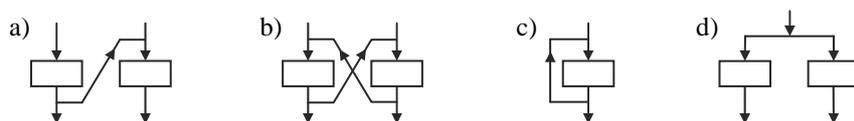


Figure 6. Exemple d'interrelation, d'après (Le Moigne, 1977), résultant de la mise en relation de deux briques monovalentes : action (a), interaction (b), rétroaction (c), et parallélisme (d).

4.2. Vocabulaire de l'interface d'assemblage

Par vocabulaire, s'entend ici un recueil de termes utilisés pour désigner les éléments et en conférer un sens clair vis-à-vis de l'usage. Les classes Information et Référentiel des groupes fonctionnels ont pour rôle respectif d'énoncer et de renseigner un élément, alors que celui de la classe Sémantique est d'en préciser le sens. Pour rappel, la classe Sémantique (CS) est organisée selon un graphe constitué (i) de la nature du groupe fonctionnel en sommet, (ii) des classifications et hiérarchies établies en linguistique en ordre inférieur, et (iii) des éléments de la classe Information (figure 3).

Le vocabulaire de l'interface d'assemblage est établi en effectuant la somme disjointe des graphes des classes Sémantiques (figure 7). Dans l'objectif de préciser le sens des termes relatifs aux éléments des classes Information, le vocabulaire est enrichi par généralisation successive des termes. Cette opération de généralisation demande au spécialiste du domaine considéré (agronomie par exemple) d'identifier des propriétés partagées des termes.

Dans la figure 5, sont montrés les graphes des classes sémantiques des groupes fonctionnels de temporalité de l'action A et de l'action B, dont la description littérale est :

L. botrana (l'insecte) présente 5 stades larvaires successifs, au terme desquels l'insecte se transforme en chrysalide puis en adulte ailé. La durée des stades larvaires varie avec la température ambiante (celle des grappes consommées) et leur alimentation, en lien avec le stade de développement des grains de raisin. La consommation supplémentaire de stérols d'origine fongique se traduit par une réduction de la durée de vie larvaire.

La réunion des deux temporalités présente quatre termes : 'Climat_vigne', 'T_Grappe', 'Stérol', et 'Stade_G_Raisin' commun aux deux graphes. Ces termes correspondent aux feuilles du graphe de vocabulaire de temporalité construit pour décrire la relation mutualiste dans son intégralité (Martin, 2009). Le terme 'climat_grappe' est introduit par généralisation de température (T_grappe) et

humidité (Hum_grappe) des grappes de raisin. Le terme 'climat', également introduit, rassemble le 'climat_vigne' et le 'climat_grappe', correspondant respectivement à l'environnement général de la plante et au climat local de la grappe. Vis-à-vis des actions A et B, la temporalité 'historique' (Grenier, 2001) regroupe ici le 'climat', ainsi que les 'stérols' et le 'stade_G_raisin' par l'intermédiaire respectif des termes 'Nutriment' et 'Phénologie_vigne' introduits pour en préciser le sens.

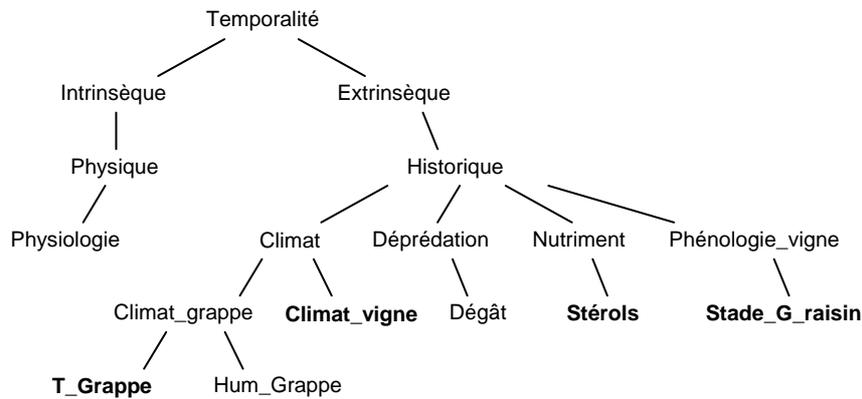


Figure 7. Vocabulaires du groupe fonctionnel de Temporalité. Les termes figurant en caractère gras correspondent aux actions A et B.

4.3. Interface d'assemblage de programmes

Pour l'assemblage des sous-systèmes biologiques, l'action s'établit comme l'opération produite par un sous-système sur un ou plusieurs autres, indépendamment de la façon dont ils sont implémentés dans les programmes. En cohérence avec le principe d'incidence énoncé plus haut (Guillaume, 1973), l'action indique « Qui » du sous-système biologique Agent « fait Quoi » sur le sous-système Objet, selon les circonstances indiquées dans les groupes fonctionnels de Localisation, Temporalité, Manière et Raison. Chaque classe joue un rôle particulier dans l'assemblage des sous-systèmes. La classe Information (CI) comporte les éléments des sous-systèmes impliqués dans l'action. La classe Sémantique (CS) comporte la sémantique des éléments de CI en regard de l'action produite. D'après le principe d'incidence, la sémantique est caractérisée comme intrinsèque dans le cas où l'élément fait partie du sous-système biologique Agent, et extrinsèque dans l'autre cas. Enfin, la classe Référentiel situe l'élément du sous-système biologique par rapport à un référent de l'action.

L'action est le support de construction de l'interface d'assemblage des programmes. Celle-ci correspond à une fonction de transformation des éléments des

CI Agent et Objet, qu'il s'agit d'implémenter dans l'interface d'assemblage. L'action renseigne sur l'ordre d'exécution des programmes pour la prise en compte des modifications produites par la fonction de transformation. Toujours en vertu du principe d'incidence (Guillaume, 1973), le programme indiqué par l'Objet est exécuté après celui indiqué par l'Agent. La conduite d'un acte par un Agent sur un Objet correspond à l'établissement de la relation série entre les programmes. La conduite simultanée de deux actes ou plus, correspond à la relation parallèle entre les programmes. Une construction uni-actancielle, correspond à la relation série du programme sur lui-même, et donc à la rétroaction. Une construction bi-actancielle, dans laquelle les éléments indiqués dans les groupes fonctionnels Agent et Objet sont redevables du même système biologique, correspond également à la rétroaction. Enfin, l'action spécifie les données requises en entrée de la fonction de transformation. Toujours selon le principe d'incidence (Guillaume, 1973), les données correspondent aux éléments indiqués dans les classes Information des groupes fonctionnels de Localisation, de Temporalité, de Manière et de Raison.

Pour revenir sur l'illustration, la description littérale de la relation mutualiste comporte dix actions unitaires (figure 8). Les actions A et B correspondent respectivement à l'action du programme 'insecte' sur le programme 'vigne' (consommation) et à la rétroaction du programme insecte sur lui-même.

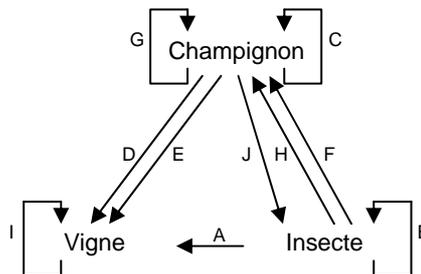


Figure 8. Actions à instaurer entre les programmes champignon, insecte et vigne pour représenter la relation mutualiste.

La composition des actions correspond à la composition des fonctions de transformation au sein de l'interface d'assemblage. Le nombre d'opérations nécessaires à la prise en compte des modifications induites par les fonctions de transformation spécifie la valence maximale requise pour chaque programme vis-à-vis de l'assemblage. D'après la figure 8, la valence maximale requise respectivement par les programmes champignon, vigne et insecte pour représenter la relation mutualiste des deux bioagresseurs sur vigne est de 4, 4 et 2.

5. Conclusion

Le travail présenté concerne l'assemblage de sous-systèmes biologiques pour accéder à une représentation fonctionnelle du système global, établi dans le cadre d'interactions biologiques complexes (symbiose, mutualisme etc.). La méthodologie développée utilise l'énoncé de connaissances expertes décrites de façon littérale pour établir un programme d'interfaçage des sous-systèmes considérés. S'agissant d'un exercice d'informatique appliqué, la méthode ne remet pas en cause la teneur des connaissances expertes utilisées. Alors que de façon usuelle en agronomie, l'informatique intervient a posteriori pour assembler des programmes, la question traitée de l'assemblage amène l'informatique à intervenir en amont de la production des règles logico-mathématique (équations dérivées partielles...) composant les programmes numériques.

Dans la construction proposée, l'utilisation de la production scientifique des experts pour construire l'interface permet de préserver les savoirs biologiques mis en œuvre pour produire l'assemblage. L'utilisation de description littérale permet en outre, de façon analogue à une documentation logicielle, de revisiter la construction à l'aune de nouvelles connaissances scientifiques dans le domaine de la recherche, en perpétuelle évolution. Pour aborder la description littérale de l'assemblage, l'utilisation du corpus de pronoms et adverbess interrogatifs permettant de 'renseigner sur le monde' (Benveniste, 1966) confère un cadre formel à la production des graphes. Ce cadre impose de la part des experts de renseigner l'ensemble des groupes fonctionnels. En ce sens, la méthode repose sur l'établissement de l'interdisciplinarité entre informatique et sciences du vivant.

En matière de résultat, la méthodologie proposée permet d'accéder au vocabulaire du programme d'assemblage. Ce vocabulaire est établi par nature de groupe fonctionnel, ce qui permet de préciser le sens de chaque terme vis-à-vis de l'usage, et en particulier le temps et l'espace qui sont fondamentaux dans les approches écologiques. Le cas des 'stérols' dans l'illustration met bien en lumière l'intérêt de la méthode pour faire émerger des représentations non usuelles de la temporalité. Par construction, la sémantique d'un terme donné est précisée en regard de la composition des termes situés en amont dans le graphe de vocabulaire. L'intérêt de cette construction est de lever les questions de polysémie et de polyphonie (Ducrot et Schaeffer, 1999) inhérentes à l'usage de termes redevables de champs disciplinaires ou de contextes différents.

Du point de vue de la syntaxe du programme d'assemblage, la méthode permet également d'accéder aux données requises en entrée des fonctions de transformation. De plus, l'information relative à la valence livre un pré-requis en matière de structure des programmes unitaires pour réaliser l'assemblage. Bien qu'en théorie, la démarche s'inscrit dans la réutilisation de programmes existants, une information est délivrée sur les modifications syntaxiques à entreprendre.

D'un point de vue opérationnel enfin, la démarche générique proposée reste une construction théorique. La méthode et l'hypothèse sous-jacente quant-à la

décomposition de la relation biologique en une composition d'actions unitaires d'un sous-système sur les autres reste à vérifier.

6. Bibliographie

- Benveniste E., *Problèmes de linguistique générale - I*, Gallimard, 1966.
- Bouman B., van Keulen H., van Laar H.H., Rabbinge R., The "school of de Wit" crop growth simulation models: a pedigree and historical overview, *Agricultural systems*, vol. 52, 1996, p. 171-198.
- Brouwer F.M., Ittersum M.v., *Environmental & agricultural modelling: integrated approaches for policy impact assessment*, Springer, 2010.
- Clouvel P., Bonvarlet L., Martinez A., Lagouarde P., Dieng I., Martin P., Wine contamination by Ochratoxin A in relation to vine environment, *International Journal of Food Microbiology*, vol. 123, n°1, 2008, p. 74-80.
- Declerck R., *When-clauses and temporal structures*, Routledge, London, 1997.
- Ducrot O., Schaeffer J.M., *Nouveau dictionnaire encyclopédique des sciences du langage*, Editions du Seuil, Paris, 1999.
- El Hasnaoui A.R., Le circonstant de manière, Thèse de doctorat, Université Paris VI – Sorbonne, 2008.
- Fillmore C.J., *Lectures on Deixis*, Center for the Study of Language and Information, 1997.
- Gosselin L., Les circonstanciels : de la phrase au texte, *Langue Française*, vol. 86, n°1, 1990, p. 37-45.
- Gougenheim G., Animé et inanimé – A propos de qui interrogatif et qui relatif prépositionnel, *Le Français Moderne*, Tome 18, 1950, p. 6-16.
- Gregersen J.P., Gijssbers P.J.A., Westen S.J.P., OpenMI: Open modelling interface, *Journal of Hydroinformatics*, vol. 9, n°3, 2007, p. 175-191.
- Grenier J.Y., Grignon C., Menger P.M., *Le modèle et le récit*, Ed. de la Maison des sciences de l'homme, Paris, 2001.
- Grüber T.R., A Translation Approach to Portable Ontology Specifications, *Knowledge Acquisition*, vol. 5, n°2, 1993, p. 199-220.
- Guillaume G., *Leçons de linguistiques 1948-1949 (série A, B et C)*, Presses de l'Université Laval, 1973.
- Hadermann P., *Etude morphosyntaxique du mot où*, Edition Duculot, Paris-Louvain-la-neuve, 1993.
- Hillyer C., Bolte J., van Evert F., Lamaker A., The ModCom modular simulation system, *European Journal of Agronomy*, vol. 18, n° 3, 2003, p. 333-343.
- Ilinski K., Les degrés de l'incidence, *Le Français Moderne*, vol. 71, n°1, 2003, p. 52-67.

- Jones J.W., Hoogenboom G., Porter C.H., Boote K.J., Batchelor W.D., Hunt L.A., Wilkens P.W., Singh U., Gijsman A.J., Ritchie J.T., The DSSAT cropping system model, *European Journal of Agronomy*, vol. 18, 2003, p. 235-265.
- Kerbrat-Orecchioni C., *La question*, Presses Universitaires de Lyon, 1991.
- Kerbrat-Orecchioni C., *Les actes de langage dans le discours*, Nathan, Paris, 2001.
- Klir G.J., Valach M., *Cybernetic modeling*, (trad. anglaise 1967), SNTL, Prague, 1965.
- Larousse, *Le petit Larousse Grand Format*, 2003.
- Lazard G., *L'actance*, Paris, Presses Universitaires de France, 1994.
- Le Moigne J.L., *La théorie du système général*, Presses Universitaires de France, Paris, 1977.
- Maingueneau D., *L'énonciation en linguistique française*, Hachette – les fondamentaux, 1994.
- Martin P., L'assemblage de programmes au sein de plateformes logicielles : Syntaxe, sémantique et Pragmatique. Application aux plateformes dédiées aux simulations en agronomie, Thèse de doctorat, Université de Montpellier, 2009.
- Martin R. L'interrogation comme universel du langage, *actes du colloque Linguistica Palatina Colloquia II -l'interrogation*, 19-20 décembre 1983, Paris, Presses de l'Université de Paris-Sorbonne, p. 257-284, 1985.
- Martin R., *Comprendre la linguistique*, Presses Universitaires de France, Paris, 2002.
- Mascherin L., Analyse morphosémantique de l'aspectuo-temporalité en Français. Le cas du préfixe RE-, Mémoire de Doctorat, Université Nancy II, 2008.
- Mélis L., *Les circonstants et la phrase*, Presses Universitaires de Louvain, 1983.
- Mondy N., Corio-Costet M.F., The response of the grape berry moth (*Lobesia botrana*) to a dietary phytopathogenic fungus (*Botrytis cinerea*): the significance of fungus sterols, *Journal of Insect Physiology*, vol. 46, 2000, p. 1557-1564.
- Quesnel G., Duboz R., Ramat E., The Virtual Laboratory Environment – An operational framework for multi-modelling, simulation and analysis of complex dynamical systems, *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 17, n°4, 2009, p. 641-653.
- Tesnière L., *Eléments de syntaxe structurale*, Ed. Klincksieck, Paris, 1988.
- TLFi, *Trésor de la Langue Française informatisé - 1971-1994*, <http://atilf.atilf.fr/>, 2009.
- Touratier, C., *Adverbe et Circonstant*, Publications de l'Université de Provence, 2001.