

# 6

## Conclusion générale

### Résumé

---

Nous donnons ici une vision synoptique de nos travaux en insistant sur les apports de cette thèse. Nous pouvons les résumer ici :

- rapprochement du paradigme d’agents et de la formalisation des systèmes dynamiques,
- formalisation DEVS du couplage d’un SMA réactif situé avec un système d’équations différentielles,
- élaboration d’un *framework* opérationnel pour l’intégration de modèles hétérogènes avec définition d’applications XML pour la description et l’échange des modèles,
- mise au point d’une méthode pour simuler le transfert d’échelles entre différents niveaux d’organisation,
- application de cette méthode en écologie marine pour montrer les relations entre la nutrition individuelle et la dynamique globale d’une population de copépoде.

Des perspectives intéressantes se sont dégagées de ce travail. Nous avons commencé l’exploration de certaines d’entre elles.

---

### Sommaire

---

<b>6.1</b>	<b>Synoptique de nos travaux . . . . .</b>	<b>166</b>
<b>6.2</b>	<b>Apports de cette thèse . . . . .</b>	<b>166</b>
<b>6.3</b>	<b>Perspectives . . . . .</b>	<b>167</b>

---

## 6.1 Synoptique de nos travaux

La problématique de fond de cette thèse est de savoir comment intégrer, c'est-à-dire coupler, des modèles hétérogènes. Le but d'une telle intégration est la modélisation et la simulation des systèmes dynamiques complexes. En accord avec Fishwick [Fis95] ou encore H. Vangheluwe [VLM02], nous pensons que la multi-modélisation apporte une réelle plus-value en terme de description de systèmes. Cette description « augmentée » peut permettre en retour de mieux comprendre certains aspects des systèmes dynamiques modélisés. Pour traiter de cette question, nous avons choisi trois thèmes :

1. l'intégration formelle,
2. l'intégration opérationnelle,
3. l'utilisation d'un modèle couplé en écologie marine.

Dans le premier thème, nous traitons de la multi-modélisation sur le plan formel. Des travaux existent dans ce domaine où le formalisme DEVS joue un rôle central comme cadre d'intégration formelle. Nous avons traité cette question en considérant un modèle d'agents réactifs couplé avec un système d'équations différentielles. Pour cela, nous avons dû spécifier notre SMA et le simulateur du système d'équations différentielles totalement en DEVS. Ce formalisme intègre les notions de couplage et de décomposition hiérarchique. Nous disposons alors d'un modèle couplé formalisé à différents niveaux d'abstraction.

Dans le deuxième thème, nous nous sommes intéressés à la définition d'un *framework* pour l'intégration de modèles hétérogènes. Pour définir ce *framework*, nous avons intégré certains des concepts utilisés dans HLA ou encore dans DEVS-Bus. Nous reprenons notamment la logique des simulateurs abstraits. Nous avons défini quatre niveaux d'abstractions différents pour notre *framework* (opérationnel, simulation, modèle et sémantique). Des solutions sont proposées pour chacun d'eux.

Dans le troisième thème, nous couplons un modèle d'agents réactifs simulant le comportement alimentaire d'un copépode se nourrissant de phytoplancton avec un modèle classique d'équations différentielles simulant une interaction proies-prédateurs. Ce travail illustre tout l'intérêt des réflexions menées dans les autres thèmes. Nous montrons qu'il est possible de considérer dans un même modèle et dans une même simulation le comportement d'individus, les interactions discrètes entre proies et prédateurs et la dynamique globale des populations.

## 6.2 Apports de cette thèse

Pour mettre en évidence les apports de cette recherche, nous reprenons ici les trois thèmes mentionnés plus haut.

À l'intérieur du premier thème, nous avons rapproché le paradigme des SMAS de la théorie de la modélisation et de la simulation telle qu'elle est définie par B.P. Zeigler *et. al.* [ZKP00]. Cette théorie propose le formalisme DEVS comme cadre intégrateur pour la spécification de systèmes. Nous avons donc proposé une analogie des SMAS réactifs situés vers DEVS. Il existait déjà des formalisations DEVS de SMAS mais, à notre connaissance, il n'y a pas de travaux qui proposent clairement de définir une telle analogie. Dans ce travail sur l'intégration formelle, nous proposons également la simulation à événements discrets comme une solution pour coupler deux systèmes

à des échelles de temps très différentes. Le concept d'évènements discrets permet en effet d'effectuer des « sauts irréguliers dans le temps » qui autorisent la cohabitation de phénomènes lents et rapides relativement les uns aux autres.

L'originalité du *framework* que nous avons proposé dans le deuxième thème se situe essentiellement au niveau modèle. Nous développons la notion de *wrapping* à l'aide d'une interface fonctionnelle, ce qui permet potentiellement de coupler un simulateur issu d'un paradigme quelconque, avec d'autres simulateurs issus d'autres paradigmes. Cette interface fonctionnelle permet la communication des modèles avec un coordinateur DEVS qui assure notamment la cohérence globale de la simulation au niveau du temps simulé.

Nous avons défini l'application MLMC basée sur XML qui offre une syntaxe opérationnelle pour la description des modèles et de leur couplage. Cette application permet d'encapsuler des éléments de sémantique au niveau du couplage des modèles.

Nous avons également abordé le concept d'expériences virtuelles en considérant les simulateurs comme des systèmes réels. L'utilisation classique de ce concept est de vouloir comprendre le système modélisé. Dans ce contexte, nous avons élaboré une syntaxe XML (MLVE) qui permet de représenter et d'échanger des plans d'expériences.

Ce concept nous a également permis d'élaborer une méthode pour simuler le transfert d'échelles entre différents niveaux d'organisations. Nous pensons qu'elle peut être appliquée dans de nombreux domaines. Nous avons illustré cette idée avec le troisième thème.

En identifiant un modèle fonctionnel connu de l'ingestion de phytoplancton par un copépode à partir de simulations d'un modèle d'agents réactifs, nous apportons un argument supplémentaire à l'utilisation des SMAS pour la simulation centrée individus en écologie. Les SMAS offrent une modélisation discrète des états, des entités et surtout des interactions, ce qui est impossible dans un modèle totalement continu. Or, nous avons vu que la nature discrète des interactions au niveau individuel a des conséquences importantes sur la dynamique globale du système.

## 6.3 Perspectives

Nous avons défini le cadre de réalisation d'une plateforme d'intégration de modèles hétérogènes. Nous voulons produire une version finalisée de cet outil à court terme. Ce travail a commencé l'année dernière dans le cadre de la thèse de G. Quesnel, au LIL. Aux briques de base existantes comme les connecteurs ou les coordinateurs DEVS, se sont ajoutés les *wrappers* pour les réseaux de Petri et les équations différentielles ordinaires. Nous pouvons d'ores et déjà coupler ces deux formalismes à l'intérieur de notre *framework*.

Dans le cadre de la simulation informatique des systèmes complexes, nous pensons qu'il est nécessaire de développer la notion de plans d'expériences pour une meilleure confrontation des résultats. Nous avons commencé à travailler sur ces questions en collaboration avec le Cemagref de Clermont-Ferrand.

Le travail sur les aspects sémantiques du couplage nous semble un point fondamental dans la perspective d'un couplage automatique (ou semi-automatique) des modèles de simulation. Nous devons développer des collaborations avec des chercheurs dans le domaine de l'intégration de bases de données hétérogènes. De telles recherches sont menées au LIL, et nous pouvons espérer des avancées dans cette direction.

Notre travail sur l'intégration formelle nous a amené à des réflexions sur les SMAs et notamment sur l'utilisation de DS-DEVS pour leur formalisation. Nous aimerions poursuivre dans cette voie en considérant les différents types d'environnement des agents. Dans ce cadre, le couplage des SMAs avec des équations différentielles spatialisées nous semble un travail intéressant. Nous avons déjà des pistes avec l'utilisation de méthodes de résolution de systèmes d'équations différentielles basées sur DEVS, comme QSS par exemple<sup>93</sup>.

Notre application nous a amenés à réfléchir sur les notions de hiérarchie, de transfert d'échelles et de construction automatique de modèles. Nous avons commencé une réflexion sur ce sujet et nous voulons la poursuivre avec les membres de l'équipe MESC en travaillant sur la génération automatique de modèles par programmation génétique : un des objectifs du projet est la simplification de modèles résultant du couplage de modèles plus élémentaires, afin de permettre leur simulation avec un coût machine accessible.

Concernant les SMAs, qui intègrent un grand nombre de techniques et de formalismes, une question se pose alors. Pouvons-nous les considérer comme des multi-modèles ? Quoiqu'il en soit, les SMAs comme les multi-modèles sont bien placés pour la modélisation et la simulation des systèmes complexes. Nous pourrions même aller un peu plus loin et considérer la modélisation en informatique comme l'instance d'une véritable science de la complexité.

---

<sup>93</sup>À l'heure actuelle, un étudiant de DEA travaille sur ce sujet