

**UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET**  
**FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES**  
**DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**



# **MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

**Pour l'obtention du diplôme de Master**

**Domaine : Sciences et Technologie**

**Filière : Génie Electrique**

**Spécialité : Automatique et informatique industrielle**

## **THÈME**

# **SIMULATION A ENVENIMENTS DISCRETS DEVS**

**ETUDE DE CAS : SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUES**

**Préparé par : MOSTEFAI M'hamed**

**MERABET Ahmed**

### **Devant le Jury :**

<b>Noms et prénoms</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
BENABID Houari	MAA	Président
GOISMI Mohamed	MAA	Examineur
MAASKRI Mostafa	MAA	Encadreur

# *Remerciement*

*Pour assurer ce mémoire.*

*Au terme de ce travail, je remercie le bon dieu qui m'a donné la force  
et la volonté d'achever cette recherche*

*Mes plus vifs remerciements vont en premier lieu à Monsieur  
**MAASKRI MOUSTAFA** de m'avoir proposé le présent sujet, de  
m'avoir encadré et dirigé attentivement mes travaux, ainsi pour  
l'attention, le dévouement et la confiance accordée. Je voudrais  
encore remercier mes proches, ma famille qui est source d'inspiration  
suprême, qui a souvent cru en moi et qui ne m'a jamais abandonné, et  
sans avoir douté de mes capacités.*

*Je tiens à remercier tous les membres de jury qui ont consacré une  
partie de leurs temps précieux à examiner mon travail*

*Ma gratitude s'adresse aussi à tous mes amis qui m'ont encouragé  
de continuer Mes études à l'université*

*Sans oublier de remercier tous les enseignants de la faculté de  
sciences appliquées département de génie électrique à TIARET pour  
leurs patience et servitude. Ils ont contribué à nous transmettre leur  
savoir Mes remerciements les plus sincères s'adressent à toute  
personne ayant façonné ma vie et ayant contribué d'une manière ou  
d'une autre à l'achèvement de ce travail.*

## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*A l'esprit de ma mère aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour dont elle m'a comblé que dieu la protège dans son vaste paradis .*

*A mon père qui m'a aidé à devenir ce que je aujourd'hui, que Dieu le garde et le protège*

*A ma femme mon soutien moral que dieu la garde pour moi*

*A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ma fille Norelhouda Fatima Zahraa*

*A mes sœurs et frères, mon exemple éternel, et source de joie et de bonheur, que dieu vous garde pour moi*

*A toutes mes nièces et mes neveux que dieu vous bénéfice*

*Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagnaient durant mon chemin d'études supérieures.*

*M'hamed*

## Liste d'abréviation

- M&S : modélisation et simulation
- DEVS : Discret Event System
- MA : Modèle Atomique
- MC : Modèle Couplé
- EIC : externat input coupling
- EOC : externat output coupling
- IC : internal coupling
- LF : Logique Floue
- SEF: Sous Ensemble Flou
- L-R : left - right
- SIF: System d'inférence flou
- JDEVS : JAVADEVES
- EEM : Expected Existence Measure
- GCC: GNU Compiler Collection
- PV : Photovoltaïque
- Ah : Ampèreheure
- Wh : Wattheure
- H : Heure
- SIG : système géographie
- URI : Uniform Resource Identifier
- ASCII : American Standard Code for Information Interchange
- MPPT : Maximum power point tracker

# Sommaire

# Sommaire

---

## Sommaire

Liste d'abréviation .....	I
Sommaire .....	II
List des figures .....	VI
Introduction générale .....	9

## CHAPITRE I

### Modelisation et Simulation

I.1. Introduction : .....	4
I.2. Modelisation et simulation de systemes .....	4
I.2.1 Approches de modélisation .....	6
I.2.2 Théorie Systémique .....	7
I.2.2.1 Systèmes .....	10
I.2.2.2 Modélisation .....	11
I.2.2.3 Simulation .....	13
I.2.2.4 Paradigme de Modélisation et de Simulation .....	16
I.2.3 Modélisation à évènement discret .....	18
I.2.3.1 Modélisation DEVS .....	19
I.2.3.1.1 Modèle Atomique .....	20
I.2.3.1.2 Modèle Couplé .....	23
I.2.3.2 Simulation DEVS .....	25
I.2.4 Modélisation approximative .....	27
I.2.4.1 Fuzzy-DEVS .....	28
I.2.4.2 Min-Max-DEVS .....	30
I.3. Conclusion : .....	32

## CHAPITRE II

### Présentation du logiciel JDEVS

II.1. Introduction : .....	34
II.2. Le logiciel JDEVS : .....	35
II.2.1 Moteur de modélisation et de simulation : .....	35

## Sommaire

---

II.2.2 Interface graphique de modélisation :.....	37
II.2.3 Stockage.....	38
II.2.4 Cadres expérimentaux : .....	39
II.3.Modélisation par automates cellulaires.....	40
II.3.1 Interface graphique de modélisation par automates cellulaires.....	41
II.3.2 Stockage de modèles cellulaires .....	42
II.4. Conclusion.....	44

### CHAPITRE III

#### Presentation Le Système photovoltaïque

III.1 Introduction :.....	46
III.2 Centrale solaire photovoltaïque .....	46
III.3 Eléments de l'installation photovoltaïque .....	46
III.3.1 Production d'énergie (Panneaux photovoltaïques) .....	47
III.3.2 Stockage de l'énergie .....	47
III.3.3 Système de régulation.....	54
III.3.4 Système de conversion .....	55
III.4 Utilisation de l'énergie produite .....	56
III.4.1 Expression en Wattheures par jour (Wh/j) :.....	56
III.4.2 Expression en Ampère-heure par jour (Ah/j) :.....	57
III.5 Type de systèmes photovoltaïque.....	57
III.5.1 Système autonome avec batterie : .....	57
III.5.2 Système autonome sans batterie :.....	57
III.5.3 Système hybride PV/génératrice : .....	58
III.5.4 Système PV centralisé :.....	58
III.5.5 Système PV sur réseau décentralisé :.....	58
III.5.6 Système PV sur réseau diesel :.....	59
III.6 Protection des systèmes solaires photovoltaïques .....	59
III.6.1 Protection par diodes .....	59
III.7 Le câblage.....	60
III.8 Avantages et Inconvénients de l'énergie Photovoltaïque.....	60

# Sommaire

---

III.8.1 Principaux avantages de l'énergie photovoltaïque :.....	60
III.8.2 Inconvénients de l'énergie photovoltaïque : .....	60
III.9 Conclusion .....	61

## CHAPITRE IV

### Résultats et discussions

IV.1.Introduction : .....	63
IV.2. Modélisation d'un système photovoltaïque .....	63
IV.2.1 Le panneau photovoltaïque .....	65
IV.2.2 Le distributeur (Hub).....	66
IV.2.3 La batterie.....	67
2.4 Résultats de simulation .....	69
Conclusion générale .....	78
La Bibliographie .....	80

# Liste des figures

## Liste des Tableaux

Titre de Figure	Page
Figure I.1: Etapes du processus de modélisation et de simulation	05
Figure I.2: Interrelation qui constituent un Système	09
Figure I.3: Cycle de vie d'un modèle.	12
Figure I.4: Simulation continue	14
Figure I.5: Simulation discrète dirigée par horloge	14
Figure I.6: Simulation discrète dirigée par évènements	16
Figure I.7: Description d'un modèle atomique DEVS	20
Figure I.8: Description de l'évolution des éléments d'un modèle atomique	21
Figure I.9: Description d'un modèle couplé DEVS	23
Figure I.10: Arbre de Classe du simulateur DEVS	25
Figure I.11: Hiérarchie de Classe d'un environnement DEVS	26
Figure I.12: Arbre de simulation Fuzzy-DEVS	30
Figure II.1: Vue des modules du logiciel JDEVS, les carrés correspondent aux modules, les losanges correspondent aux acteurs et les cercles aux formats d'échange de données.	34
Figure II.2: Code source JAVA pour un composant atomique DEVS standard	35
Figure II.3: de Interface de modélisation en diagramme contenant un modèle couplé et	36
son panneau propriétés	38
Figure II.4: Interface de modélisation en diagramme contenant un modèle atomique et son panneau de propriétés	38
Figure II.5: Composant de l'interface graphique présentant les modèles disponibles dans la bibliothèque	39
Figure II.6: Interface de modélisation en diagramme de l'environnement JDEVS	40
Figure II.7: Architecture standard des modèles cellulaires dans JDEVS	41
Figure II.8: Document de de format XML des modèles cellulaires	43
Figure II.9: Cadres expérimentaux 3d et 2d de simulation de modèles cellulaires	43

## Liste des Tableaux

Figure III.1 Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec batterie de stockage	46
Figure III-2 Principe de production d'électricité dans un convertisseur électrochimique.	48
Figure III-3 Protection par diodes en série.	59
Figure IV.1:Un système photovoltaïque	63
Figure IV.2:Modèle du système PV dans JDEVS	64
Figure IV.4:le traitement des résultats donnés par JDEV en MATLAB	69
Figure IV.5: l'utilisation de la batterie après 03 ans, en fonction de la taille du panneau photovoltaïque	70
Figure IV.6: Prix d'un système PV déconnecté après 15 ans.	70
Figure IV.7: présentation du résultat du panneau solaire pour 03 ans.	71
Figure IV.7:Satisfaction moyenne sur 3ans.	72
Figure IV.8:La durée de la décharge en cours, exprimée en heures.	73
Figure IV.9:la charge de la batterie pendant le temps de la simulation.	73
Figure IV.10 : la résultat de puissance de la batterie dans 24 ans.	74
Figure IV.11: présentation du résultat du panneau solaire pour 24 ans.	74
Figure IV.12 : satisfaction moyenne par 24 ans.	75

# **INTRODUCTION GENERALE**

## Introduction générale

---

Avant tous, la recherche scientifique est développée en parallèle avec la technologie présente, et l'être humain a besoin de l'utilisation des capacités naturelles par moyenne basse; Dans ce mémoire on a fait la modélisation et la simulation d'un système naturel pour minimiser les couts et les frais de l'installation des panneaux solaires pour produise de l'énergie solaire (panneau photovoltaïque).

Dans le domaine d'ingénierie la modélisation et la simulation sont très importantes, alors que dans ce mémoire nous avons fait une procédure en utilisant le logiciel JDEVS, ce dernier est un outil valable et efficace pour avoir des résultats qui satisfera l'utilisateur pour objectif d'une simulation d'un system a évènement discret valide, pour faire la simulation nous avent choisir le logiciel JDEVS ; se lui la est une implémentation du cadriciel. Plusieurs raisons ont motivé le développement effectif de l'architecture générique ainsi que des techniques de modélisation. Le cas que nous étudions c'est le système photovoltaïque.

Pour organiser ce mémoire, on a présenté notre travail par quatre chapitre, le premier chapitre est intitulé la modélisation et la simulation, le 2<sup>eme</sup> chapitre nous sommes attachés à représenter une vue générale sur le logiciel qui a fait la simulation, le 3<sup>eme</sup> chapitre nous explique une vue générale sur l'énergie solaire, les moyen et l'équipement pour produire cette énergie, et dans le 4<sup>eme</sup> chapitre on fait une simulation du système par logiciel JDEVS et consultation des résultats obtenus.

# **CHAPITRE I**

## **Modélisation ET Simulation**

**I.1. Introduction :**

L'homme n'a cessé de chercher à comprendre le monde qui l'entoure. Les différentes phases d'étude nécessaires à cette compréhension ont toujours évolué de pair avec la technologie: observation, constatation, hypothèse, preuve, explication, acquisition, modélisation, etc.

L'avènement de l'informatique et l'apparition de nouveaux formalismes de traitement ont écourté ou fait disparaître certaines de ces phases; les progrès des méthodes numériques et l'augmentation des performances des ordinateurs permettent aujourd'hui, grâce à des simulations de plus en plus rapides et détaillées, de prédire le comportement de systèmes complexes. La phase qui consiste à décrire le comportement d'un système est appelée la modélisation. La théorie de la modélisation et de la simulation est basée en grande partie sur la théorie générale des systèmes. La théorie générale des systèmes est un principe selon lequel tout est système, on parle aujourd'hui de Théorie Systémique.

Les travaux présentés dans ce chapitre, et plus généralement dans ce mémoire, concernent la :

**I.2. Modélisation et simulation de systèmes**

Modélisation et la simulation informatique de systèmes complexes. Notre réflexion et les développements associés se réfèrent aux notions de système, de modèle, de modélisation, et de simulation. Ces notions sont dépendantes des techniques et du domaine d'application choisis. Toutes ces entités interviennent dans le processus de modélisation et de simulation. La figure I.1 présente ces différents éléments.

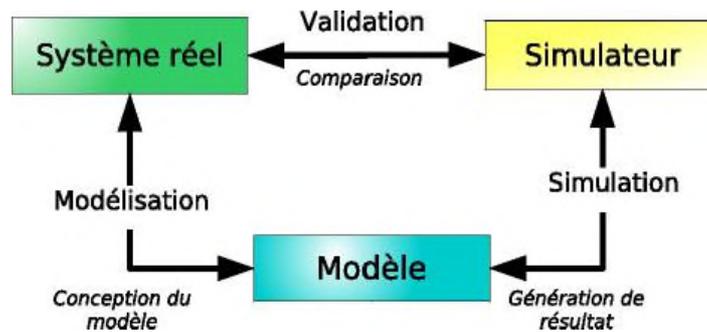


Figure I.1: Etapes du processus de modélisation et de simulation [1]

Le système est l'élément à la base de l'étude, c'est de là que les données nécessaires à l'élaboration du modèle puis à sa validation sont issues. Il est lié au modèle par une relation appelée la relation de modélisation qui décrit le système dans un environnement choisi.

Le modèle est une représentation du système réel dans un certain environnement. Les modèles sont associés à une structure de contrôle appelée simulateur. Il reproduit le comportement du système sous certaines conditions et génère les résultats issus de la simulation du modèle. Ce processus est appelé simulation.

Le simulateur permet de faire évoluer le modèle dans le temps. Les résultats de ce processus sont comparés aux données du système réel afin de vérifier la conformité du modèle, cette relation entre le simulateur et le système est appelée la relation de validation. Dans ce chapitre nous revenons en détail sur toutes ces notions[1].

Dans la première partie nous décrivons succinctement différentes approches de modélisation: systémique, empirique mécaniste et approximative.

Dans la seconde partie nous présentons de manière générale l'approche de modélisation systémique. Elle est à la base du formalisme de modélisation utilisé. De plus, nous présentons la théorie systémique, et donnons les définitions de système, de modèle, de modélisation et de simulation.

Avant de conclure, dans la troisième partie, nous décrivons le formalisme de modélisation et de simulation à la base de nos travaux, à savoir le formalisme DEVS (Discrete Event system), introduit par le professeur B.P. Zeigler [1].

### I.2.1 Approches de modélisation

D'une façon générale, nous pouvons distinguer plusieurs approches de modélisation : systémique, empirique, mécaniste, approximative. Les approches de modélisation prédictive, que l'on peut qualifier de "non approximatives" font opposition aux méthodes dites approximatives.

✓ **L'approche systémique** : se base sur une description mathématique ou physique de plusieurs processus simultanés et de leurs interactions pour définir des modèles. L'objectif de ce type de modèle est de prendre en compte l'ensemble des variables clés et leurs interactions.

✓ **L'approche empirique** : est déduite des tendances observées à l'intérieur d'un ensemble de données, elle part du postulat que ces tendances ne vont pas changer dans le temps. Les représentations logiques structurent certaines de ces approches empiriques. Trois types de raisonnements logiques peuvent être distingués:

1. le raisonnement déductif, qui permet à partir de connaissances sur un phénomène quelconque de déduire des conclusions;
2. le raisonnement inductif au contraire part des conclusions pour déterminer les prémisses de règle;
3. le raisonnement adductif qui cherche à attacher des causes plausibles à un ensemble de prémisses.

✓ **L'approche mécaniste** : est basée sur la connaissance du fonctionnement d'un système. Les différents processus qui composent le système sont modélisés indépendamment à l'aide de formules qui décrivent une loi ou une règle. Les modèles issus de cette approche comprennent trois parties:

1. Une base de fait, mémoire de travail qui contient les données initiales et les hypothèses émises décrivant le problème à traiter;
2. Une base de règles constituant la connaissance permanente;

3. Un moteur d'inférence, mécanisme ou algorithme, qui exploite les règles.

Les moteurs d'inférence fonctionnent selon deux mécanismes:

- (a) par chaînage avant, ils partent de la base de faits pour aboutir à des conclusions: "si Y alors X";
- (b) par chaînage arrière ils prennent la procédure dans le sens inverse, des conclusions aux conditions initiales. Ces deux mécanismes peuvent aussi être combinés.

Ce genre d'approche se prête bien à la modélisation de processus complexes qui requièrent l'expertise de spécialistes. Le savoir-faire de ces derniers aide à l'élaboration des bases de règles pour la modélisation des processus. Ces modèles sont en revanche peu appropriés pour décrire un système dans sa totalité quand les bases de règles à mettre en œuvre ne peuvent pas prendre en compte l'ensemble des paramètres du phénomène.

✓ **L'approche approximative:** dans le cadre des modes de raisonnement présentés, un prédicat est soit vrai soit faux. Cependant, le raisonnement et la mise en place de modèles reposent souvent sur des connaissances et des bases de données imparfaites. La mise en place de procédures visant à établir des scénarii prédictifs fiables doit permettre de prendre en compte les données incertaines et / ou imprécises des modèles. Concevoir de telles procédures implique de sortir des approches classiques de la logique. Cela exige aussi de définir une représentation de l'incertitude et de l'imprécision, de choisir des procédures de raisonnement qui prennent en compte ces aspects tout en les propageant au cours des étapes du raisonnement afin de pouvoir les qualifier et les quantifier dans les résultats.

Dans la partie suivante nous revenons en détail sur l'approche systémique, en effet le formalisme de modélisation utilisé est basé sur cette approche.

### I.2.2 Théorie Systémique

Notre étude s'inscrit dans un courant de pensée qui propose une certaine vision du monde, la systémique. De cette vision découle une pratique particulière de l'activité scientifique. La partie proprement opératoire de l'analyse systémique est née

des travaux de L. Von Bertalanffy [2]; elle met l'accent sur la notion du système comme faisant partie d'un tout. Jusque-là, l'approche scientifique était résolument réductionniste, c'est-à-dire qu'elle procédait par décomposition du réel pour en isoler une partie qui devenait l'objet d'étude. Cette approche a trouvé ses limites dans des perspectives d'explications plus globales où les mécanismes décrits au niveau individuel ne suffisent pas à expliquer le comportement de l'ensemble.

Le mot "système" apparaît dès le XVIII<sup>ème</sup> siècle, il est à l'origine des concepts fondateurs de la systémique ou de la science des systèmes. Il sera repris en 1950 par le biologiste théoricien V. Bertalanffy qui voulait pouvoir décrire dans le même langage les systèmes artificiels et les systèmes naturels, à l'époque les systèmes fermés ou statiques et les systèmes ouverts ou dynamiques.

Un système permet de représenter un phénomène perçu comme complexe, il peut être déterminé à partir de quatre questions intrinsèquement liées:

Ces questions sont résumées par la figure I.2 :

1. il fait quoi? → fonction;
2. dans quoi? → environnement;
3. pour quoi? → finalités;
4. devenant quoi? → transformation.

Autrement dit en interrogeant les interrelations qui le constituent, interrelations avec ses sous-systèmes et avec son environnement, il est possible de décrire un système.

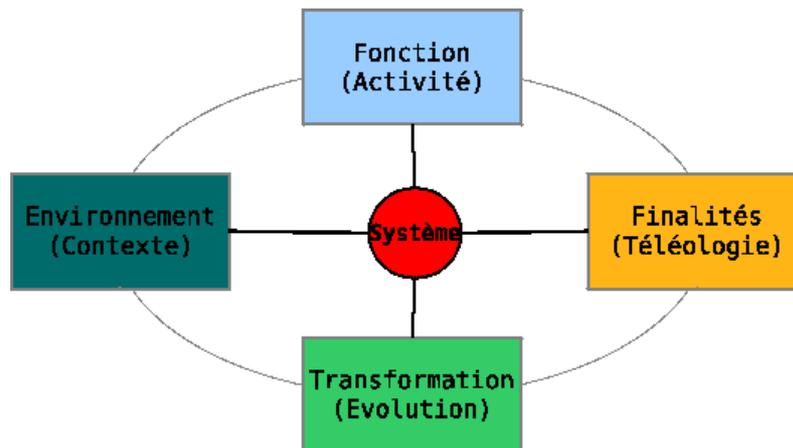


Figure I.2: Interrelation qui constitue un Système

Le concept moderne de système date des années 50. Un système est décrit sous deux aspects: structurel et fonctionnel (comportemental) [3].

Sous son aspect structurel un système comprend quatre composants:

1. les éléments constitutifs. Nous pouvons en évaluer le nombre et la nature;
2. une limite, ou une frontière, qui sépare la totalité des éléments de son environnement avec le milieu extérieur. La limite d'un système peut être floue, ou mouvante, comme dans le cas d'un feu de forêt avec son front de flamme;
3. des réseaux de relations (liens). Les éléments sont en effet inter reliés ou connectés pour pouvoir communiquer et s'échanger des informations;
4. des stocks (lieu de stockage) où sont gardées les informations qui doivent être transmises ou réceptionnées.

L'aspect structurel est la représentation de la structure potentielle d'un système. Sous son aspect fonctionnel un système est aussi décrit par quatre éléments:

1. des flux d'informations, qui empruntent les réseaux de relations et transitent par les stocks. Ils fonctionnent par entrées / sorties avec l'environnement;
2. des centres de décision qui organisent les réseaux de relations, ils coordonnent les flux et gèrent les stocks;
3. des boucles de rétroaction, elles servent à informer les centres de décision sur l'état général du système;

4. des ajustements réalisés par les centres de décision en fonction des boucles de rétroaction.

L'aspect fonctionnel est la représentation du comportement du système.

Dans cette partie nous donnons plusieurs définitions. Dans la première section nous décrivons la notion de système. Dans les sections deux, trois et quatre nous apportons les notions de modélisation, simulation et paradigme de modélisation et de simulation.

### I.2.2.1 Systèmes

Le système comme étant un ensemble hiérarchique d'éléments matériels ou immatériels (êtres vivants, machines, méthodes, règles, etc.) en interaction, transformant par un processus des éléments d'entrée en éléments de sortie. Par exemple, une éolienne transforme le vent en électricité. C'est une organisation hiérarchique de sous-systèmes, considérés eux-mêmes comme des systèmes à part entière (le système "éolienne" est composé de sous-systèmes "palles", "moteur", etc.). Nous parlons de systèmes physiques, biologiques ou sociaux, systèmes qui relèvent de la systémique. Nous voyons ici que la systémique se veut transdisciplinaire et / ou pluridisciplinaire en essayant de trouver des lois générales indépendantes des contextes d'application. Cette transdisciplinarité nous intéresse tout particulièrement [6].

La systémique distingue l'aspect structurel et fonctionnel des systèmes, elle définit aussi les systèmes comme causaux, les sorties sont la conséquence d'une entrée, ou déterministes, à une entrée donnée ne peut correspondre qu'une seule sortie. Cette définition est à la base de nombreux formalismes tels les équations différentielles, les automates à états finis, les réseaux de Pétri, etc.

Plus généralement, un système A peut être défini par la formule:

$$A = \langle r, X, \Omega, S, Y, \delta, s\lambda \rangle \quad (I.1)$$

avec:

–r : base de temps;

- X : ensemble des états d'entrée;
- $\Omega : r \rightarrow X$  : états d'entrée courants;
- S : ensemble des états du modèle;
- $\delta : \Omega \times S \rightarrow S$  : fonction de transition, elle fait évoluer l'état du modèle en fonction des états d'entrées (activations);
- Y : ensemble des états de sortie;
- $\lambda : S \rightarrow Y$  : fonction de sortie.

Dans l'équation I.1, la base de temps  $r$  représente la variable de temps ou l'écoulement d'une durée. L'ensemble des états d'entrée  $X$  constitue toutes les activations d'entrées possibles pour le système.  $S$  représente l'ensemble des états que peut prendre le système. Etymologiquement, un état est une matière d'être à un moment donné.

La dynamique du système est décrite par la fonction de transition  $\delta$ , elle applique les états d'entrée  $\Omega$  à l'état courant  $S$  pour transiter vers un nouvel état. Le système génère une sortie en appliquant la fonction  $\lambda$  à partir de l'état courant. Les fonctions de transition et de sortie sont activées pour faire évoluer le système dans le temps.

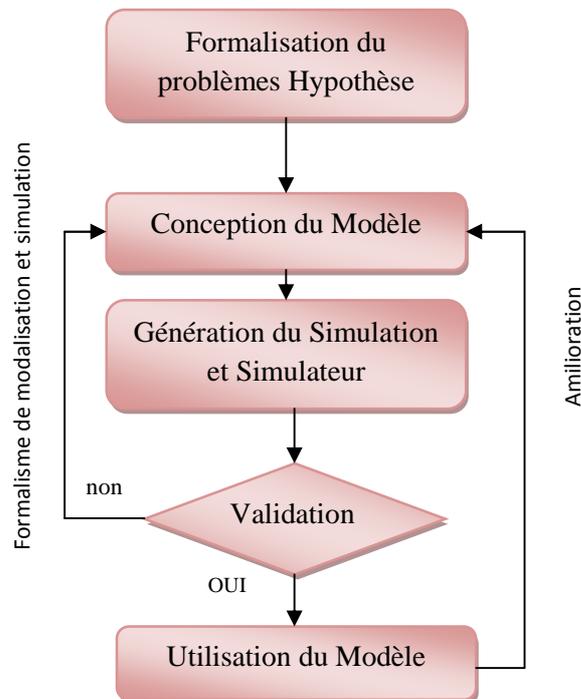
### **I.2.2.2 Modélisation**

Selon le domaine historique et la discipline étudiée, la définition de modèle et de modélisation peut varier notablement. Il y a une relation forte entre contexte et définition. D'après P. Fishwich [6] "modéliser c'est décrire une réalité sous la forme d'un système dynamique, à l'aide d'un langage de description, à un certain niveau d'abstraction". Toujours d'après P. Fish-wich [6] la modélisation est représentée par la symbiose entre le formalisme et les techniques de modélisation qui poursuivent le même objectif: "dégager les meilleures métaphores et analogies permettant de mieux comprendre un phénomène quelconque".

Selon C. Oussalah [4] "la modélisation est un épimorphisme entre un système réel et un modèle dont la finalité est de donner une représentation simplifiée et observable de la structure et du comportement du système réel".

Ceci nous conduit à définir, dans notre contexte, la modélisation comme un processus d'identification d'un phénomène et l'opération par laquelle on établit son modèle, afin d'en proposer une représentation interprétable, reproductible et simulable. C'est une technique qui consiste à restituer, sous une forme compréhensible par l'ordinateur, un objet ou un phénomène quelconque. Ce modèle, ainsi constitué, permet d'approcher le fonctionnement ou le comportement du système par l'intermédiaire d'un certain nombre d'hypothèses et de règles qui composent ce que l'on appelle un formalisme de modélisation.

La modélisation et la simulation sont des domaines scientifiques faisant un grand usage de l'informatique, et leur mise en œuvre s'effectue au sein de logiciels appelés environnements de modélisation et de simulation.



FigureI.3: Cycle de vie d'un modèle.

La modélisation systémique caractérise une des grandes méthodes de modélisation contemporaine. Elle veille à expliciter "les points de vue" de l'observateur-concepteur qui la met en œuvre, et à proposer une des formes de compréhension intelligible du système sans prétendre l'expliquer. La modélisation systémique est fondée sur deux hypothèses:

1. rendre compte des fonctions et fonctionnements du système;
2. expliciter les finalités attribuées au phénomène modélisé en veillant à les différencier explicitement des finalités de l'observateur-concepteur.

En considérant un système de manière globale, par abstraction de certaines contraintes, nous pouvons associer à un système complexe une représentation simplifiée de sa structure et de son fonctionnement. Cette représentation, plus simple à décrire et utiliser s'appelle un modèle.

L'usage de l'ordinateur et des modèles numériques ouvre, grâce à la modélisation et à la simulation, un champ scientifique nouveau avec sa méthodologie propre de validation expérimentale du modèle (figure I.3) et l'usage de celui-ci pour prédire des comportements inaccessibles à la mesure car situés dans le futur lointain ou à des échelles trop grandes ou trop petites pour être instrumentées.

### **I.2.2.3 Simulation**

La simulation est rapidement devenue incontournable pour la modélisation des systèmes complexes. Elle permet de gérer des modèles afin de produire des données comportementales, c'est-à-dire de faire évoluer les états du modèle dans le temps.

Le temps peut être vu de manière continue ou discrète. Selon que les états du système soient spécifiés de manière dénombrable ou non dans un modèle on parle de simulation discrète ou continue. Parmi ces systèmes, les ondes en général, ou la quantité d'oxygène dans l'air, constituent des systèmes à états continus car leurs valeurs changent continuellement. Un système représentant un guichet automatique de banque peut être vu au contraire comme un système à états discrets car l'arrivée d'un client est un événement subi et dont les quantités sont dénombrables.

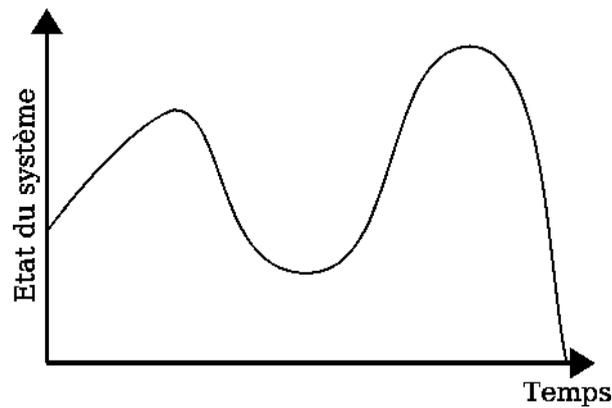


Figure I.4: Simulation continue.

Figure I.4 : Un système continu est un système mettant en jeu des signaux continus. Ils ont les mêmes propriétés qu'une fonction continue. Dans le cadre de simulation continue, une fonction continue est à la base de l'évolution du modèle dans le temps. Ces simulations nécessitent une description de type mathématique analytique du modèle car il doit être possible de donner l'état du système en tout temps. La complexité de tels modèles grandit toutefois avec le nombre de paramètres et il devient rapidement impossible de modéliser des systèmes complexes de manière purement analytique. Il est alors nécessaire de décrire ces systèmes avec d'autres approches de simulation.

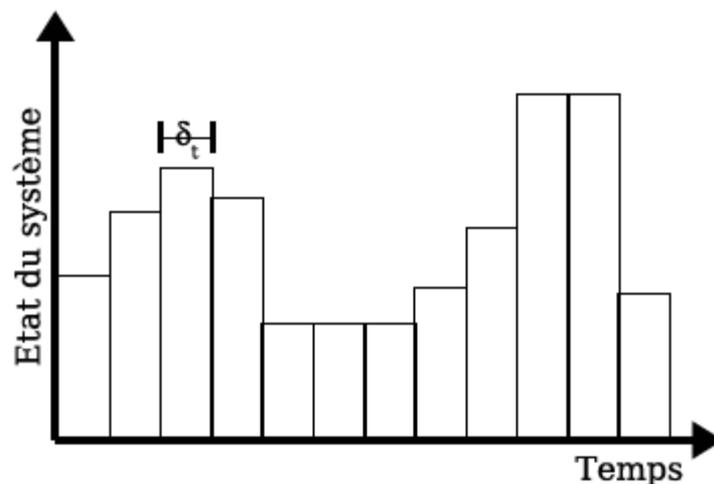


Figure I.5: Simulation discrète dirigée par horloge.

Figure I.5 : Un système discret est un système qui met en jeu des informations qui ne sont prises en compte qu'à des moments précis. En général ces instants sont

espacés d'une durée constante appelée période d'échantillonnage ( $\delta_t$ ). On parle de systèmes discrets par opposition aux systèmes continus. Le terme discret vient des mathématiques.

Dans une approche de simulation discrète, l'état futur du modèle dépend de son état actuel. Les méthodes de simulation discrète correspondent aux méthodes de résolution d'équations différentielles. La simulation de ce type de modèles implique que les changements d'états s'effectuent de manière discrète dans le temps. Il existe deux façons de gérer le temps en simulation discrète. La simulation est :

- dirigée par une horloge, lorsque l'état du modèle est réévalué à intervalles réguliers. Dans la figure I.5, un intervalle  $\delta_t$  sépare deux transitions d'états.
- dirigée par les évènements, lorsque l'état du modèle est réévalué en fonction de l'arrivée d'évènement. Dans ce cas la simulation est dite à évènements discrets (figure I.6).

Les méthodologies de simulation à évènements discrets présentent de nombreux avantages sur la simulation dirigée par horloge. En effet, il est possible de simuler un modèle en temps discret grâce aux évènements discrets en programmant des évènements d'activation à intervalles réguliers. L'intérêt de l'utilisation de la simulation à évènements discrets apparaît lorsque le phénomène simulé utilise des échelles de temps très différentes, de l'ordre de la seconde pour une partie du modèle et de l'année pour une autre; dans ce cas, si la simulation est dirigée par une horloge, la règle veut que le pas de temps utilisé soit celui du modèle utilisant la plus petite échelle de temps, même si le sous modèle n'est actif que pendant une petite partie du temps complet de la simulation. Les simulations dirigées par évènements discrets permettent de ne pas réévaluer l'état du modèle lorsque ce n'est pas jugé nécessaire.

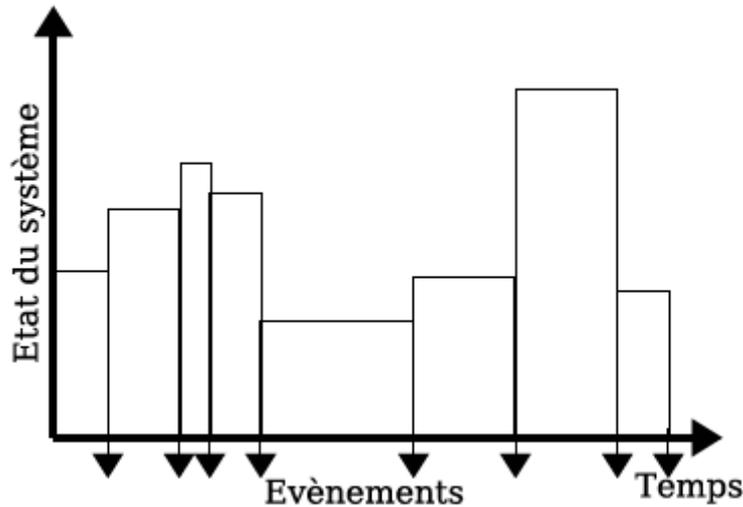


Figure I.6: Simulation discrète dirigée par événements.

Dans notre contexte, nous pouvons définir la simulation comme un procédé informatique visant à faire évoluer un système afin de prédire son comportement. Ceci dit, il ne faut pas oublier que les résultats obtenus par simulation dépendent des hypothèses retenues pour construire les modèles (figure I.3); et qu'il ne faut évidemment pas confondre résultat de simulation et résultat réel. La simulation ne doit pas être utilisée sans prise de recul; la vérification de la validité des modèles (figure I.3), et si nécessaire leurs améliorations sont des phases importantes afin de ne pas prendre de risque inconsidéré dans les décisions.

Nous l'avons vu, la modélisation peut être représentée par la symbiose entre le formalisme et les techniques de modélisation; en fonction du système à étudier ou du domaine d'application, il peut être nécessaire d'utiliser différentes techniques de modélisation. Celles-ci peuvent être regroupées au sein d'un paradigme de modélisation et de simulation.

#### I.2.2.4 Paradigme de Modélisation et de Simulation

Un paradigme est un modèle exemplaire d'une chose ou d'une réalité. En sciences le paradigme désigne une vision du monde ou un mythe fondateur d'une communauté scientifique particulière. Nous pouvons alors parler d'un paradigme de modélisation et de simulation comme étant l'ensemble des définitions et formalismes, des méthodes, des outils et techniques qui caractérisent une activité de modélisation.

Par exemple, nous parlons du paradigme objet, caractérisé par les notions d'encapsulation, d'héritage et de polymorphisme.

Il existe beaucoup de paradigmes de modélisation. Parmi les plus connus, nous pouvons citer les modèles stochastiques, les algorithmes évolutionnaires ou les techniques d'apprentissage comme les réseaux de neurones.

L'augmentation de la puissance de calcul des ordinateurs nous autorise aujourd'hui à être plus pointus dans nos représentations des systèmes. La question n'est pas de savoir si leurs états sont dénombrables ou indénombrables, mais plutôt de faire cohabiter plusieurs représentations au sein d'un même modèle. Il semble assez évident que la complexité et la diversité des systèmes soient mieux appréhendées par une diversité des modèles. L'hétérogénéité des modèles nous amène donc à la construction de multi-modèles. Un multi-modèle rassemble plusieurs paradigmes et / ou formalismes dans sa réalisation - nous parlons alors de multi-modélisation. Ce terme a été introduit par T.I. Oren en 1989 [5] et s'est fait connaître par les travaux de P. Fishwick et B.P. Ziegler [8]. Il existe aussi le terme de modélisation multi-paradigmes ; H. Vangheluwe [7] le définit comme s'adressant à trois axes de recherches orthogonaux:

1. à la modélisation liée au multi-formalisme (donc à la multi-modélisation), c'est-à-dire au couplage de modèles spécifiés dans différents formalismes;
2. au problème de changement de niveau d'abstraction dans les modèles;
3. à la méta-modélisation, c'est-à-dire la construction de modèles de modèles.

Pour intégrer différents paradigmes, nous considérons les travaux effectués par B.P. Zeigler depuis le début des années 1970 [1]. Ces travaux se basent sur les mathématiques discrètes et plus particulièrement sur la théorie générale des systèmes. Dans ce contexte, des travaux formels ont été menés pour développer les fondements théoriques de la modélisation et de la simulation des systèmes dynamiques [10]. Ces travaux ont notamment donné naissance au formalisme DEVS (Discrete Event system) pour la spécification des systèmes à événements discrets.

Nous avons choisi comme paradigme de modélisation et de simulation le multi formalisme DEVS [1]. Il offre la possibilité d'encapsuler, pour un même système, des modèles décrits à partir de différents formalismes tels que les équations différentielles [10] ou les réseaux de Pétri [11], etc. De plus, il permet d'appréhender la complexité des systèmes étudiés, et il s'abstrait totalement de la mise en œuvre des simulateurs associés aux modèles. Il existe également plusieurs extensions du formalisme DEVS adaptées à domaines précis mais nous y reviendrons par la suite.

### **I.2.3 Modélisation à évènement discret**

Depuis les années 1970, des travaux formels ont été menés pour développer les fondements théoriques de la modélisation et de la simulation des systèmes dynamiques à évènements discrets. Le formalisme DEVS, de l'anglais Discrète Event system Spécification, a été introduit par le professeur B.P. Zeigler [1] comme un formalisme abstrait pour la modélisation à évènements discrets.

Le formalisme DEVS est une approche de modélisation basée sur la théorie générale des systèmes. Plus précisément, c'est un formalisme modulaire et hiérarchique pour la modélisation, centré sur la notion d'état. Un système est représenté, pour sa forme structurelle, par deux types de modèles.

La modélisation consiste à interconnecter ces différents types de modèles afin de former un nouveau modèle décrivant le comportement du système étudié, c'est l'aspect fonctionnel.

Les modèles atomiques sont les composants de base du formalisme, ils décrivent le comportement du système. Leur fonctionnement est proche de celui des "states machine" (machines d'états).

Pour décrire un système plus complexe nous interconnectons plusieurs modèles atomiques pour former un modèle couplé. Ce nouveau modèle peut être utilisé comme modèle de base dans une description de plus haut niveau, c'est l'aspect hiérarchique du formalisme.

Au niveau de la structure du système, cette approche peut sembler statique; le formalisme DEVS dans sa forme basique ne tient pas compte de l'évolution potentielle de la structure du système, seul les états peuvent évoluer. Toutefois le formalisme a été étendu pour permettre ces changements de structure, et il en est, ou peut en être de même pour d'autres aspects.

Le formalisme DEVS peut être vu comme un environnement de multi-modélisation regroupant de manière cohérente d'autres formalismes de modélisation basés eux aussi sur la théorie générale des systèmes et centrés sur les états. Sa capacité d'ouverture, au sens informatique, en fait un formalisme adapté à un grand nombre de domaines d'application [12][13][14][15].

Au niveau de la simulation, il permet l'analyse de systèmes complexes à évènements discrets décrits par des fonctions de transitions d'états, et des systèmes continus décrits par des équations différentielles [10]. A ce niveau, le principal avantage de l'approche tient au fait que, pour un modèle décrit suivant les spécifications du formalisme, les algorithmes de simulations sont générés automatiquement. Cela permet de s'abstraire totalement de l'implémentation des simulateurs lors de la phase de modélisation, ce qui conduit à une séparation explicite entre la modélisation et la simulation.

Les deux types de modèles (atomique et couplé) du formalisme sont décrits dans la première section, dédiée à la phase de modélisation, et dans la seconde section, nous présentons les aspects de simulation.

### **I.2.3.1 Modélisation DEVS**

Le formalisme DEVS repose sur la définition de deux types de modèles : les modèles atomiques et les modèles couplés. Les modèles atomiques permettent de représenter le comportement de base du système. Les modèles couplés, quant à eux, sont définis par un ensemble de sous modèles atomiques et / ou couplés. Ils permettent de représenter la structure interne du système grâce à la définition de couplages entre modèles.

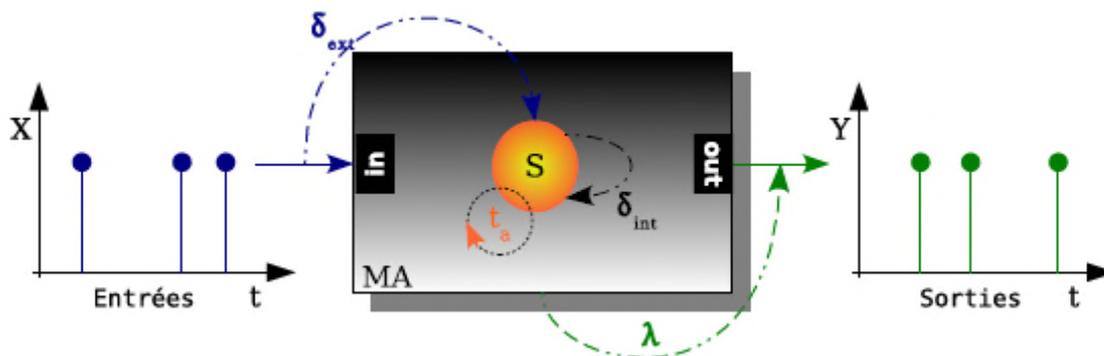
### I.2.3.1.1 Modèle Atomique

Le modèle atomique peut être vu comme un machine d'états basé sur le temps. Il permet de décrire l'aspect fonctionnel ou comportemental du système.

Le modèle atomique fournit une description autonome du comportement du système, défini par des états et des fonctions d'entrées / sorties et de transitions internes du modèle. L'évolution du modèle se fait par changement d'état en fonction de stimuli externes (via une entrée) ou internes (via une fonction de transition). Ces changements d'états ont pour but de déterminer la réponse comportementale du système à ces stimuli.

Dans le formalisme DEVS (classique) la notion de couple (numéro de port, valeur) est introduite pour chaque entrée, ou sortie d'un modèle atomique. Une entrée correspond à la réception d'une ou plusieurs valeur(s) sur un numéro de port. Une sortie correspond à l'émission d'une ou plusieurs valeur(s) sur un numéro de port.

Le modèle atomique, figure I.7, est caractérisé par la formule suivante (équation I.2):



Fig

ure I.7: Description d'un modèle atomique DEVS

$$MA = \langle X, Y, S, t_a, \delta_{ext}, \delta_{int}, \lambda \rangle \quad (I.2)$$

Avec

–  $X = \{(PIN, v) \mid PIN \in \text{Ports d'entrée}, v \in X_{PIN}\}$  : la liste des entrées du modèle, chaque entrée étant caractérisée par un couple (numéro du port / valeur);

- $Y = \{(POUT, v) | Pout \in Ports \text{ de sortie}, v \in Y_{POUT}\}$  : la liste des sorties du modèle, chaque sortie étant caractérisée par un couple (numéro du port / valeur);
- $S$  : l'ensemble des états ou des variables d'états du système;
- $t_a : S \rightarrow \mathbb{R}^+$  : la fonction d'avancement du temps, ou le temps de vie de l'état  $S$  ;
- $\delta_{ext} : Q \times X \rightarrow S$  : la fonction de transition externe, où:
- $Q = \{(S_i, e) | S_i \in S, 0 \leq e \leq t_a(S_i)\}$  : l'ensemble des états  $S_{\{1, 2, \dots, n\}}$  ;
- $e$  : est le temps écoulé depuis la dernière transition; La fonction de transition externe spécifie comment le modèle atomique change d'état (passage de l'état  $S_1$  à l'état  $S_2$  (figure I.8)) quand une entrée survient (événement externe) avant que  $t_a(S_1)$  ne soit écoulé; –  $\delta_{int} : S \rightarrow S$  : la fonction de transition interne. Elle permet de passer d'un état  $S_2$  à l'instant  $t_1$ , à un état  $S_1$  à l'instant  $t_2$  lorsqu'aucun événement externe n'arrive durant le temps de vie de l'état  $t_a(S_2)$  (figure I.8);
- $\lambda : S \rightarrow Y$  : la fonction de sortie.

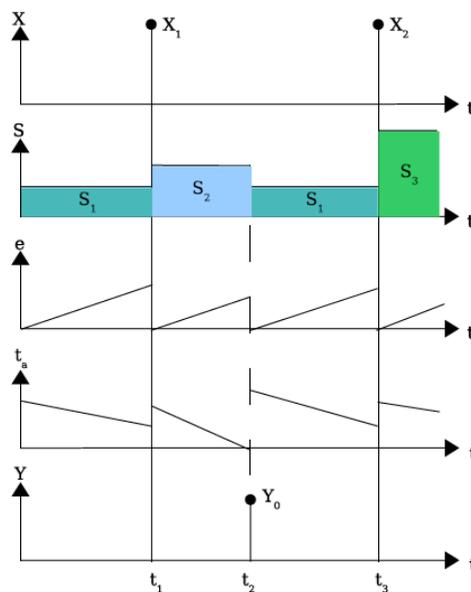


Figure I.8: Description de l'évolution des éléments d'un modèle atomique

Les modèles atomiques réagissent à deux types d'évènements (stimuli) externes ou internes. Un évènement externe provient d'un autre modèle, il déclenche la fonction

de transition externe ( $\delta_{\text{ext}}$ ) et met à jour le temps de vie de l'état ( $t_a(S_i)$ ). Un évènement interne entraîne un changement d'état du modèle. Il déclenche les fonctions de transition interne ( $\delta_{\text{int}}$ ) et de sortie (2). Le modèle calcule ensuite avec la fonction d'avancement du temps ( $t_a$ ) la date du prochain évènement interne. Ces enchaînements d'actions et la description du comportement du modèle sont présentés figure I.7.

La figure I.8 présente l'évolution des états d'un modèle.  $X_{i=\{1, 2\}}$  représente les entrées,  $S_{i=\{1, 2, 3\}}$  les états du modèle,  $e$  l'écoulement du temps, il est remis à zéro à chaque changement d'état.  $t_a$  représente la durée de vie d'un état, elle est mise à jour après chaque changement d'état, si elle est égale à zéro la fonction de transition interne est déclenchée.  $Y$  représente les sorties du modèle.

A chaque instant le modèle est dans un état ( $S_{i=\{1, 2, 3\}}$ ). Si un évènement externe  $X_{i=\{1, 2\}} \in X$  est détecté avant que  $e = t_a(S_i)$ , le système change d'état grâce à la fonction de transition externe ( $\delta_{\text{ext}}(S_i, e, X_i)$ ).

Dans la figure I.8, nous passons de l'état  $S_1$  à l'état  $S_2$  lorsque l'entrée  $X_1$  est détectée, puis de l'état  $S_1$  à l'état  $S_3$  lorsque  $X_2$  est détectée à son tour.

Si aucun évènement externe ( $X_{i=\{1, 2\}}$ ) n'est détecté, le modèle reste dans le même état pendant un temps donné par la fonction  $t_a(S_i)$ . Lorsque le temps de vie de l'état est écoulé, c'est-à-dire lorsque  $e = t_a(S_i)$  le système active sa fonction de sortie ( $\lambda(S_i)$ ) (envoi de  $Y_0$  sur la figure I.8). De plus, l'état du système est aussi mis à jour grâce à l'exécution de la fonction de transition interne ( $\delta_{\text{int}}(S_i)$ ). Dans les deux cas, le système est dans un nouvel état (figure I.8 :  $S_1$  avec  $\delta_{\text{int}}$  et  $S_2$  et  $S_3$  avec  $\delta_{\text{ext}}$ ), avec un nouveau temps de vie et ainsi de suite.

En fonction de son temps de vie, l'état d'un modèle peut être défini comme transitoire ou passif.

Si  $t_a(S) = \infty$  alors la durée de vie de l'état est tellement courte qu'aucun évènement externe ne peut intervenir avant l'arrivée du prochain changement d'état, le système est dans un état transitoire.

$S_i t_a(S) = \infty$  le système restera dans le même état tant qu'aucun évènement externe n'est détecté, il est dans un état passif.

A partir de modèles atomiques nous pouvons représenter un grand nombre de systèmes en les interconnectant au sein d'un modèle couplé de plus haut niveau.

### I.2.3.1.2 Modèle Couplé

Le formalisme DEVS utilise la notion de hiérarchie de description qui permet la construction de modèles dits "couplés" à partir d'un ensemble de modèles atomiques et ou couplés, et de trois relations de couplage:

- une relation de couplage interne (IC) pour le couplage des ports des sous-modèles qui composent le modèle couplé (en bleu sur la figure I.9);
- une relation de couplage des entrées externes (EIC) pour le couplage des ports d'entrée du modèle couplé avec les ports d'entrées de ses sous-modèles (en noir sur la figure I.9);
- une relation de couplage des sorties externes (EOC) pour le couplage des ports de sortie du modèle couplé avec les ports de sortie de ses sous-modèles (en rouge sur la figure I.9).

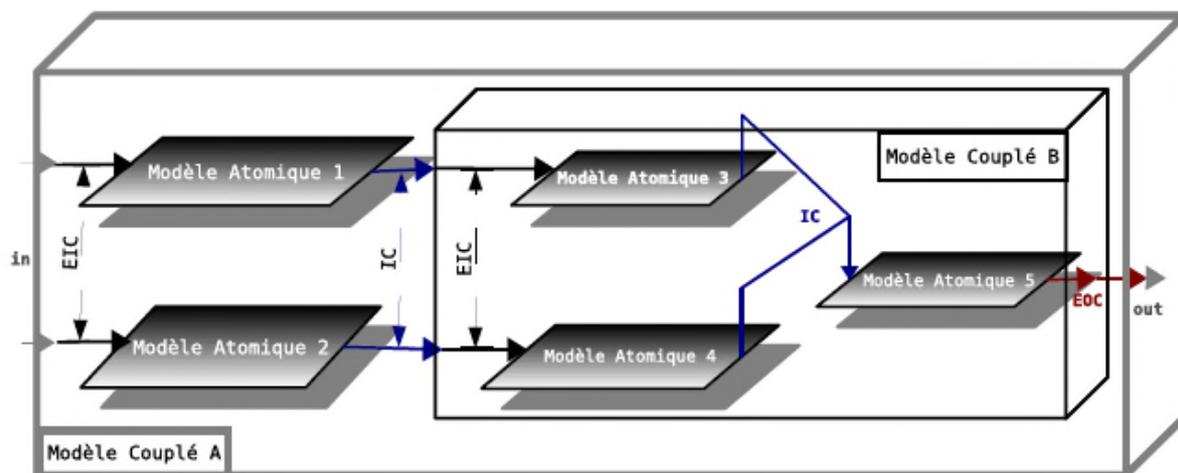


Figure I.9: Description d'un modèle couplé DEVS

Le modèle couplé (équation I.3 et figure I.9) est une composition de modèles atomiques et / ou de modèles couplés. Il présente un exemple de hiérarchie entre

modèles, il est composé de deux modèles couplés (A et B) et cinq modèles atomiques (1, 2, 3, 4 et 5) sur la figure I.9.

Le modèle de plus haut niveau, qui contient tous les autres modèles est le modèle couplé A. Le second modèle couplé B est composé des modèles atomiques (3, 4, 5). La figure I.9 présente un modèle couplé A avec 2 entrées "IN" et une sortie "OUT". Il contient 2 modèles atomiques (1) et (2) et un modèle couplé B.

Un modèle couplé DEVS est modulaire et présente une structure hiérarchique, ce qui permet la création de modèles complexes à partir de modèles atomiques et / ou couplés. Il est décrit par la formule :

$$MC = \langle X, Y, D, \{M_i\}, \{I_i\}, \{Z_{i,j}\}, L \rangle \quad (I.3)$$

Avec :

- $X = \{(PIN, v) | PIN \in \text{Ports d'entrée}, v \in X_{PIN}\}$  la liste des entrées du modèle, chaque entrée étant caractérisée par un couple (numéro du port / valeur) ;
- $Y = \{(POUT, v) | POUT \in \text{Ports de sortie}, v \in Y_{POUT}\}$ : la liste des sorties du modèle, chaque sortie étant caractérisée par un couple (numéro du port / valeur);
- $D$  : la liste des modèles composant le modèle couplé MC ;
- $M_i = \langle X_i, Y_i, S_i, \delta_{exti}, \delta_{inti}, \lambda_i, t_{ai} \rangle$  : un modèle atomique ;
- Pour chaque modèle  $i \in DU\{MC\}$ ,  $I_i$  est l'ensemble des modèles qui influence  $i$  ;
- $Z_{i,j}$  est la fonction de transition des sorties du modèle  $i$  vers le modèle  $j$ , telle que:
  - $Z_{MC,j} : X_{MC} \rightarrow X_j$  est la fonction de couplage des entrées externes (EIC) ;
  - $Z_{i,MC} : Y_i \rightarrow X_{MC}$  est la fonction de couplage des sorties externes (EOC);
  - $Z_{i,j} : Y_i \rightarrow X_j$  est la fonction de couplage interne (IC);
  - $L$  : la liste des priorités entre modèles.

La structure d'un modèle couplé doit répondre à des contraintes telles que,  $\forall i \in D$  :

1.  $M_i$  doit être un modèle atomique ;
2. Une seule fonction  $Z_{i,j}$  peut contenir l'ensemble des informations sur le couplage du modèle couplé ;
3.  $I_i$  est un sous ensemble de DUMC et  $i \notin I_i$ .

La cohérence et la conservation des propriétés du système entre ces niveaux de hiérarchie est résumée par la propriété de "fermeture sous composition". En effet dans le formalisme DEVS, chaque modèle est indépendant et peut être considéré comme une entité à part entière ou comme le modèle d'un système plus grand. Il a été montré dans [15] que le formalisme DEVS est fermé sous composition, c'est à dire que pour chaque modèle couplé DEVS, représenté par le couplage d'un ensemble de sous modèles, il est possible de construire un modèle atomique DEVS équivalent.

### I.2.3.2 Simulation DEVS

Nous définissons la simulation comme un procédé informatique visant à faire évoluer un système afin de prédire son comportement. Etablir une simulation exige donc la définition précise du comportement ainsi que la description des interactions qui existent entre les modèles.

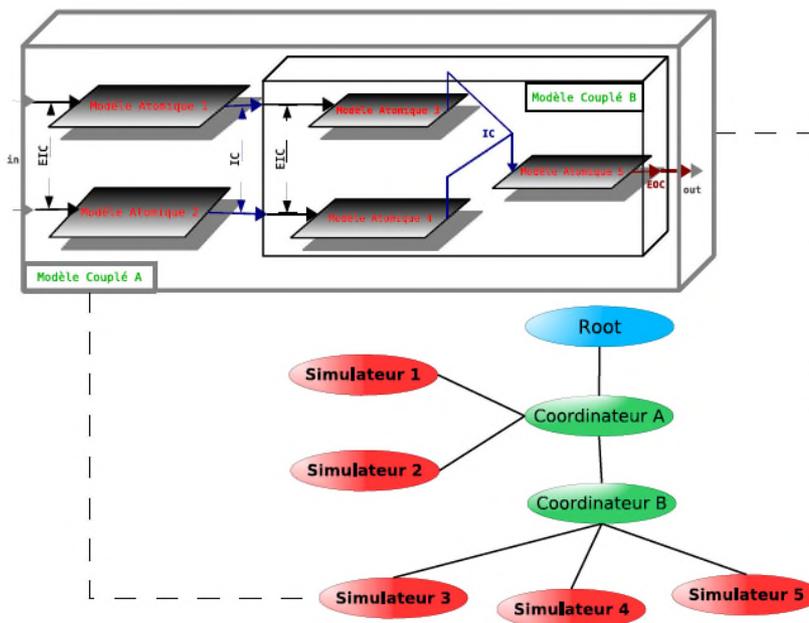


Figure I.10: Arbre de Classe du simulateur DEVS.

L'une des propriétés importantes du formalisme DEVS est qu'il fournit automatiquement un processeur pour chacun des modèles. Le formalisme DEVS établit une distinction entre la modélisation et la simulation (figure I.10) d'un système telle que n'importe quel modèle DEVS puisse être simulé sans qu'il soit nécessaire d'implémenter un processeur spécifique.

La figure I.10 montre comment sont organisés les processeurs (figure I.11, root, coordinateur, simulateur) dans le cas du modèle couplé présenté dans la partie modélisation (figure I.9).

Chaque modèle atomique est associé à un Simulateur (figures I.10 et figures I.11) chargé de gérer le comportement du modèle, et chaque modèle couplé est associé à un Coordinateur chargé de la synchronisation temporelle des modèles sous-jacents. L'ensemble de ces modèles est géré par un processeur spécifique appelé Root [15, 16].

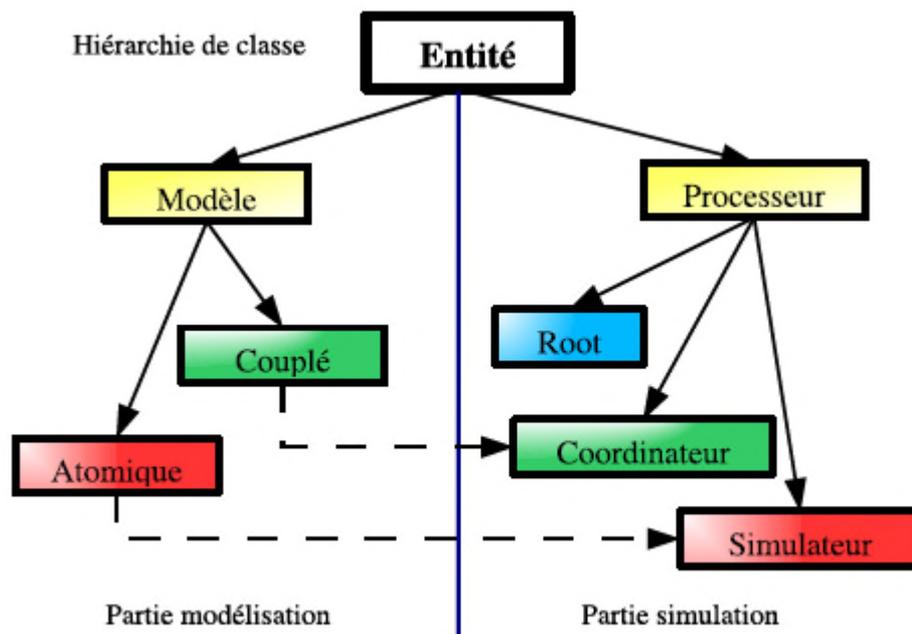


Figure I.11: Hiérarchie de Classe d'un environnement DEVS

Comme nous l'avons vu, le formalisme DEVS est basé, pour la modélisation, sur deux types de modèles : les modèles couplés et atomiques. Ces modèles possèdent des ports d'entrée, des ports de sortie et des variables d'état. Chaque modèle

communique grâce à l'envoi et à la réception de plusieurs types de messages. Le principe est décrit dans [15][16]. Chaque message génère des événements qui sont stockés dans un échéancier, qui est une structure de données composée d'événements classés suivant un ordre chronologique, la tête de l'échéancier représentant le futur immédiat, et la queue le futur plus lointain. La simulation consiste à faire évoluer les états des modèles dans le temps en fonction d'événements. Nous distinguons deux types d'événements : les événements externes et les événements internes:

- Un événement externe, prévu à l'instant  $t$  sur un port d'entrée donné du modèle représente une modification d'un des états du modèle;
- Un événement interne, prévu à l'instant  $t$ , correspond à une modification d'un des états du modèle et provoque l'émission d'une valeur de sortie via la fonction ( $\lambda$ ) sur un des ports de sortie du modèle.

Un événement interne ou externe DEVS peut être caractérisé de la façon suivante (équation I.4) :

$$E = (\text{temps}, \text{port}, \text{valeur}) \quad (\text{I.4})$$

Le premier champ représente la date d'occurrence de l'événement, le second désigne le port sur lequel l'événement intervient, il n'est pas renseigné pour les événements internes, et le troisième symbolise la valeur de l'événement.

Il a été défini dans le formalisme DEVS [17], dans le cas où plusieurs événements sont programmés au même instant  $t$ , que le choix de l'événement à exécuter en premier se fait en fonction de la liste de priorité.

Après avoir détaillé les mécanismes de fonctionnement du formalisme DEVS, dans la partie suivante, nous nous intéressons à deux extensions du formalisme DEVS qui permettent de faire de la modélisation approximative.

### **I.2.4 Modélisation approximative**

On peut intégrer dans le multi-formalisme DEVS de nombreux autres formalismes ou méthodes de modélisation. Dans cette partie nous nous intéressons aux

extensions de DEVS qui permettent de prendre en compte imprécision et incertitude sur les événements ou sur les états. L'incertitude intervient au niveau des changements d'états, alors que l'imprécision intervient sur le temps ou les variables des événements. Dans les deux cas, ces changements modifient la structure des modèles et les algorithmes de simulation.

Le formalisme Fuzzy-DEVS [17] permet de traiter des données incertaines, cette incertitude intervient uniquement au niveau des changements d'états du système. Une méthode de défuzzification permet de transformer les incertitudes sur le temps des événements en valeurs réelles, et effectue l'opération inverse pour fournir un temps de sortie flou. Le formalisme Min-Max-DEVS [19][20] permet de prendre en compte uniquement une imprécision sur le temps d'un événement pour des systèmes électroniques. Ces deux formalismes sont détaillés dans cette partie.

#### 1.2.4.1 Fuzzy-DEVS

Le formalisme Fuzzy-DEVS introduit par Y. Kwon dans [17], dérive du formalisme DEVS tout en conservant sa sémantique, une partie de ses concepts et sa modularité. Il est basé sur la logique floue, une règle "max-min" définie dans [17] et les méthodes de fuzzification et de défuzzification pour prendre en compte les incertitudes sur le temps des événements. Pour permettre la simulation, les incertitudes sur le temps doivent être transformées en valeurs réelles (défuzzification); pour pouvoir être exploités, les temps de sortie sont de nouveau transformés en données incertaines (fuzzification).

La structure du modèle atomique flou décrite dans [17] est la suivante:

$$A\tilde{M}_F = \langle X, Y, S, \tilde{\delta}_{int}, \tilde{\delta}_{ext}, \tilde{\lambda}, \tilde{t}_a \rangle \quad (I.5)$$

avec:

- $X, Y$ , l'ensemble des ports d'entrée et de sortie non flous;
- $S$ , l'ensemble des états séquentiels non flous;
- $\tilde{\delta}_{int} : S \times S \rightarrow [0, 1]$ , fonction floue de transition interne;

- $\delta_{\text{ext}} : Q \times X \times S \rightarrow [0, 1]$ , fonction floue de transition externe, avec:
- $Q = \{(s, e) \mid s \in S, 0 \leq e \leq t_a(s)\}$ , ou
- $t_a(s)$  est la valeur de défuzzification de  $\tilde{t}_a(s)$ ;
- $\tilde{\lambda} : S \times Y \rightarrow [0, 1]$ , fonction floue de sortie;
- $\tilde{t}_a : S \times \tilde{N} \rightarrow [0, 1]$ , fonction floue d'avancement du temps, où  $\tilde{N}$  est l'ensemble des nombres

flous appartenant à  $R_{[0, \infty[}$ .

Tel qu'il est décrit, le modèle atomique Fuzzy-DEVS ne permet de prendre en compte que les différentes possibilités de transition ( $\tilde{\delta}_{\text{int}}, \tilde{\delta}_{\text{ext}}$ ) entre état. Les entrées et les sorties du modèle ne sont d'ailleurs pas représentées comme imprécises. De plus, le modèle atomique flou de Fuzzy-DEVS, contrairement au modèle atomique DEVS, est non déterministe, c'est-à-dire qu'il ne répond pas aux deux conditions suivantes:

1. la fonction de transition interne est exécutée ( $\delta_{\text{int}}(s_i) = s_{i+1}$ ) quand la durée de vie de l'état est écoulee ( $t_a = 0$  ou  $t_a = e$ ) et la fonction de transition externe ( $\delta_{\text{ext}}(s_i, X_i) = s_{i+1}$ ) est exécutée lorsqu'un évènement externe arrive;
2. la fonction de sortie ( $\lambda(s_i) = Y_i$ ) est exécutée quand la durée de vie d'un état est finie ( $t_a = 0$ ).

Dans le formalisme Fuzzy-DEVS, l'état suivant du système  $s_{i+1}$  n'est pas déterminé avec  $\delta_{\text{int}}$  et  $\delta_{\text{ext}}$  mais avec la règle "max-min"; elle détermine, suivant un algorithme, l'état qui a le plus de chances d'être mis à jour. Les différentes possibilités de changement d'état sont représentées par des matrices, et l'évolution du modèle par des arbres de possibilités [17].

Fuzzy-DEVS ne traite pas les valeurs imprécises d'un modèle, mais propose une méthode qui fournit un arbre de possibilités représentant l'évolution des états du système, les feuilles sont les états et les branches la possibilité associée à un état.

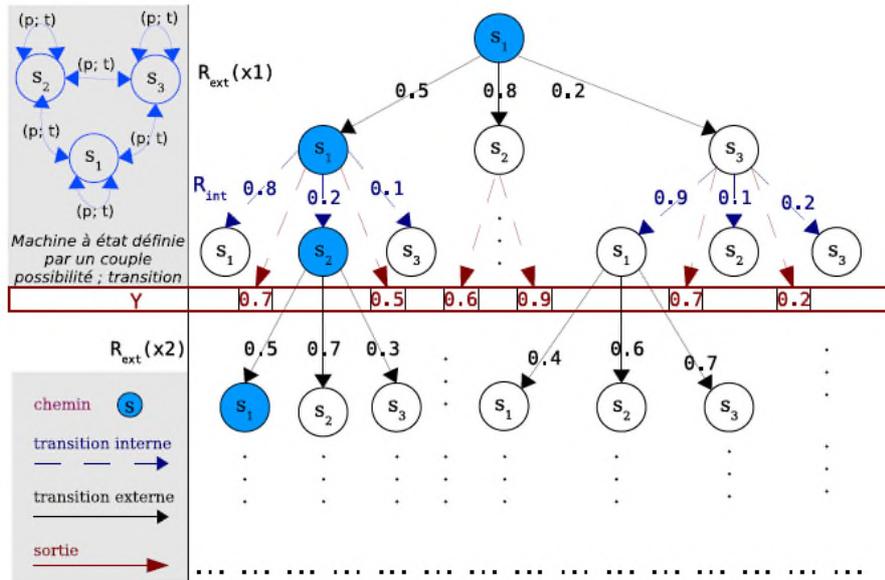


Figure I.12: Arbres de simulation Fuzzy-DEVS

La figure I.12 présente l'évolution d'un système en fonction des possibilités.

Après une transition interne  $\max(\min(0.8, 0.2), \min(0.8, 0.1)) = 0.2$ , nous passons dans l'état  $s_1 \rightarrow s_2$ .

Nous pouvons remarquer que comme dans le formalisme DEVS classique, avant une transition interne, la fonction de sortie est déclenchée.

Fuzzy-DEVS est un formalisme théorique toujours en phase de recherche [17][22]. L'idée de base est très intéressante, mais est limitée à l'étude de systèmes à états finis. De plus, ce formalisme ne nous paraît pas totalement cohérent avec le formalisme DEVS, mais il fournit de bonnes pistes de travail, comme la possibilité de définir le temps de vie d'un modèle  $t_a$  à l'aide d'un label linguistique [19]. Pour autant il ne permet pas de répondre à notre problématique, à savoir la définition d'une méthode de prise en compte d'imprécision au niveau de tous les paramètres du modèle  $(X, Y, S, \lambda, t_a, \delta_{ext}, \delta_{int})$  et pas seulement au niveau des transitions entre états.

### I.2.4.2 Min-Max-DEVS

Le formalisme Min-Max-DEVS [19][20] introduit par N. Giambiasi fait suite aux travaux de M. Smali [21] sur la modélisation et la simulation de circuits logiques à retard flou. Le but de Min-Max-DEVS est de permettre de modéliser et de simuler

des systèmes réels pour lesquels les valeurs des retards ne sont pas connues avec exactitude. Ce formalisme a été proposé pour modéliser les systèmes dans lesquels la durée de vie des états transitoires est représentée par des intervalles de temps et non par les valeurs moyennes comme dans le formalisme DEVS classique.

Les modèles atomiques Min-Max-DEVS et DEVS classique sont quasiment identiques, le seul changement est la représentation de la fonction d'avancement du temps  $ta$ . Dans Min-Max-DEVS elle est définie comme suit:

$$- ta(s_i):S \rightarrow \mathbb{R}^+ \times \mathbb{R}^+;$$

$$- ta(s_i) = (d_{\min}, d_{\max});$$

où

-  $d_{\min}$  est le temps minimum pendant lequel le modèle reste dans le même état  $s_i$ ,  $d_{\min}$  représente l'évolution la plus rapide du système;

-  $d_{\max}$  est le temps maximum pendant lequel le modèle reste dans le même état  $s_i$ ,  $d_{\max}$  représente l'évolution la plus lente du système.

Cette modification entraîne deux changements importants par rapport au formalisme DEVS classique. Le premier intervient au niveau de l'évolution du modèle; dans Min-Max-DEVS les événements externes sont choisis en fonction du temps minimum; s'il n'y a pas d'évènement externe détecté, un évènement interne est déclenché au temps maximum. Le second changement touche les algorithmes de simulation, la fonction  $ta$  ayant été modifiée, il faut en tenir compte de niveau de la simulation. Chaque évènement est déclenché en fonction du temps, et tous les temps des évènements internes sont fixés par la fonction  $ta$ . Pour cela deux nouvelles variables de temps ont été définies,  $t_s$  représentant le temps maximum avant le prochain évènement et  $t_f$  représentant le temps minimum avant le prochain évènement. Ces évolutions ont engendré une modification des algorithmes de simulation, ils sont présentés dans [19].

**I.3. Conclusion :**

Nous avons présenté dans ce chapitre les notions théoriques de la modélisation et de la simulation de système, et en particulier nous avons détaillé le formalisme développé par B.P Zeigler. Ce formalisme présente plusieurs avantages en ce qui concerne les objectifs que nous nous sommes fixés, à savoir la modélisation de systèmes naturels.

En effet, le formalisme DEVS peut être défini comme une méthodologie universelle et générale qui fournit des outils pour modéliser et simuler des systèmes dont le comportement repose sur la notion d'évènements. Ce formalisme est basé sur la théorie générale des systèmes, la notion de modèle, et permet la spécification de systèmes complexes à évènements discrets sous forme modulaire et hiérarchique. Nous pouvons aussi définir le formalisme DEVS comme un outil de multi-modélisation regroupant plusieurs formalismes de modélisation de manière cohérente, de fait, lorsqu'il est replacé dans le contexte spécifique d'un domaine d'application, si aucune approche de modélisation ne permet de traiter le domaine, il doit être adapté et étendu.

Les formalismes de modélisation sont des outils d'analyse et de prédiction indispensables pour nous renseigner sur les conséquences des actions humaines ou sur les changements naturels, mais il est important d'évaluer et de prendre en compte correctement le système étudié. Tout ce qui touche à l'homme ou à son environnement est difficile à décrire précisément, et pour cela, prendre en compte, dans des modèles. Le résultat est plus imprécis, certes, mais a de grandes chances d'être juste.

Deux approches basées sur le formalisme DEVS permettent de prendre en compte des imperfections sur les paramètres des modèles. Min-Max-DEVS est trop spécifique à un domaine d'application, et ne traite que les retards sur le temps de déclenchement des évènements, et Fuzzy-DEVS ne traite que les incertitudes au niveau des transitions entre états.

# **CHAPITRE II**

**Présentation du logiciel JDEVS**

## II.1. Introduction :

JDEVS est une implémentation du cadriciel. Plusieurs raisons ont motivé le développement effectif de l'architecture générique ainsi que des techniques de modélisation. La première concerne la validation des choix d'architecture logiciel, certains problèmes ne devenant apparents que lors de l'implémentation de l'outil. Ainsi, l'expérience de ce développement nous a conduits d'abord à redéfinir l'architecture de classes du cadriciel afin qu'il puisse mieux correspondre aux attentes des utilisateurs. JDEVS est largement utilisé dans plusieurs projets de recherche scientifique.

Ce chapitre est décomposé en quatre sections, la première présente les différents modules de JDEVS. Les techniques de modélisation et de simulation intégrées dans le logiciel sont ensuite détaillées dans les trois dernières sections.

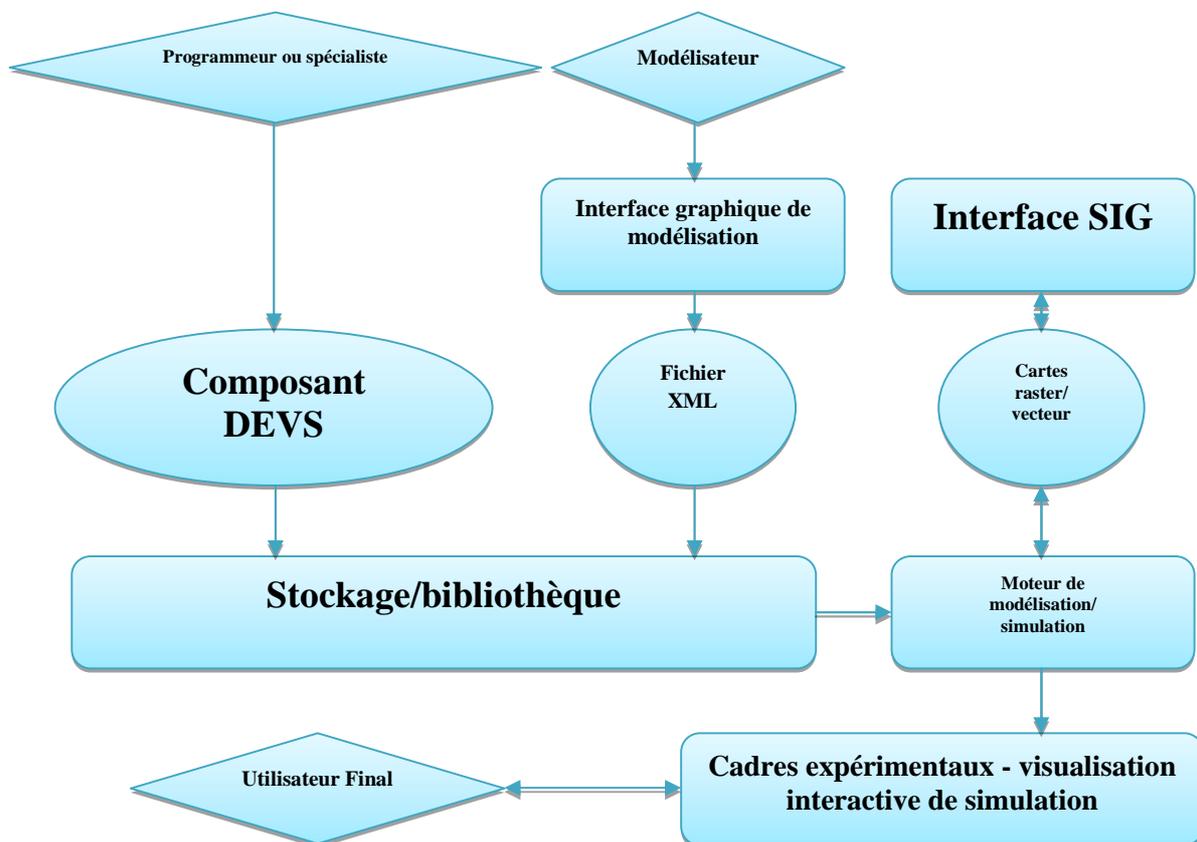


Figure II.1: Vue des modules du logiciel JDEVS, les carrés correspondent aux modules, les losanges correspondent aux acteurs et les cercles aux formats d'échange de données.

## II.2. Le logiciel JDEVS :

JDEVS est composé de cinq modules indépendants présentés en figure II.1 : un moteur de simulation, une interface graphique de modélisation, un module de stockage dans des bibliothèques, un module de connexions au SIG et les cadres expérimentaux de visualisation et de simulation. Chacun de ces modules reprend l'architecture de classe définie dans le cadriceil ce qui permet à ces modules de fonctionner ensemble et de pouvoir être éventuellement remis à jour indépendamment. Sans la prise en compte de techniques de modélisation spécifique JDEVS prend pour base la technique de modélisation classic-DEVS [2]. La première section est consacrée au moteur de modélisation et de simulation implémentant cette technique.

### II.2.1 Moteur de modélisation et de simulation :

Le moteur de modélisation et de simulation est une implémentation de la méthodologie classic-DEVS avec ports. Dans l'attente d'une standardisation par le DEVS standardisation group [23], les modèles DEVS atomiques doivent pour l'instant être transformé en instructions JAVA.

```
public class DevsFAtom extends FeedbackModel{
Port i1 = new Port(this,"i1","IN") ;
Port f1 = new Port(this,"f1","FEEDBACK") ;
Port o1 = new Port(this,"o1","OUT") ;
public DevsFAtom () { }
super("DevsFAtom") ;
states.setProperty("A","") ; }
EventVector outFunction(Message m) {
return new EventVector() ;}
void intTransition() {}
EventVector extTransition(Message m) {
return new EventVector() ;}
EventVector react(Message m) {
return new EventVector() ;}
int advanceTime(){return A ;}
}
```

Figure II.2:Code source JAVA pour un composant atomique DEVS standard

Le formalisme DEVS propose des interfaces bien définies pour la description de systèmes. Ces interfaces nous permettent de pouvoir utiliser des modèles

programmés dans de nombreux langages orientés objets et d'y accéder ensuite grâce à des appels de méthodes à distance (comme Java RMI). La modélisation de modèles atomiques peut toutefois se faire directement dans l'interface et en utilisant Java. Aussi, il est possible d'ajouter un composant atomique vide, de définir ses interfaces d'entrée/sortie et de générer le squelette du code du modèle. Ce modèle vide est ensuite enregistré dans la bibliothèque et compilé. La figure II.2 présente le code généré automatiquement pour :

$$\text{DevsAtom} = \langle X(\text{il}), S(A), Y(\text{ol}), \delta_{\text{int}}, \delta_{\text{ext}}, X, t_a \rangle$$

Les fonctions de sortie et de transition externe renvoient des vecteurs d'événements qui sont ajoutés à la liste générale des événements. La seule tâche de programmation qui incombe au spécialiste du domaine, est de spécifier la dynamique des modèles atomiques à travers ses quatre méthodes. Une fois le modèle atomique créé, il est stocké dans la bibliothèque pour être utilisé plus tard dans une composition de modèle à l'intérieur d'un modèle couplé. Les compositions de modèles sont réalisées à travers l'interface graphique de modélisation présentée dans la section suivante.[3]

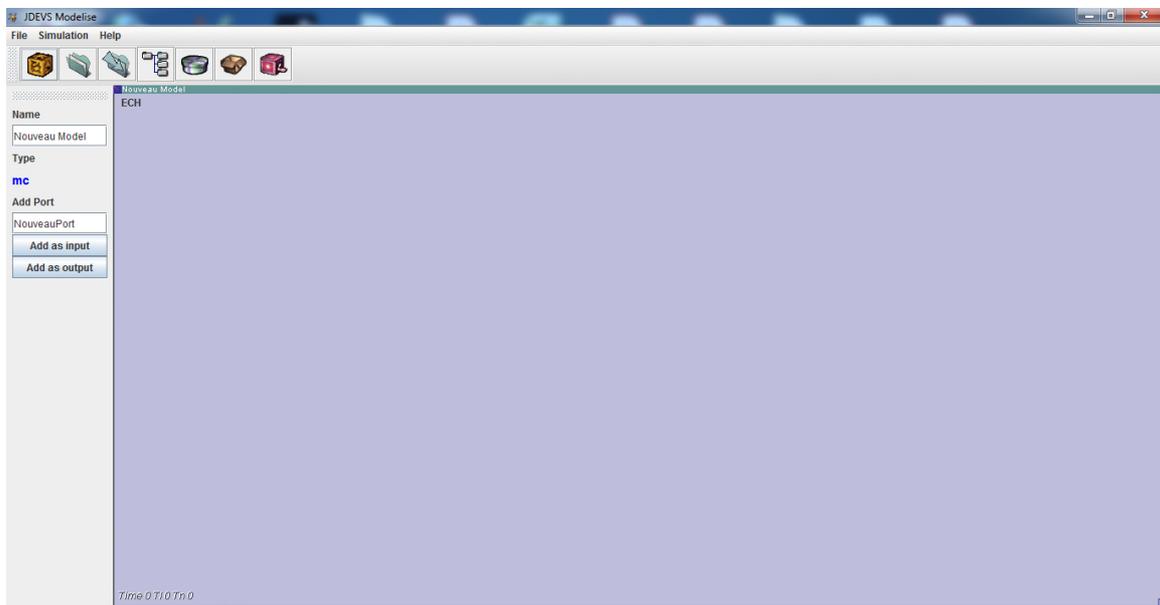


Figure II.3: Interface de modélisation en diagramme contenant un modèle couplé et son panneau propriétés

## II.2.2 Interface graphique de modélisation :

L'interface de modélisation en diagrammes permet aux utilisateurs de construire graphiquement leurs modèles. La figure II.3 représente une vue de l'outil constitué d'un modèle couplé avec deux ports d'entrée et un port de sortie. L'implémentation de cette interface est conforme au cadriceil, ainsi chaque modèle est présenté dans un espace de travail et est associé à un panneau de propriétés. De plus, l'interface dispose d'une barre de menu simple permettant d'ajouter des modèles vides (atomique, couplés ou d'autres techniques de modélisation), d'ouvrir une bibliothèque et de supprimer des modèles. Modèles atomiques et couplés ont des panneaux de propriétés différents, la figure II.3 présente celui d'un modèle couplé permettant d'ajouter et de supprimer des ports et de changer son nom.

Le panneau de modèles atomiques figure II.4 permet d'inspecter et de modifier la valeur des paramètres du modèle, de lancer l'éditeur correspondant (ici éditeur de code Java) et de compiler le modèle afin de le recharger dans l'interface graphique.

Les composants peuvent être déplacés et redimensionnés à l'aide de la souris dans ce canevas. Un port est représenté par une poignée noire dans un composant : les couplages s'effectuent en cliquant dans les ports source puis destination.

Pour ajouter des modèles existant il suffit de les glisser depuis le composant bibliothèque vers l'espace de travail. La bibliothèque est l'élément essentiel permettant le stockage de modèles ; il est brièvement présenté dans la section suivante.

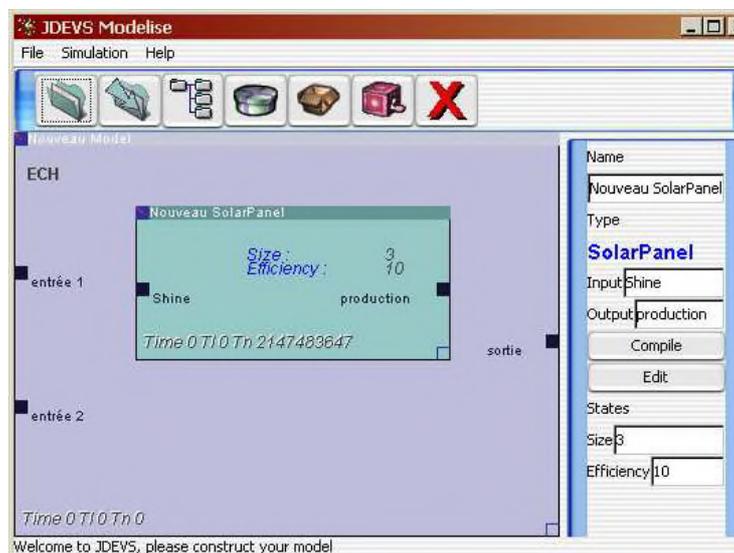


Figure II.4: Interface de modélisation en diagramme contenant un modèle atomique et son panneau de propriétés

### II.2.3 Stockage

La partie visible du module de stockage de JDEVS est un composant graphique présenté en figure II.5; ce composant présente les modèles par domaine et sous-domaines sous la forme d'un arbre.

Le module de stockage permet de formater la structure des modèles pour pouvoir l'enregistrer au format XML et la stocker dans une bibliothèque du type HmLib. Une description détaillée de l'architecture de bibliothèque HmLib est disponible dans [12]. Le but d'une telle bibliothèque est d'offrir un moyen facile et performant de stocker et de récupérer les modèles. La bibliothèque HmLib peut aussi être considérée comme une base de données orientée objet, ce qui facilite aussi le stockage des modèles en XML. En plus de la structure, il est aussi possible de stocker les liens d'héritage et d'abstraction entre modèles. Les modèles stockés dans la bibliothèque (habituellement sous la forme de code source) sont appelés "hors-contexte". Pour récupérer un modèle, il faut l'instancier puis le mettre "en-contexte" en le replaçant dans l'état où avait été stocké l'objet. Plusieurs scénarii de simulation peuvent ainsi créer plusieurs modèles "en-contexte" à partir d'un modèle "hors-contexte". C'est à partir de modules "en contexte" qu'est lancée la simulation dans les cadres expérimentaux présentés dans la section suivante.

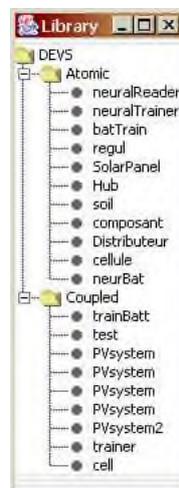


Figure II.5: Composant de l'interface graphique présentant les modèles disponibles dans la bibliothèque

#### II.2.4 Cadres expérimentaux :

Les cadres expérimentaux sont les interfaces utilisateur de simulation des modèles stockés dans la bibliothèque. Les expérimentations sur des modèles en diagramme peuvent être effectuées directement depuis l'interface graphique de modélisation. Il est ainsi possible de vérifier le comportement d'un modèle en cours de création et donc d'ajuster ses paramètres ou corriger les erreurs de conception sans explicitement utiliser le module cadre expérimental. L'application permettant d'exécuter les expérimentations se présente avec la même interface que l'interface de modélisation, chaque modèle possède un panneau de propriétés. Le panneau de propriété affiché est le panneau du modèle actif (i.e. le composant sélectionné).

La figure II.6 présente un modèle en cours de simulation dans l'interface. Le lancement de la simulation depuis l'interface graphique permet de charger une liste d'événements d'entrée et de les paramètres de l'expérimentation; ces actions sont effectuées depuis le panneau de simulation (figure II.6, en haut à gauche). L'option "track simulation" permet de réaliser la simulation en insérant un temps d'attente entre l'envoi de deux événements d'entrée pour le comportement du modèle. La liste des événements à traiter est affichée à l'intérieur de chaque modèle couplé et évolue au cours de la simulation. Il est possible de changer les paramètres de chaque modèle atomique durant la simulation en l'activant puis en les valeurs à l'intérieur de son panneau de propriétés (figure II.6, à droite). Le résultat de simulation est une liste d'événements de sortie qui peut être soit affichée (figure II.6, en bas à gauche), soit sauvegardé dans un fichée.

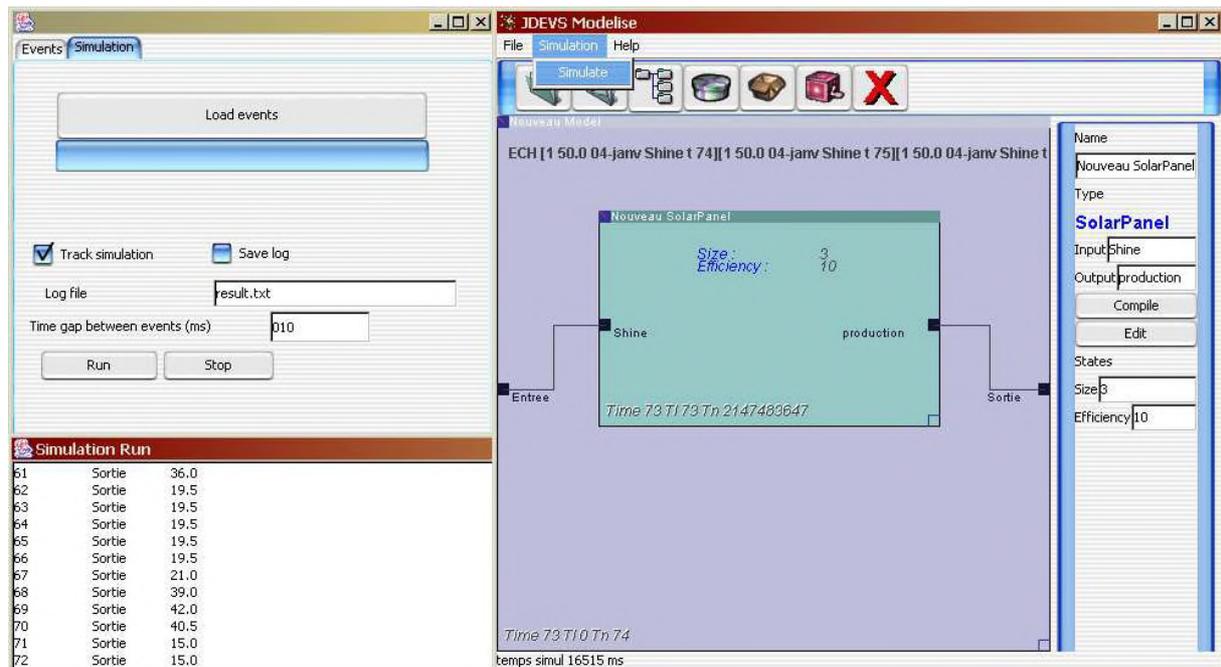


Figure II.6: Interface de modélisation en diagramme de l'environnement JDEVS

### II.3. Modélisation par automates cellulaires

La modélisation par automates cellulaires permet de modéliser le comportement d'un domaine en le morcelant en zones de comportements identiques, les cellules. Pour permettre l'intégration de cette technique à JDEVS, nous avons une architecture standard de ce type de modèles présentée en figure II.7.

Dans la plupart des modèles que nous avons eu à simuler, les données d'entrée devaient être identiques pour toutes les cellules, c'est pour ce laque chaque cellule est connectée en entrée à un modèle distributeur chargé d'envoyer les messages d'entrée à toutes les cellules. Tous les ports de sortie des cellules sont connectés à un modèle concentrateur, chargé d'acheminer tous les événements reçus depuis les cellules vers un unique port de sortie. L'utilisation des modèles distributeur et concentrateur n'est toutefois pas obligatoire; il suffit alors de connecter directement les ports d'entrée ou de sortie d'une cellule à un port externe du modèle. Cette section présente l'extension de JDEVS, composée des modules à l'interface graphique, au stockage et aux cadres expérimentaux.

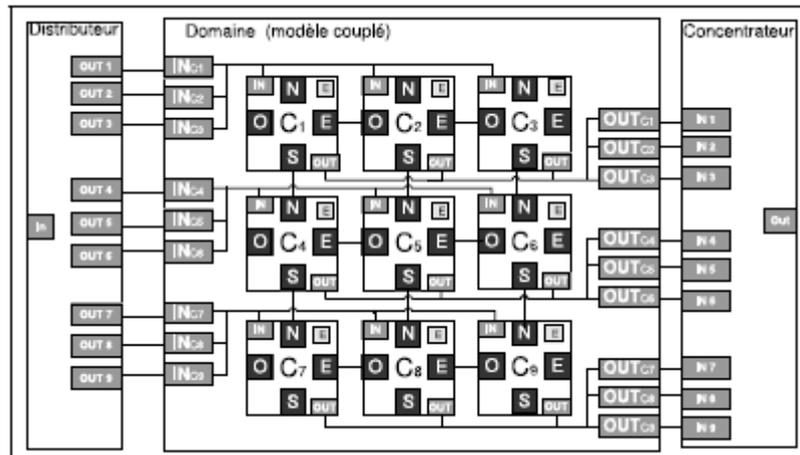


Figure II.7: Architecture standard des modèles cellulaires dans JDEVS [22]

### II.3.1 Interface graphique de modélisation par automates cellulaires

La création d'un modèle cellulaire implique la création d'une cellule comme composante du domaine. Un modèle de cellule est un modèle atomique standard composé de ports de connexion aux cellules voisines. Pour créer un modèle cellulaire dans JDEVS il faut ajouter un modèle cellulaire vide, cette action génère un squelette de code java pour la cellule générique du domaine. Ce squelette contient au minimum cinq ports d'entrée et autant de sortie :

$$\langle XN,S,E,O_{in},YN,S,E,O_{out} \rangle$$

Ces ports correspondent aux ports de connexion au voisinage et aux ports d'entrée et de sortie généraux. Le squelette de code aussi les fonctions vides correspondant aux méthodes DEVS standard permettant de le comportement général. Une fois le comportement de la cellule décrit en code Java, le modèle doit être mis en contexte pour permettre le couplage avec une cellule en particulier. Pour mettre en contexte un modèle cellulaire il faut charger les cartes nécessaires exportées d'un SIG au moment de son initialisation. Chaque instance de cellule créée prend alors le sufe [numéro ligne-numéro colonne] comme nom d'indentification. Par exemple, une instance d'un modèle atomique cellule nommé "cell" situé à la ligne 12 et à la colonne 8 prendra le nom "celle[12-8]".

Le modèle mis en contexte se représente sous la forme d'un modèle avec les ports d'entrée et de sortie généraux des distributeurs et concentrateur comme nous

l'illustrons dans la figure II.8. Le panneau de contrôle des modèles cellulaires permet de charger les cartes d'initialisation des paramètres du modèle, chaque carte correspond à un attribut des modèles atomiques cellules. Une carte est un lien URI vers un fichier raster ASCII, ce qui permet d'accéder à des ressources partagées sur un serveur d'informations géographiques.

La visualisation de l'état d'un modèle en cours de simulation est importante pour vérifier son comportement. Pour cela, il est possible de spécifier les attributs du modèle devant être affichés ainsi que la palette de couleurs associée à ces attributs. Une palette est composée en associant une couleur à un état dans lequel peut se trouver le modèle.

Le couplage entre différents modèles se fait à l'intérieur de l'interface de modélisation. Il est possible de lier un port externe à une cellule directement en la sélectionnant et en choisissant le port approprié. Les structures ainsi créées sont enregistrées dans un fichier XML par le moteur de stockage décrit dans la section suivante.

### **II.3.2 Stockage de modèles cellulaires**

Le stockage de la structure des modèles cellulaires s'effectue dans un XML pouvant être stocké dans une bibliothèque. Le format du fichier XML résultant, est présenté en figure II.9; il est compatible avec le format standard de stockage de modèles couplés et ajoute la balise TERRAINDATA contenant un lien URI vers les cartes destinées à la mise en contexte du modèle. La balise CLASS représente ici le lien URI vers la classe du modèle atomique de la cellule composant le domaine.

```

< ?xml version="1.0" encoding="UTF-8" ?>

< !DOCTYPE MODEL [
< !ELEMENT MODEL (TYPE, NAME, CLASS ?, BOUNDS ?, TERRAINDATA*, INPUT*,
OUTPUT*, CHILD*, EIC ?, EOC ?, IC ?, EXECUTIVE ?)>
< !ELEMENT NAME (#PCDATA)>
< !ELEMENT TYPE (#PCDATA)>
< !ELEMENT CLASS (URI)>
< !ELEMENT BOUNDS (LOCX, LOCY, WIDTH, HEIGHT)>
< !ELEMENT LOCX(#PCDATA)>
< !ELEMENT LOCY (#PCDATA)>
< !ELEMENT TERRAINDATA (URI)>
< !ELEMENT WIDTH (#PCDATA)>
< !ELEMENT HEIGHT (#PCDATA)>
< !ELEMENT PORT (URI ?, #PCDATA)>
< !ELEMENT URI (#PCDATA)>
< !ELEMENT CHILD (MODEL* | URI*)>
< !ELEMENT INPUT (PORT*)>
< !ELEMENT OUTPUT (PORT*)>
< !ELEMENT LINK (PORT, PORT)>
< !ELEMENT EIC (LINK*)
< !ELEMENT EOC (LINK*)>
< !ELEMENT IC (LINK*)>
< !ELEMENT EXECUTIVE (MODEL* | URI*)> ]

```

Figure II.8: Document de format XML des modèles cellulaires

En somme, les domaines créés et stockés dans la bibliothèque au format XML peuvent être directement simulés dans le module de simulation. Cependant cette interface n'est pas destinée à un utilisateur qui désire effectuer des expérimentations plus simples et sans contrôle sur un modèle. Pour cela, plusieurs cadres expérimentaux ont été développés pour les modèles cellulaires, ils sont présentés dans la section suivante.

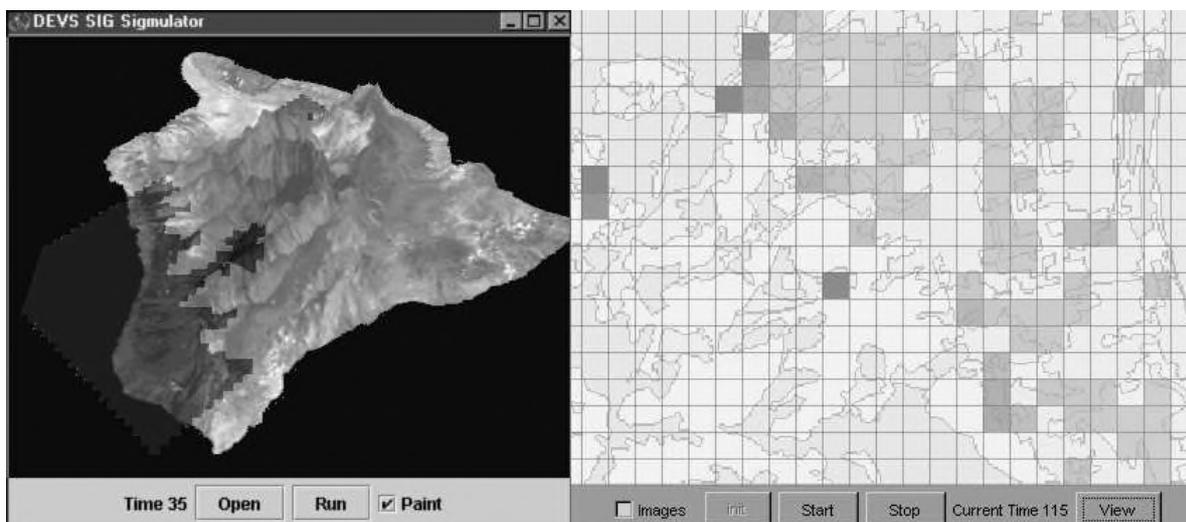


Figure II.9: Cadres expérimentaux 3d et 2d de simulation de modèles cellulaires

**II.4. Conclusion**

Cette section après enté JDEVS, implémentation logiciel du cadriciel générique de modélisation et de simulation. A travers ce développement nous avons pu démontrer la validité de notre cadriciel et l'intérêt de son utilisation comme base de construction, d'environnements de modélisation. Plusieurs techniques ayant été ajoutées au logiciel, ceci nous autorise à l'exploiter comme plate-forme de développement de modèles, dans le domaine de la modélisation et de la simulation de systèmes naturels complexes.

Des expérimentations diverses furent réalisés avec JDEVS tout au long de l'étude à l'aide de JDEVS; elles sont présentées dans le chapitre suivant.

# **CHAPITRE III**

## **Systeme photovoltaïque**

### III.1 Introduction :

Un système photovoltaïque se compose de plusieurs outils nécessaires pour assurer une production d'électricité optimale. Ce chapitre donne un aperçu général sur les différents composants et types d'installations d'un système photovoltaïque.

### III.2 Centrale solaire photovoltaïque

Une centrale solaire photovoltaïque est formée par un ensemble de panneaux solaires photovoltaïques, à base de silicium, reliés entre eux en série ou en parallèle, et branchés sur un ou plusieurs onduleurs. Ces derniers sont utilisés pour transformer le courant continu basse tension en courant alternatif haute tension, utilisable directement par les appareils classiques. La quantité d'énergie obtenue dépend toutefois de plusieurs facteurs, à savoir, la surface des modules utilisées ainsi que leur rendement et de l'ensoleillement qui varie selon la latitude, la saison et la météo par exemple [24].

### III.3 Eléments de l'installation photovoltaïque

Tout système photovoltaïque peut se composer, comme il est montré sur la figure (III.1), en trois parties :

- Une partie de production d'énergie.
- Une partie de conversion de cette énergie.
- Une partie de stockage de l'énergie.

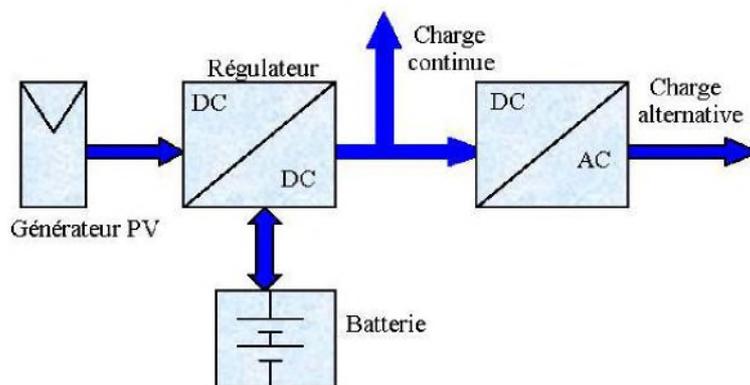


Figure III.1 Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec batterie de stockage[25]

### III.3.1 Production d'énergie (Panneaux photovoltaïques)

La production d'énergie se réalise par la conversion d'énergie solaire en électricité, cette partie est composée essentiellement d'un ou plusieurs modules, Le panneau photovoltaïque se compose de petites cellules qui produisent une très faible puissance électrique (1 à 3 W). Ces cellules sont disposées en série pour former un module ou panneau permettant de produire une puissance plus élevée. Les panneaux sont finalement interconnectés entre eux (en série et/ou en parallèle) pour obtenir un champ photovoltaïque [26].

### III.3.2 Stockage de l'énergie

Dans les systèmes de production d'électricité à partir d'énergies intermittentes, en particulier les systèmes photovoltaïques, il est indispensable de pouvoir stocker l'énergie pour ajuster la production à la consommation.

Ceci est particulièrement vrai pour les systèmes autonomes (non connectés à un réseau électrique). Même dans le cas où le réseau électrique est présent, l'utilisation d'un moyen de stockage permet de lisser les productions intermittentes et d'injecter l'énergie pendant les périodes les plus pertinentes (la nuit et les jours "sans soleil").

Le système de stockage est un élément crucial de l'installation photovoltaïque du point de vue technique, mais aussi du point de vue économique ; car il représente 40 à 50 % du coût de l'installation. Vue l'importance du stockage électrochimique de l'énergie solaire [27], une étude théorique des différents types de batteries est menée, en particulier la batterie au plomb qui est la moins coûteuse comparativement aux autres batteries.

#### a) Principe général de fonctionnement d'une batterie [28] :

Deux électrodes, l'une positive et l'autre négative, sont séparées par un électrolyte. Aux deux interfaces électrode-électrolyte interviennent des réactions électrochimiques.

A l'anode (électrode négative en décharge) s'opère une réaction d'*oxydation* selon la formule suivante :

$M1 \rightarrow M1^{n+} + n e^-$ , de potentiel redox  $E1$  ;  $M1$  étant l'espèce active de l'anode.

Les électrons libérés transitent dans le circuit extérieur pour atteindre finalement la cathode (électrode positive en décharge) où s'opère une réaction de *réduction* selon :

$M2^{n+} + n e^- \rightarrow M2$ , de potentiel redox  $E2$  ;  $M2$  étant l'espèce active de la cathode.

L'électrolyte assure le transport des espèces ioniques mises en jeu dans la réaction globale d'oxydoréduction, qui s'écrit :

$M1 + M2^{n+} \rightarrow M1^{n+} + M2$ .

La force électromotrice  $E$  de ce convertisseur se calcule selon :  $E = E2 - E1$ .

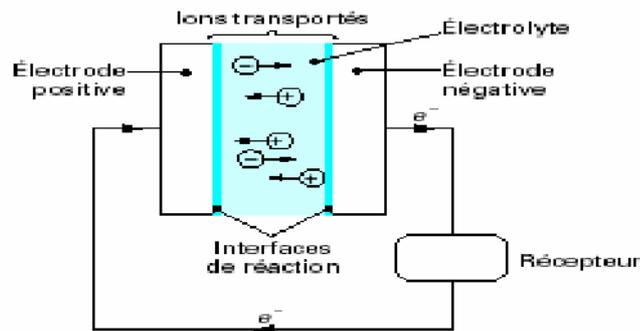


Figure III.2 Principe de production d'électricité dans un convertisseur électrochimique.

La Figure III.2 présente le fonctionnement d'un accumulateur en décharge. A la différence des piles électrochimiques, les réactions d'oxydoréduction intervenant dans les batteries sont inversibles. On peut donc, à l'aide d'une source extérieure, fournir du courant à la batterie qui fonctionnera alors en charge et les réactions s'effectueront inversement.

La capacité (en Ah) du convertisseur électrochimique est directement liée à la quantité des matières actives mises en jeu dans la réaction d'oxydoréduction. Elle confère en outre au convertisseur son rôle d'accumulateur d'énergie, dont l'expression est, en chaque instant, le produit de la capacité (chargée ou déchargée) et de la tension aux bornes de l'accumulateur.

## b) Différents type de batterie (avantages et inconvénients)[29]

Tableau III.1 Les avantages et les inconvénients des différents types de batterie :

Type de la batterie	Avantages	Inconvénients
Plomb (Pb)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prix bas</li> <li>• Solides</li> <li>• Capables de fournir des courants élevés</li> <li>• Eléments standards se trouvent n'importe où dans le commerce</li> <li>• Facilité de mise en œuvre</li> <li>• Sans effet mémoire (c'est à dire qu'on peut les recharger quand on veut, à n'importe quel niveau de décharge)</li> </ul> <p>Souplesse d'utilisation</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Densité d'énergie</li> <li>• Poids</li> <li>• Autodécharge(1% par jour environ)</li> <li>• Sensibles aux températures</li> <li>• Négatives(perte d'autonomie jusqu'à -25% à -10°C)</li> <li>• Risque de cristallisation desulfatée de Pb silaissé trop longtemps déchargée</li> </ul>
Nickel Cadmium (Ni-Cd)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aptes à supporter de grands courants décharge et recharge grâce à leurs faibles résistances internes.</li> <li>• Faible coût</li> <li>• Solidité mécanique et électrique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Effet mémoire</li> <li>• Densité énergétique moyenne</li> <li>• Recyclage compliqué à cause du cadmium qui est un métal lourd et polluant</li> </ul>
Nickel Métal Hydride (NiMH)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bonne densité d'énergie</li> <li>• Supporte des courants importants car résistance interne faible (les Ni-cd gardent cependant l'avantage dans ce domaine)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fragile car ne supportent pas la surcharge, nécessitant par conséquent l'usage de chargeurs automatiques performants et coûteux</li> <li>• Détection de fin de charge</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simples à stocker et à transporter</li> </ul>	difficile <ul style="list-style-type: none"> <li>• 0Durée de vie faible</li> </ul>
Lithium (Li)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Densité énergétique très élevée grâce aux propriétés physiques du lithium</li> <li>• Autodécharge très faible (5% par mois)</li> <li>• Aucun effet mémoire -Poids</li> <li>• Agrément d'utilisation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prix très élevé</li> <li>• Nécessite un circuit de protection sérieux (B.M.S. et P.C.M.) pour gérer la charge et la décharge afin d'éviter la destruction des éléments.</li> </ul>

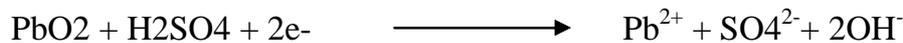
### c) Les batteries au plomb :

Les batteries utilisées dans les systèmes solaires autonomes sont en général de type plomb acide [30]. Ils sont basés sur la réaction d'oxydoréduction suivante [31] :

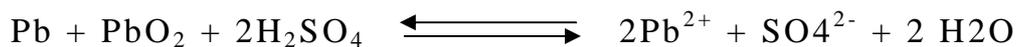
À l'anode :



À la cathode :



Reaction global:



### d) Les différents types de batteries au plomb

Les accumulateurs au plomb sont divisés en deux grandes familles : les batteries ouvertes (Vente de Batteries) et les batteries scellées (recombinaison de gaz) [32].

**Tableau III-2** Principales comparaisons des 2 familles technologiques de la batterie au plomb

Type de batterie au plomb	Ouverte	A recombinaison de gaz
Electrolyte	Liquide	gélifié
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> <li>• durée de vie pouvant être importante (5 à 15 ans)</li> <li>• technologie la moins chère</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• recombinaison =&gt; pas de perte en eau (pas d'entretien)</li> <li>• très faible taux de dégagement de gaz (sécurité)</li> </ul>
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> <li>• consommation d'eau(maintenance)</li> <li>• installation en locaux spécifiques(dégagements gazeux)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• plus faible durée de vie (modes de défaillance spécifiques)</li> <li>• plus sensible à la température</li> </ul>

**e) Caractéristiques de la batterie :**

**Capacité nominale :** C'est la quantité maximum d'énergie que contient une batterie (sous température idéale de 25°). Elle s'exprime en Ampère heure (Ah).

**Etat de charge :** C'est le pourcentage de la quantité d'énergie disponible dans la batterie à un instant t.

**Profondeur de décharge (PDD) :** C'est le pourcentage d'énergie maximum que l'on peut retirer d'une batterie. Elle ne doit pas être déchargée au-delà de cette valeur, afin de prolonger sa durée de vie.

**Température :** La variation de température influence le rendement de la batterie. Celle-ci a un fonctionnement idéal à température ambiante de 25°C ; Il faut donc prévoir si possible une régulation thermique pour maintenir sa durée de vie.

**Tension nominale :** C'est la tension type de la batterie. Elle correspond aussi à la tension de fonctionnement du système autonome. Ex : Tension 12V, 24V, 48V...

**Taux de décharge :** C'est le temps nécessaire pour décharger entièrement la batterie. Supposons une batterie de capacité de 100Ah et de courant de décharge de 5 A : Le taux de décharge sera  $100\text{Ah} / 5\text{A}$  soit 20 heures ; Il est noté  $C/20$ .

**Taux de recharge :** C'est la quantité de courant qu'il faut pour recharger une batterie en un temps donné (temps du taux de décharge). Supposons une batterie de 100Ah et de taux de décharge  $C/20$  : Le taux de recharge sera  $100\text{Ah} / 20\text{h}$  soit 5 A.

**Cycle et durée de vie :** C'est le nombre de séquences de charge/décharge, que peut subir une batterie à sa profondeur de décharge. Il détermine les performances de la batterie et sa durée de vie.

**Nombres de jours d'autonomie :** C'est la durée pendant laquelle la batterie peut alimenter toute seule l'installation en courant, sans être rechargée ni endommagée[33].

#### **f) Problèmes liés aux batteries [34] :**

Les batteries, quel que soit la technologie qu'elles utilisent, peuvent poser un certain nombre de problèmes, souvent évitables lors d'une utilisation correcte ou en s'équipant du matériel adéquat.

##### **Stratification :**

Ce phénomène signifie que l'électrolyte n'est pas homogène. L'acide étant plus lourd que l'eau, il s'accumule au fond de la batterie et l'eau au-dessus. La réaction ne se fait plus aussi bien, le haut des électrodes s'oxyde et risque de geler, tandis que le bas est attaqué par l'acide. On remédie facilement à cela par une charge d'égalisation délivrée périodiquement par le régulateur.

##### **Sulfatation :**

La sulfatation apparaît naturellement lorsque la batterie se décharge. Il se forme alors une accumulation de sulfate de plomb sur les électrodes, ce qui réduit les surfaces de contact avec l'électrolyte et par conséquent l'intensité du courant. Quand

la batterie est rechargée, la sulfatation disparaît sauf en cas de forte température, de décharge trop profonde ou de dégagement gazeux.

#### **Oxydation des électrodes et des bornes :**

Lorsque le niveau de l'électrolyte est trop faible, les électrodes sont exposées à l'air et s'oxydent. Il en va de même pour les bornes de la batterie si celle-ci n'est pas dans un endroit sec ou si les cosses ne sont pas assez serrées. L'oxydation empêche de manière définitive le courant de circuler.

#### **Prix :**

Une batterie coûte relativement cher comparé aux autres équipements d'une installation photovoltaïque autonome (environ 25% du coût initial). Sachant qu'une installation peut vivre plus de 30 ans, et que durant cette période il faudra nécessairement changer les batteries, leur prix peut facilement représenter la moitié du coût final. Les véritables économies ne se font pas à court terme. Choisir une batterie moins chère qui ne fonctionnera que 2 ou 3 ans n'est pas rentable. Il existe des modèles, plus onéreux, qui peuvent fonctionner pendant 10 ans voir plus.

#### **g) Solutions :**

- Acheter des batteries ayant une longue durée de vie pour faire de vraies économies.
- Les conserver dans un endroit ventilé et d'une température proche de 25°C.
- Vérifier le serrage des cosses et les niveaux d'électrolyte.
- Il faut que les batteries soient chargées pour être stockées si on ne les utilise pas.
- Choisir un bon régulateur capable d'effectuer des charges d'égalisation et de ne pas délivrer des tensions trop fortes.
- Si l'endroit où sont placées les batteries subit de grandes variations de température il faut que les batteries disposent d'une sonde thermique pour adapter la tension du régulateur.

### **h) Contexte industriel et économique [28]**

Le marché de la batterie au plomb est un enjeu industriel important. Il concerne les batteries de démarrage (SLI, Starting Lighting Ignition) ainsi que la plupart des batteries stationnaires.

Les industriels sont par conséquent très nombreux dans le monde entier : Panasonic, Hawkerou GP Batteries, CEAC, Fulmen ou Varta. Le marché est donc très concurrentiel.

Le coût des accumulateurs au plomb varie entre 50 et 150 Euros/kWh, qui est un des plus faibles parmi les systèmes de stockage. C'est l'une des principales raisons pour lesquelles la batterie au plomb est très utilisée. Ce coût est quasiment incompressible, du fait de la très grande maturité de la technologie.

Le taux de recyclabilité de la batterie au plomb atteint pratiquement 100 % ce qui participe aux avantages de ce type d'accumulateur malgré la haute toxicité de son principal matériau, le plomb.

### **III.3.3 Système de régulation**

Tous les systèmes photovoltaïques doivent comporter une régulation soignée de la charge et de la décharge de la batterie. En effet, la batterie est l'un des éléments les plus fragiles d'un système PV ; sa durée de vie est étroitement liée à la façon dont elle est chargée et déchargée : une longévité raisonnable n'est atteinte que par une protection soignée contre la surcharge ou la décharge trop profonde.

Le régulateur a un rôle essentiel dans la réduction du courant lorsque la batterie est presque entièrement chargée. Lorsqu'une batterie se rapproche d'un état de charge complète, de petites bulles commencent à se former sur les électrodes positives. A partir de ce moment, il vaut mieux réduire le courant de charge non seulement pour éviter des dégâts mais aussi afin de mieux atteindre l'état de charge complète. Un courant trop élevé peut provoquer une déformation des électrodes à l'intérieur, ce qui pourrait créer un court-circuit.

Le régulateur de charge assure deux fonctions principales :

- La protection des batteries contre les surcharges et les décharges profondes l'optimisation du transfert d'énergie du champ PV à l'utilisation.
- La tension aux bornes de la batterie est l'indication sur laquelle s'appliquera le régulateur pour assurer sa fonction. Le régulateur mesure en permanence cette tension et la compare à deux seuils de tensions pré-réglés : seuil haut et seuil bas. Il existe plusieurs types de régulateurs.

**a) Types de régulateurs [28] :**

**Régulateur Shunt :**

Convient aux applications de petite puissance comportant 1 ou 2 modules PV. Le régulateur shunt contrôle la charge de la batterie en court-circuitant le module photovoltaïque sans aucun risque. Tous les régulateurs shunt exigent la présence d'une diode anti-retour en série entre la batterie et l'élément shunt afin d'empêcher le court-circuit de la batterie.

**Régulateur Série :**

Convient aux applications de moyenne puissance dont le courant des modules PV est supérieur à 10 A. Lorsque la batterie atteint la pleine charge, le régulateur coupe le courant provenant des modules PV.

**Régulateur MPPT :**

Convient aux applications de grande puissance. Il garantit une récupération maximale de la puissance provenant des modules PV en mesurant en permanence le courant et la tension ; Cependant il faut considérer les pertes dues à cette technique. Aussi ce régulateur peut travailler dans une vaste gamme de température.

### **III.3.4 Système de conversion**

Le système de conversion d'énergie est disposé généralement soit entre le champ PV et la charge (sans stockage avec charge en continu, convertisseur continu-

continu), soit entre la batterie et la charge (dans ce cas il sera appelé onduleur ou convertisseur continu alternatif) [35].

### **Le convertisseur continu– continu**

Ce type de convertisseur est destiné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du champ PV correspondant au point de puissance maximal. Ce système d'adaptation est couramment appelé MPPT (maximum power point tracking). Son rendement se situe entre 90 et 95 %.

Ce système présente deux inconvénients pour un PV de faible puissance

### **Prix élevé ;**

Le gain énergétique annuel par rapport à un système moins complexe (cas d'une régulation de la tension) n'est pas important [36].

### **Le convertisseur continu – alternatif**

Pour alimenter les appareils qui fonctionnent en courant alternatif, il faut interposer un convertisseur entre la batterie et ces appareils. Les convertisseurs les plus utilisés transforment le courant continu issu de la batterie en courant alternatif 220 V/50 Hz ou 380 V/50 Hz [36].

## **III.4 Utilisation de l'énergie produite**

La charge est l'équipement électrique alimenté par le système peut être de type continue comme des équipements de télécommunications, le pompage d'eau, ou de type alternative dans les cas d'usage domestique (maison solaire), ce cas nécessite un onduleur [37].

### **III.4.1 Expression en Wattheures par jour (Wh/j) :**

Multiplier la puissance que consomme chaque appareil, par le nombre d'heures durant lesquelles l'appareil est utilisé sur une journée de 24h.

Additionner ensuite la consommation électrique de tous les appareils ; Le résultat trouvé est la consommation électrique totale de l'application par jour. Elle s'exprime en Wattheure par jour (Wh/j).

#### **III.4.2 Expression en Ampère-heure par jour (Ah/j) :**

Multiplier la puissance que consomme chaque appareil, par le nombre d'heures durant lesquelles l'appareil est utilisé sur une journée de 24h ; Diviser ensuite le résultat par la tension nominale de l'appareil : On obtient ainsi la charge électrique en courant par jour de chaque appareil.

Additionner ensuite la charge électrique de tous les appareils ; Le résultat trouvé est la charge électrique totale en courant de l'application par jour. Elle s'exprime en Ampère-heure par jour (Ah/j).

Il est primordial de bien évaluer votre consommation électrique, car elle définit la taille de votre système ; Plus la consommation est élevée, plus la taille de vos composants sera importante et plus le coût d'achat sera élevé. Il faut bien choisir ses appareils, et éviter les appareils à forte consommation.

#### **III.5 Type de systèmes photovoltaïque**

On peut représenter les systèmes photovoltaïques par une très grande variété de configuration et peuvent être classés en six groupes distincts. Les trois premiers groupes a, b et c sont des systèmes autonomes non reliés à un réseau électrique. Par contre les groupes d, e et f sont reliés différemment au réseau électrique [38].

##### **III.5.1 Système autonome avec batterie :**

C'est le système photovoltaïque le plus commun. Le champ PV sert de chargeur pour la batterie. L'électricité peut alors être utilisée en tout temps. Par exemple, ce système est bien adapté pour l'éclairage d'une maison où il faut de l'électricité lorsqu'il ne fait plus jour.

##### **III.5.2 Système autonome sans batterie :**

Ce type de système ne requiert pas de stockage d'électricité, soit parce que la production d'énergie des cellules est suffisante sous un faible éclairage (ex. :

calculatrice), soit que le temps de fonctionnement de la charge n'est pas critique (ex. : pompe à eau).

### **III.5.3 Système hybride PV/génératrice :**

Ce système utilise les avantages de l'énergie photovoltaïque et de la génératrice au diesel, au propane ou à l'essence. Le système photovoltaïque fournit une énergie intermittente mais souvent moins coûteuse en régions isolées ou éloignées. La génératrice sert d'énergie d'appoint, selon la demande. Ce type de système s'applique particulièrement bien à des sites éloignés où il est important d'avoir de l'électricité à tout moment, où les coûts de transport du carburant sont élevés et où il n'est pas encore rentable d'utiliser le système photovoltaïque seul avec les batteries. Les systèmes hybrides PV/générateurs sont souvent utilisés pour les tours de télécommunications ainsi que pour les refuges et les camps forestiers en régions éloignées. Ils peuvent également être couplés avec d'autres sources d'énergie telles les éoliennes et les microcentrales hydrauliques, lorsqu'il y a une complémentarité des productions électriques.

### **III.5.4 Système PV centralisé :**

Ce système fonctionne comme une centrale électrique normale mais doit tenir compte de la fluctuation de la production d'énergie qui est liée à l'ensoleillement.

### **III.5.5 Système PV sur réseau décentralisé :**

Ce système photovoltaïque est branché directement sur un réseau électrique, mais il est installé près de la demande. Il peut être installé, par exemple, sur une résidence individuelle ou sur un centre commercial, de telle sorte qu'il alimente cette charge et fournit l'excédent de sa production sur le réseau durant le jour. Durant la nuit, la charge puise l'énergie requise sur le réseau. Ce système permet de diminuer les frais de transport d'électricité et la surcharge de ligne, particulièrement en ce qui a trait aux charges adaptées à la production photovoltaïque tels les systèmes d'air conditionné (gestion de la demande). Ce système permet aussi d'éviter le stockage classique sur batteries (d'où réduction du coût global).

### III.5.6 Système PV sur réseau diesel :

Ce système est utilisé principalement dans les communautés ou les villages éloignés. Le générateur PV est branché en parallèle avec les génératrices au diesel du réseau villageois et fournit l'électricité sur ce réseau lorsque l'ensoleillement le permet. Il permet de réduire la consommation d'un carburant diesel très coûteux en régions éloignées et diminue les temps de fonctionnement des génératrices.

## III.6 Protection des systèmes solaires photovoltaïques

### III.6.1 Protection par diodes

Le choc électrique doit être évité aux cellules, car c'est des éléments fragiles, elles peuvent être détruites par un échauffement excessif par effet Joule si elles deviennent réceptrices de courant. A cet effet, les modules doivent être protégés par des diodes.

Les diodes séries : Un module peut devenir récepteur du courant fourni par les autres séries de modules ayant une tension plus élevée. Pour empêcher la batterie de se décharger la nuit dans les photopiles, ou pour empêcher une série de modules contenant un module défaillant ou masqué, une diode "anti retour" est intégrée dans chaque série [39].

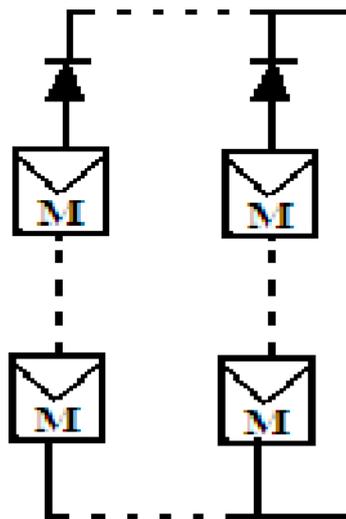


Figure III.3 Protection par diodes en série.

### III.7 Le câblage

Le câblage a pour but de regrouper électriquement les modules solaires. Généralement, les modules sont câblés tout d'abord en série pour réaliser des branches qui comportent chacune leur diode en série.

La mise en parallèle de branches est réalisée, pratiquement, à l'aide de boîtes de jonction fixées sur les châssis. Il est indispensable d'apporter un soin particulier au serrage des cosses et au câblage d'une installation. Une chute de tension trop importante dans les connexions et dans les câbles peut réduire considérablement le courant de charge de la batterie. Cette chute de tension est loin d'être négligeable lorsque de forts courants sont fournis sous de faibles tensions. Cette contrainte impose l'utilisation de câbles résistant aux intempéries et dont la section sera fonction de la distance entre panneau solaire et batterie [40].

### III.8 Avantages et Inconvénients de l'énergie Photovoltaïque [41]

#### III.8.1 Principaux avantages de l'énergie photovoltaïque :

- Energie solaire gratuite.
- Pas de pollution.
- Sa fiabilité et la longue vie de l'installation.
- Sa structure fixe.
- Son coup de maintenance bas.
- Sa flexibilité (dimensionnement selon les besoins, modularité).
- L'installation ne produit aucun bruit.
- Son potentiel illimité. 5% de la surface des déserts suffiraient pour alimenter la planète entière

#### III.8.2 Inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

- Le coût élevé de l'installation.
- Le rendement relativement bas de l'effet photovoltaïque.
- La puissance est réduite lorsque les conditions climatiques sont défavorables (nuages).

- Le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire pour une installation autonome.
- Même si l'électricité produite par une installation photovoltaïque est sans pollution, la fabrication, l'installation et l'élimination des panneaux ont un impact sur l'environnement.

### **III.9 Conclusion**

Dans ce chapitre, on a détaillé de façon relativement brève tous les éléments nécessaires afin de permettre une bonne compréhension du fonctionnement des systèmes PV ; on a présenté une description générale des systèmes photovoltaïques, parmi les éléments les plus importants, dont on a parlé dans ce chapitre, sont :

- La partie production d'énergie.
- Le stockage de l'énergie avec les accumulateurs et leur principe de fonctionnement ainsi que leurs caractéristiques.

# **CHAPITRE IV**

## **Résultats et discussions**

### IV.1.Introduction :

Ce chapitre présente le modèle développé à l'aide de logiciel JDEVS pour consulter les résultats et le MATLAB pour tracer les graphes

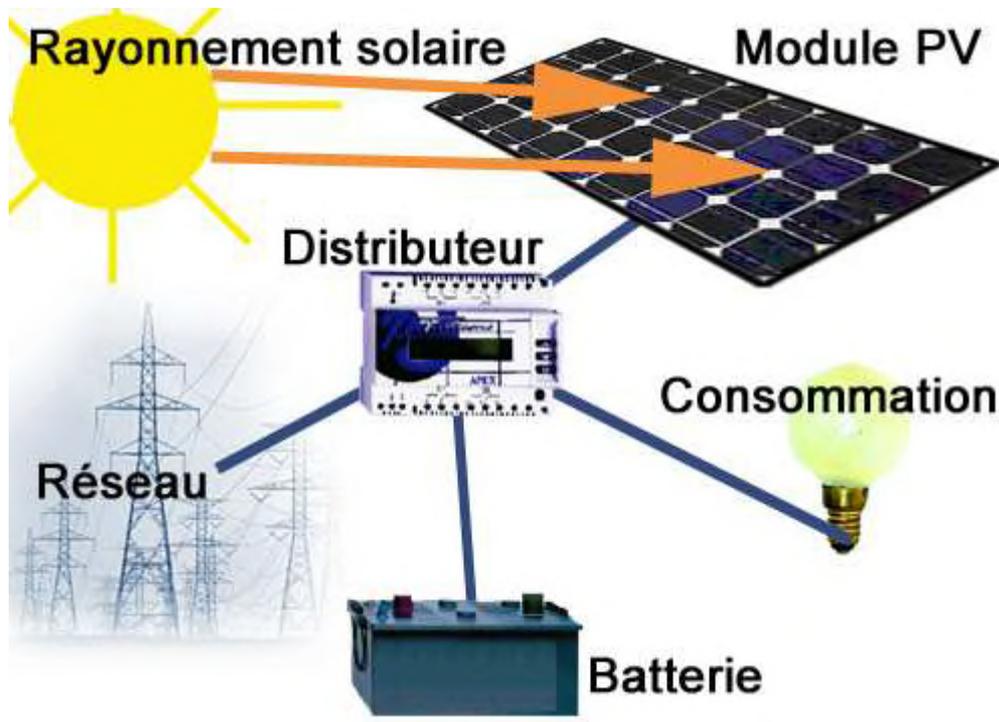


Figure IV.1:Un système photovoltaïque

### IV.2. Modélisation d'un système photovoltaïque

Les systèmes à énergie solaire photovoltaïque, présentés en figure IV.1 sont aussi connus comme systèmes "PV". Ce sont des centrales électriques en miniature pouvant fonctionner en mode autonome ou mode connecté au réseau électrique.

Les systèmes "PV" autonomes sont composés d'une batterie optionnelle de panneaux de production d'électricité photovoltaïque et d'un répartiteur [42]. Leur mode de fonctionnement est simple :le rayonnement solaire est converti en électricité par le panneau photovoltaïque, l'énergie produite est ensuite partagée par le distributeur entre la recharge de la batterie et les postes de consommation. Si le soleil ne brille pas suffisamment, la batterie est utilisée pour fournir la puissance manquante. si la batterie est complètement chargée, l'énergie non consommée est perdue.

Les systèmes "PV" connectés utilisent le réseau électrique comme batterie, ils sont uniquement composés d'un répartiteur et de panneaux photovoltaïques. Dans un système connecté, l'énergie produite peut être renvoyée sur le réseau tandis que pendant les périodes de sous production, le réseau complète l'apport énergétique, assurant du même coup un fonctionnement sans interruption de service.

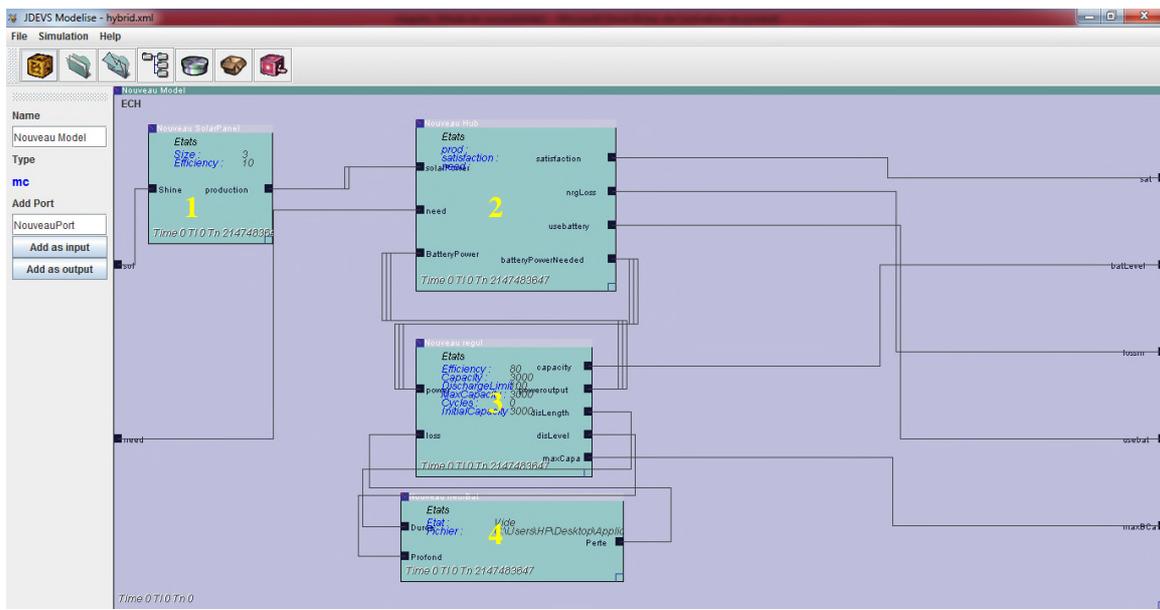


Figure IV.2:Modèle du système PV dans JDEVS

Le but de ce modèle est d'effectuer des expérimentations virtuelles sur ces systèmes et aider à leur dimensionnement en fonction des sites d'implantation [43].

Cette équipe, en tant que spécialiste du domaine, a le protocole permettant de préciser le cadre expérimental et donc les paramètres et variables d'entrée et de sortie du modèle. Figure IV.2 présente le modèle implémenté dans JDEVS.

Le modèle général a deux entrées :

- **sol** : l'ensoleillement en Watt/Heure/mètre carré.
- **need** : le besoin en consommation en Watt/heure

Il est possible de suivre plusieurs variables de sorties du modèle suivant le cadre expérimental dans lequel l'utilisateur se place. Cependant la majorité des études dans

le domaine énergétique [43] s'intéresse à un nombre restreint de ces variables. Nous avons cinq ports de sortie pour permettre de suivre l'évolution du modèle :

- **Sat** :le pourcentage de besoin satisfait par le système par rapport au besoin réel de consommation.
- **Lossrn** : la quantité d'énergie solaire perdue en Watt/heure.
- **Usebat** :le pourcentage d'utilisation d'énergie provenant de la batterie par rapport à l'énergie du panneau photovoltaïque.
- **batLevel** :le niveau de la batterie en Watt (pour une tension constante de 12 volts).
- **maxBCa**: la capacité maximum de la batterie en Watt (pour une tension constante de 12 volts).

Une des contraintes posées par les spécialistes du domaine et les utilisateurs finaux est la modalité de mesure des données d'entrée et de sortie. En effet, la grande majorité des stations de mesures, comme les modèles existants, fonctionnent en temps discret.

Le modèle doit donc être capable de recevoir en entrée des événements arrivant à intervalles de temps réguliers (ici l'heure).Les événements de sortie sur les ports Lossm et batLevel doivent aussi être générés à intervalles de temps régulier.

Les autres ports de sortie sont plus conformes à un mode de simulation à événements discrets et ne sont actifs que pour informer d'un changement de valeur. Les sous-modèles peuvent ainsi fonctionner sur ce mode mixte temps/événements discrets. Ils sont présentés en détail dans la suite de cette section.

#### IV.2.1 Le panneau photovoltaïque

Le modèle du panneau photovoltaïque (1) sur la figure IV.2 représente le système de production d'énergie, il possède deux ports :

- Un port d'entrée, Shine :l'ensoleillement en Watt/Heure/mètre carré.
- Un port de sortie, Production : la production électrique en watt/heure.

Nous avons deux paramètres dans ce modèle pour permettre à l'utilisateur final d'effectuer plusieurs expérimentations :

- **Size** : la taille en mètres carrés,
- **Efficiency** : le rendement en pourcentage (%) de conversion énergétique (solaire vers électrique).

Le comportement des cellules photovoltaïques composant un panneau est bien connu, il peut donc être modélisé comme un modèle atomique DEVS classique, en utilisant les données du fabricant. L'énergie de sortie calculée par le modèle est envoyée au distributeur.

#### IV.2.2 Le distributeur (Hub)

Le modèle du distributeur (2) sur la figure IV.2 est aussi un modèle DEVS classique ; ce modèle est chargé d'assurer la répartition des charges entre la batterie, le panneau solaire et les postes de consommation. Ce sous-modèle est dans une position centrale car il est connecté en entrée, à la batterie, au panneau photovoltaïque et aux postes de consommation par les ports :

- **Sol** : la production en Watt/heure du système source d'énergie,
- **Need** : la demande électrique en watt/heure.
- **BatteryPower** : l'énergie disponible dans la batterie, en Watt.

En sortie ce modèle est connecté à la batterie pour communiquer le besoin en énergie. Les autres ports de sortie sont utiles à la génération de données pour l'analyse des résultats de simulation. Le sous-modèle est globalement composé de quatre ports de sortie :

- **Satisfaction** : le pourcentage de besoin satisfait par le système par rapport au besoin réel de consommation,
- **nrgLoss** : la quantité d'énergie solaire perdue en Watt/heure,
- **usebattery** : le pourcentage d'utilisation d'énergie provenant de la batterie par rapport à l'énergie du panneau photovoltaïque,

- **batteryPowerNeeded** :le besoin en énergie (décharge) ou bien la quantité d'énergie disponible pour la recharge de la batterie (si la batterie n'est pas pleine), en Watt.

Dés que le niveau change dans le modèle de la batterie, un message est envoyé au distributeur pour l'informer de la nouvelle valeur; ainsi le distributeur connaît constamment le niveau d'énergie dans la batterie. Lorsqu'il y a un besoin en énergie et que l'énergie disponible est suffisante, un message est envoyé par le port `batteryPowerNeeded`, donnant la quantité d'énergie à enlever à la batterie. Lorsqu'il y a un surplus d'énergie et que le niveau de la batterie n'est pas au maximum, un message est envoyé pour la recharge de la batterie.

Le comportement de la batterie évolue durant la simulation à cause de son vieillissement. Ce vieillissement est souvent propre à un type ou même une marque de batterie. Il est alors dit de le modéliser avec des techniques conventionnelles. Le modèle de batterie qui est présenté dans la section suivante utilise.

### IV.2.3 La batterie

Le comportement physique d'une batterie est très complexe et fait intervenir de nombreuses réactions chimiques qui nécessitent beaucoup de données pour pouvoir être simulées de manière conventionnelle. Nous avons donc adapté un modèle existant, décrit dans [42], d'obtenir des résultats satisfaisants. Dans ce modèle, la batterie est considérée comme un réservoir d'électricité avec une capacité et une efficacité de charge en paramètres et peut donc être modélisée comme un modèle DEVS classique. A chaque batterie est attaché un modèle de vieillissement qui sa capacité de charge en cours de simulation.

Selon [44] Un réseau de neurones est un processeur massivement distribué en parallèle qui a une propension naturelle pour stocker de la connaissance empirique (experimental knowledge selon l'auteur) et la rendre disponible à l'usage. Il ressemble au cerveau sur deux aspects : La connaissance est acquise par le réseau au travers d'un processus d'apprentissage. Les connexions entre les neurones, connues sous le nom de poids synaptiques servent à stocker la connaissance.

Les réseaux de neurones informatiques se basent sur ces principes pour simuler le comportement d'un système lorsque les seules connaissances exploitables sont des données expérimentales. Toutefois un des principaux inconvénients des réseaux de neurones est qu'ils sont difficilement vérifiables [45]. Le lecteur intéressé trouvera dans [46] ou [47] une description détaillée de cette technique.

Le modèle de batterie(4) sur la figure IV.2 est ici considéré comme un réservoir de puissance mesurée en Watt. Il possède deux ports d'entrée :

- **Duree** : la puissance qui doit être ajoutée ou retranchée à la quantité présente dans la batterie,
- **Profond**: la perte de capacité de stockage.
- De nombreuses variables de sortie sont nécessaires au calcul de vieillissement et à l'analyse du comportement de la batterie.

Le modèle est composé de cinq ports de sortie :

<b>batLevel</b>	profondeur de la décharge en cours exprimé en pourcentage de la capacité initiale.
<b>maxBCa</b>	capacité maximum de la batterie.
<b>sat</b>	durée de la décharge en cours, exprimée en heures. Ce port émet toutes les heures dès que la puissance disponible est inférieure à la moitié de la capacité maximum.
<b>usebat</b>	la puissance disponible dans la batterie, en Watt, remise à jour dès que la capacité change. Ce port est destiné à être connecté à une sortie du modèle général pour permettre des analyses de résultats de simulation.
<b>Lossnr</b>	Identique au port précédent mais destiné au couplage avec les autres sous-modèles,

Un des avantages majeurs de l'utilisation du modèle décrit dans [42] est que l'on dispose des données pour entraîner et valider le réseau de neurones. Ces données sont collectées au Florida Solar Energy Center [48] qui dispose d'un grand centre d'étude sur les batteries. Cependant le modèle pose un problème lors de son implémentation dans un environnement de simulation à événements discrets car il est dirigé par une horloge. En effet, à cause des données disponibles nous ne pouvons calculer la perte de capacité que toutes les heures, en fonction de la durée de la décharge en cours

L'interface graphique de MATLAB permet de créer simplement et graphiquement la structure de tous ces modèles mais le comportement doit être en code Java. Le cadre expérimental de la simulation est ici identique à l'interface de modélisation. Les expérimentations, réalisées à partir d'une liste d'événements d'entrée et les différentes configurations sont obtenues en modifiant les paramètres des modèles grâce à leurs panneaux de propriétés. Quelques résultats de simulations sont présentés dans la section suivante.

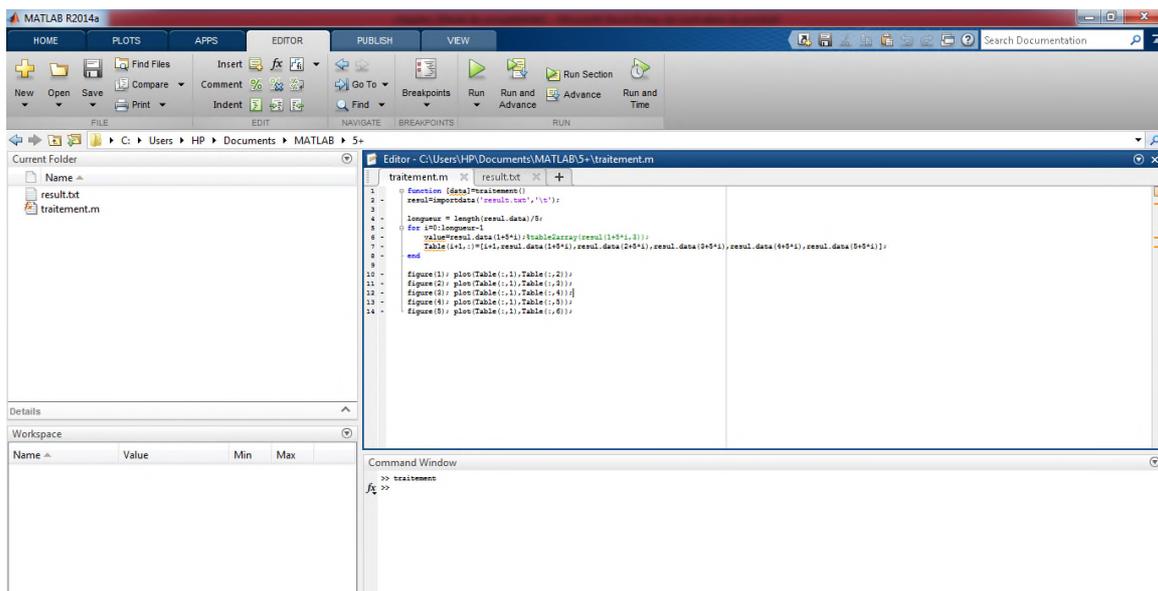


Figure IV.4:le traitement des résultats donnés par JDEVS en MATLAB

## 2.4 Résultats de simulation

Dans le cadre d'une simulation standard de ce modèle, les données d'entrée sont fournies par l'utilisateur et les événements de sorties sont directement stockés dans de fichier texte. Toutefois, grâce à la méthodologie utilisée, il est très simple d'intégrer ce modèle à l'intérieur d'un autre plus complexe comprenant, par exemple, un modèle de consommation et un modèle de calcul de pollution en fonction de l'énergie économisée.

Cinq expérimentations ont été effectuées sur une période de trois (3) ans. Les consommations ont été obtenus auprès du FSRC [48], et correspondent à la consommation d'une maison avec cinq ampoules de type basse consommation utilisées

8h/jour, une télévision utilisée 5h/jour et un petit réfrigérateur (consommation totale journalière sous 12 Volts [49] :

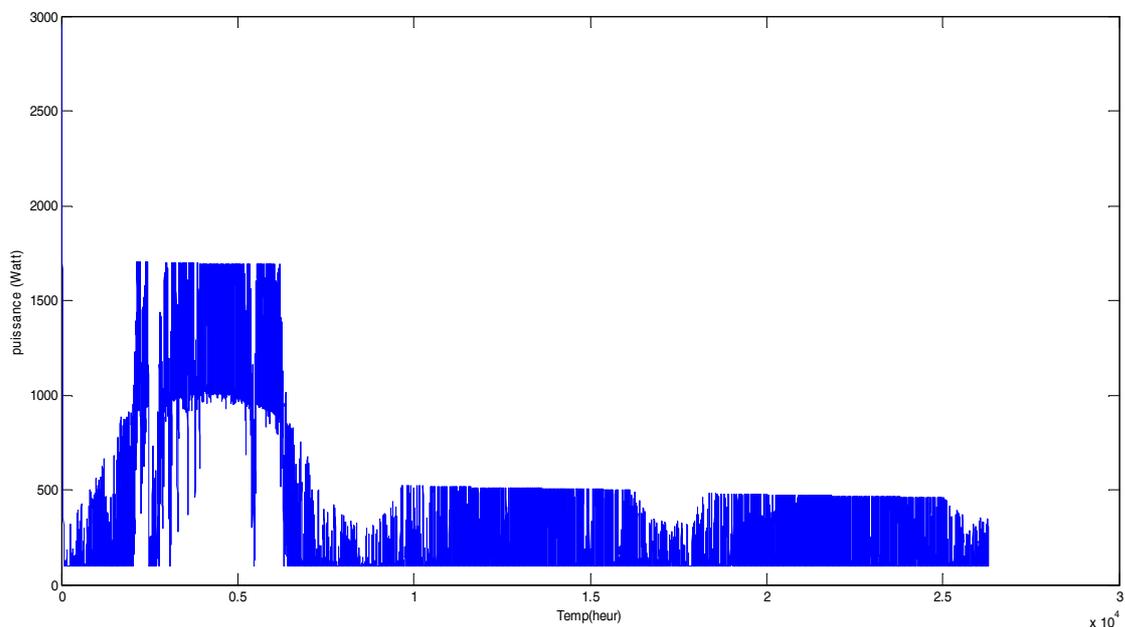


Figure IV.5: l'utilisation de la batterie après 03 ans, en fonction de la taille du panneau photovoltaïque

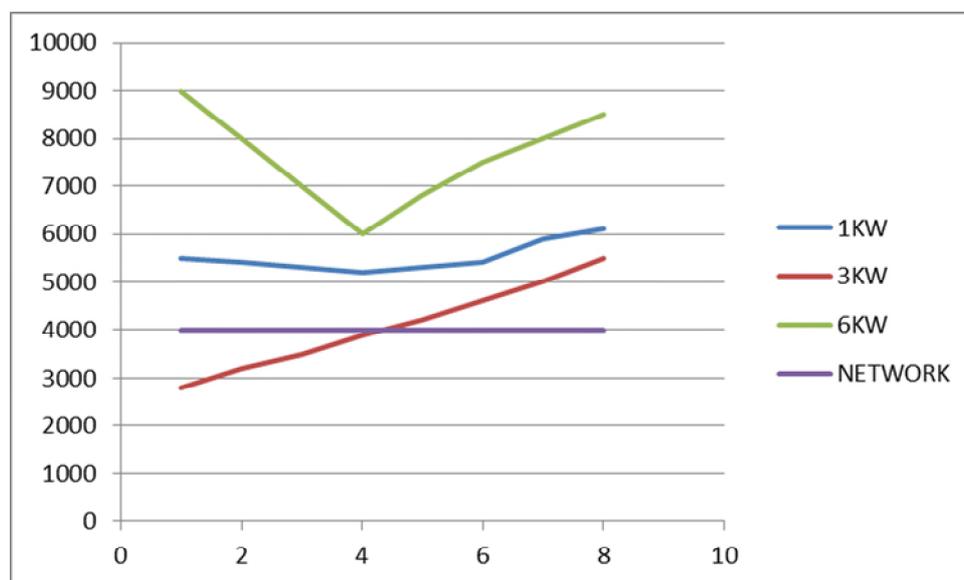


Figure IV.6: Prix d'un système PV déconnecté après 15 ans.

La figure IV.5 présenté l'utilisation de la batterie pondant 03 ans. En a voir que la puissance qui et la capacité du batterie démunie par le temps.

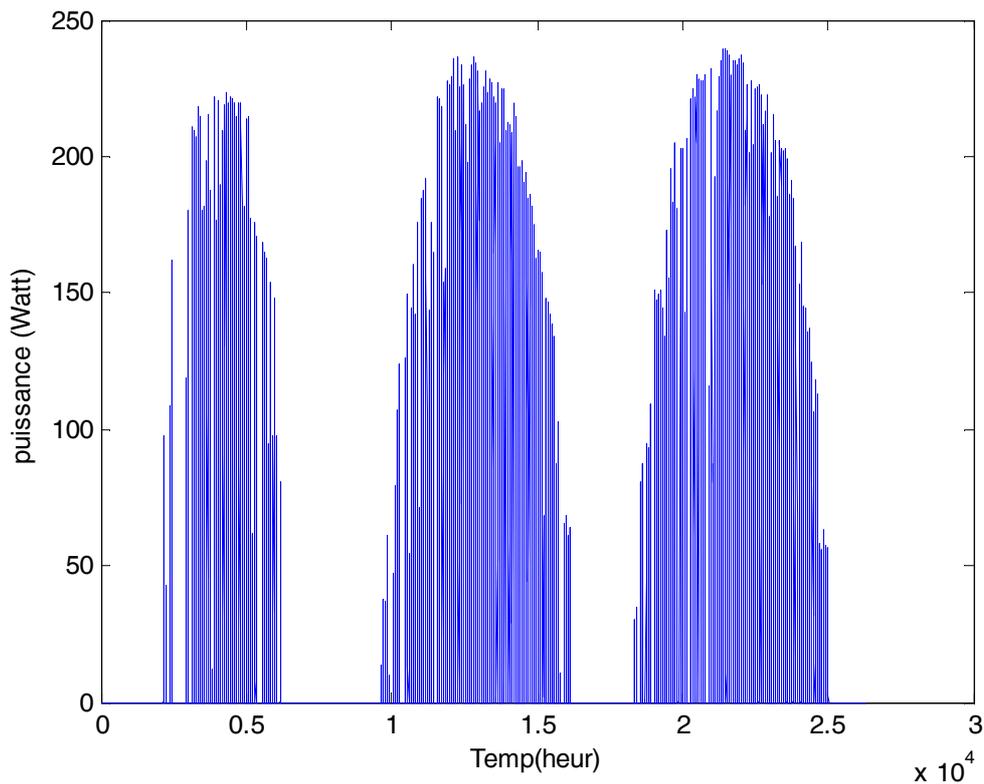


Figure IV.7: présentation du résultat du panneau solaire en Watt/h pour 03 ans.

La figure IV.7 présente une expérimentation d'une simulation avec une taille de panneau solaire de 3 mètres carrés et une puissance de 10 KW de batterie. La capacité maximum de la batterie est fortement dégradée chaque hiver. La figure II.5 montre que la perte de capacité de batterie après trois ans est dépendante de la taille du panneau photovoltaïque. Le calcul de coût d'un système photovoltaïque déconnecté est fortement dépendant de l'usure de la batterie car on considère qu'une batterie qui a perdu 40% de sa capacité doit être changée.

La figure IV.6 montre le prix cumulé d'un système connecté au réseau après 03 ans. Le coût d'un système déconnecté est calculé en ajoutant le coût des batteries de rechange au coût initial de l'installation. Le réseau électrique peut être concurrencé si le système PV est bien dimensionné, mais cela se fait au détriment de la qualité de service (faible satisfaction).

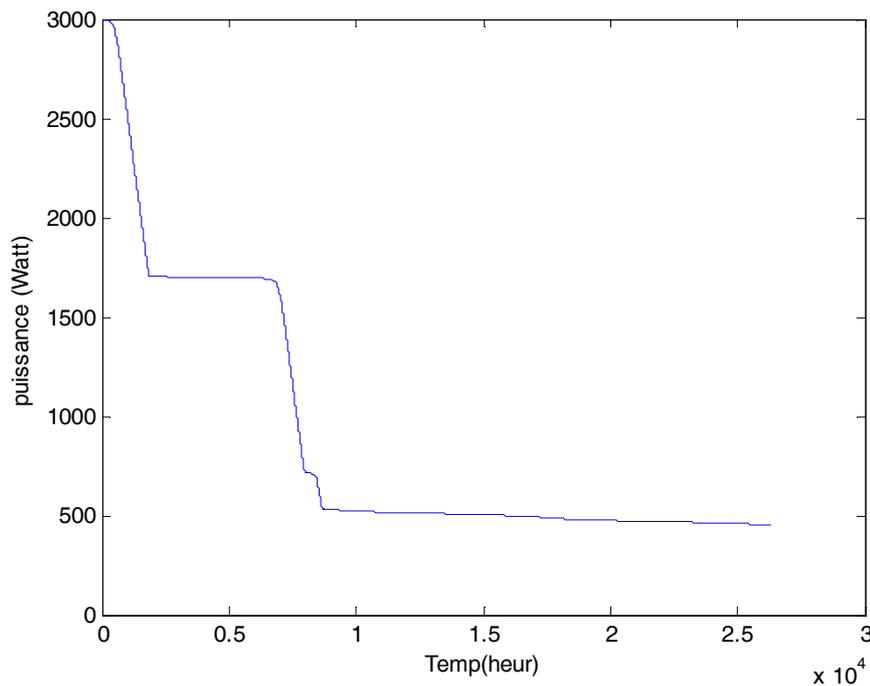


Figure IV.7: Satisfaction moyenne en watt/h sur 3ans.

La figure IV.7 présente la satisfaction moyenne. La satisfaction est un ratio entre la puissance demandée et la puissance fournie qui atteint 100% lorsque l'utilisateur ne manque jamais d'électricité. Un système PV doit être bien dimensionné pour offrir une satisfaction suffisant à de moindres coûts.

Bien que ce modèle produise des résultats exploitables, plus de données sont nécessaires pour entraîner le réseau de neurones [43] de la batterie de manière plus satisfaisante. Il serait aussi nécessaire de simuler de manière plus adéquate les cellules photovoltaïques en prenant en compte la chaleur qui est un paramètre important dans le rendement et qui n'est pas pris en compte dans ce modèle. Le principal avantage de ce modèle réside dans sa flexibilité.

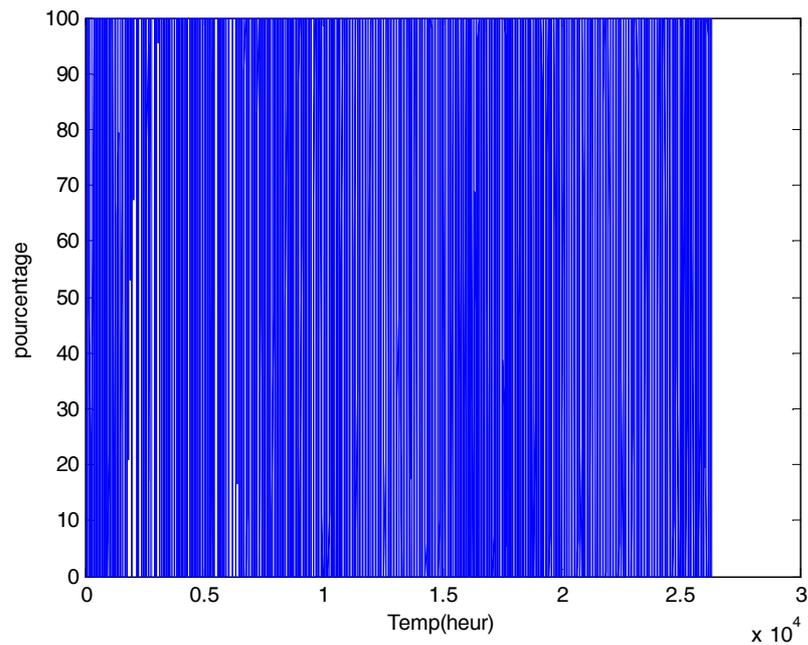


Figure IV.8: La durée de la décharge en cours, exprimée le pourcentage en heures.

Cette figure IV.8 elle est expliquée la durer de déchargement de batterie avec le temps de simulation (3ans) et nous voir quand la décharge elle est stabilisé après le 25<sup>eme</sup> jours de simulation. C'est-à-dire la fonction de charge et décharge du batterie elle est fait en règlement para port la fourniture de puissance de batterie.

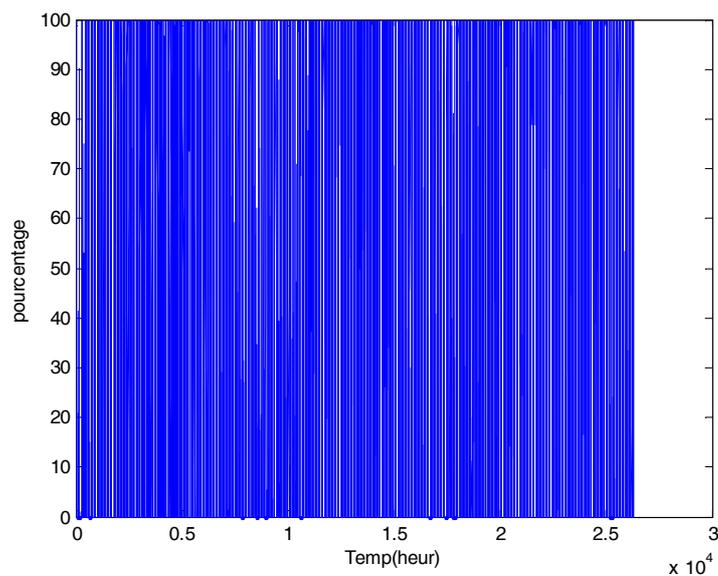


Figure IV.9: la charge de la batterie pendant le temps de la simulation, exprimée le pourcentage en heures.

Cette figure (IV.9) elle est expliquée le pourcentage de puissance de batterie avec le temps de simulation et nous avoir qui la fonction du charge du batterie elle est stabilisé para port la puissance utile.

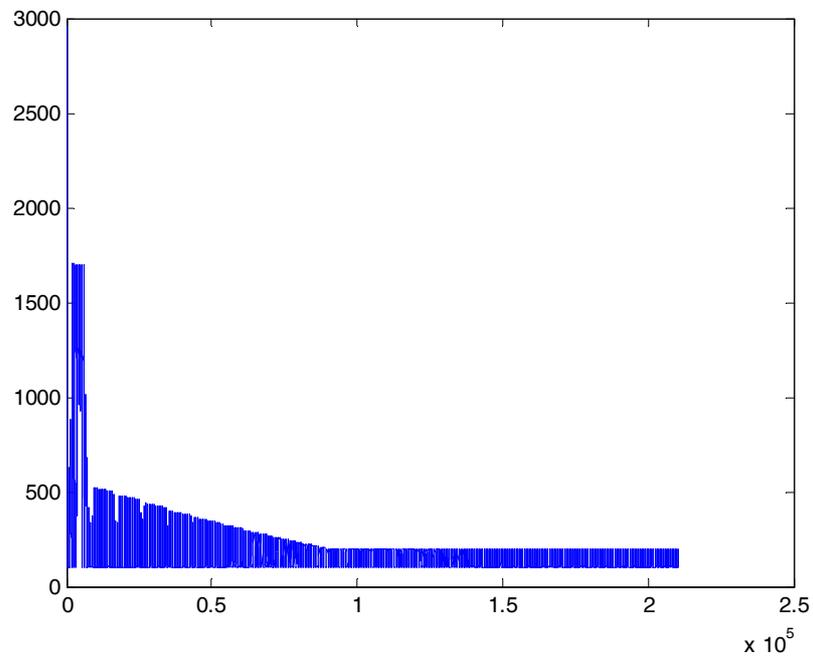


Figure IV.10 : le résultat de puissance de la batterie en Watt/h dans 24 ans.

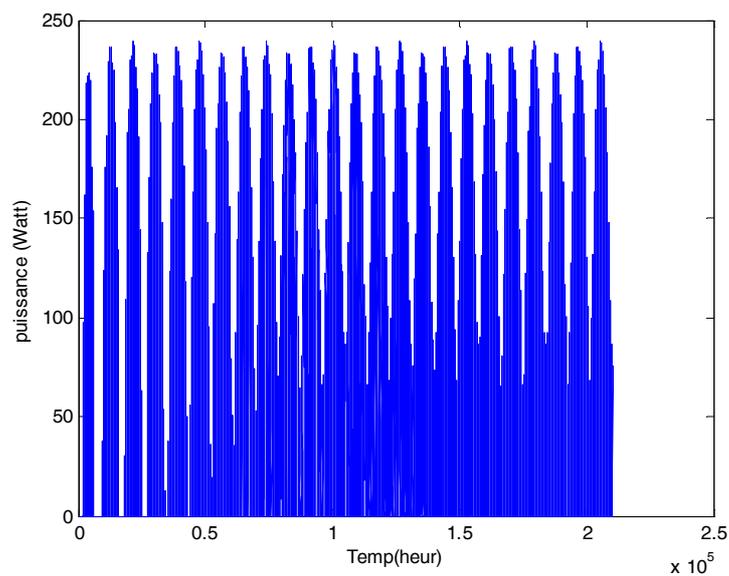


Figure IV.11: présentation du résultat du panneau solaire pour 24 ans.

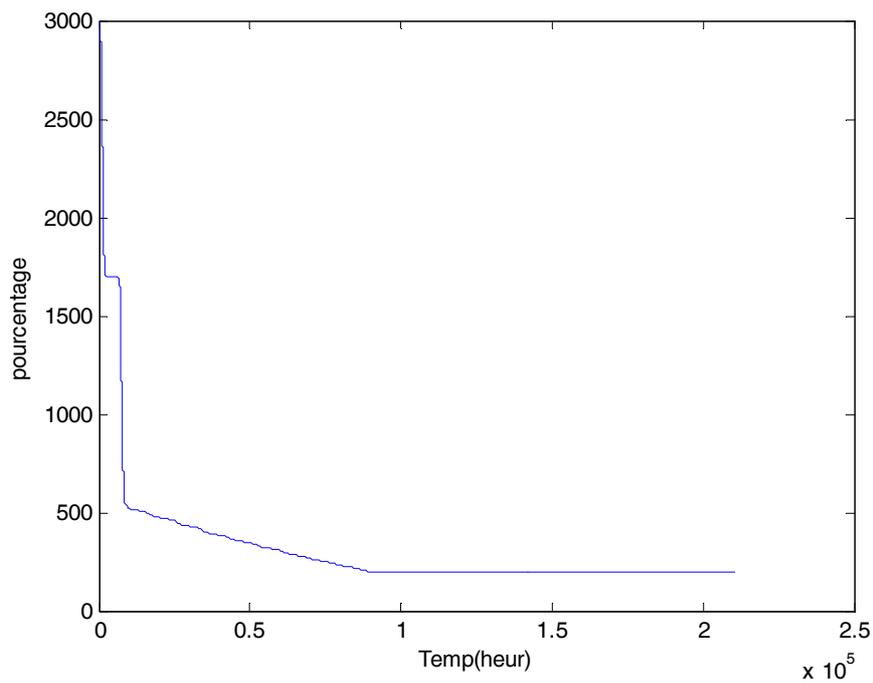


Figure IV.12 : satisfaction moyenne par 24 ans.

### Résultat :

D'après ce qui précède, nous observons que la courbe de satisfaction et le pourcentage de puissance de la batterie sont en accord avec le rapport, car le taux de satisfaction diminue à mesure que la puissance de la batterie diminue, ce qui rend le système non conforme à la neuvième année d'utilisation.

Le pourcentage d'utilisation du réseau augmente chaque jour.

# **CONCLUSION GENERALE**

## Conclusion générale

---

A partir de ce travail on a découvert l'importance de l'ingénieur et les outils de travail de modélisation et simulation sur la vue sociale et commerciale pour obtenir une vue confortable; Dans ce mémoire, nous avons présenté les définitions de simulation de la modélisation et une approche logiciel permettant la création de modèles naturelle (énergie photovoltaïque), ou multi-modèles. L'objectif final du travail était de disposer d'un outil robuste et évolutif de simulation destiné à l'étude de systèmes PV. Pour cela, nous avons analysé les approches existantes et fait le choix de cet outil sur un formalisme unificateur dans le domaine de la modélisation et de la simulation : DEVS. A partir de ce formalisme, nous avons utilisé une architecture logiciel modulaire et orientée objets.

Le logiciel JDEVS est un logiciel permet la modélisation et la simulation des systèmes complexes à événements discrets et permet l'analyse des résultats scientifiques dans plusieurs domaines de recherche, dans notre cas on a utilisé le système de photovoltaïque, on a obtenu des résultats selon plusieurs paramètres tel que la modification de la taille des panneaux, la puissance de la batterie et aussi sur les durées différentes (3 ans et 24 ans).

Dans les travaux futures nous espérons d'améliorer nos connaissances dans ce domaine et faire des modifications sur le modèle en ajoutant d'autres paramètres.

**LA  
BIBLIOGRAPHIE**

## La Bibliographie

---

- [1] Bernard P. Zeigler. Theory of Modeling and Simulation. Academic Press, 1976.
- [2] L.V. Bertalanffy. Théories générale des Systèmes. 1968.
- [3] Bernard P. Zeigler. A theory-based conceptual terminology for M and S, 2000.
- [4] C. Oussalah. Modèles hiérarchisés multi-vues pour le support de raisonnement dans les domaines techniques. Technical report, 1988.
- [5] T.I. Oren. Knowledge-Based Simulation: Methodology and Application. chap. Dynamics Templates and Semantic Rules for Simulation Advisters and Certifiers, 1989.
- [6] P. Fishwick and B.P. Zeigler. A multi-model methodology for qualitative model engineering. ACM transaction on Modeling and Simulation, vol. 2, 1992.
- [7] H. Vangheluwe, J de Lara, and P.J. Mosterman. An introduction to multi-paradigm modelling and simulation. In SCS Editions, editor, Inproceedins of AIS 2002, 2002.
- [8] Bernard P. Zeigler, Tag Gon Kim, and Herbert Praehofer. Theory of Modeling and Simulation. Academic Press, Inc., Orlando, FL, USA, 2000.
- [9] C. Jacques and G.A. Wainer. Using the cd++ DEVS toolkit to develop petri nets. In SCS, editor, Proceedings of the SCS Conference, 2002.
- [10] F. Barros. Dynamic structure discrete event system specification : a new formalism for dynamic structure modelling and simulation. In Proceedings of Winter Simulation Conference 1995, 1995.
- [11] A. Uhrmacher. Dynamic Structures in Modeling and Simulation: A Reflective Approach. ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation vol. 11, 2001.
- [12] Lewis Ntamo and Bernard P. Zeigler. Expressing a forest cell model in parallel DEVS and timed cell-DEVS formalisms. Proceedings of the 2004 Summer Computer Simulation Conference, 2002.

## La Bibliographie

---

- [13] Alejandro Troccoli and Gabriel Wainer. Implementing parallelcell-DEVS. In IEEE, editor, Proceeding of the 36th Annual Simulation Symposium, 2003.
- [14] B.P. Zeigler. Multifaceted modelling and discrete event simulation. AcademicPress, 1984.
- [15] H. Vangheluwe. The Discrete Event System specification DEVS Formalism. Tech-nical report, 2001. <http://moncs.cs.mcgill.ca/>.
- [16] Bernard P. Zeigler and S. Vahie. DEVS formalism and methodology - unity of conception diversity of application. In SCS Editions, editor, Proceedings of the 1993 Winter Simulation Conference, 1993.
- [17] Y. Kwon, H. Park, S. Jung, and T. Kim. Fuzzy-DEVS Formalisme: Concepts, Realization and Application. Proceedings AIS 1996, 1996.
- [18] N. Giambiasi and S. Ghosh. Min-Max-DEVS : A new formalism for the specification of discrete event models with min-max delays. 13th European Simulation Symposium, 2001.
- [19] A. Hamri, N. Giambiasi, and C. Frydman. Min-Max DEVS modeling and simulation. Simulation Modelling Practice and Theory (SIMPAT, October 2006. Ed. Elsevier, ISSN 1569–190X.
- [20] A. Anglani, P. Caricato, A. Grieco, F. Nucci, A. Matta, G. Semeraro, and T. Tolio. Evaluation of capacity expansion by means of fuzzy-devs. [cite-seer.ist.psu.edu/499458.html](http://ciseer.ist.psu.edu/499458.html), May 2000. 14th European Simulation MultiConference. Ghent, Belgium.
- [21] Mohamed Smaili. Modélisation à retards flous de circuits logiques en vue de leursimulation. PhDthesis, 1994.
- [22] Paul-Antoine BISGAMBIGLIA, Approche de modélisation approximativepour des systèmes à événements discrets :Application à l'étude de propagation de feux de forêt, THÈSE doctorat ,UNIVERSITÉ DE CORSE, 2008.

## La Bibliographie

---

- [23] DEVS-Group (2003). Groupe de standardisation de DEVS.<http://www.sce.carleton.ca/faculty/wainer/standard/>.
- [24] A. Hamidat, A. Hadj Arab et M. Belhamel, « Etude et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque hybride pour l'électrification du refuge Assekrem » Revue des Energies Renouvelables ; 2007.
- [25] S. Zaamta, A. Dib, "Réalisation d'un régulateur solaire à base de microcontrôleur pour le contrôle de l'état de charge et la protection des accumulateurs" Revue des Energies Renouvelables ; 2009.
- [26] Y. Azoumah, D. Yamegueu, P. Ginies, Y. Coulibaly, P. Girard, "Sustainable electricity generation for rural and peri-urban populations of sub-Saharan Africa: The flexy-energy concept" Energy Policy; 2011.
- [27] D. Linden, T.B. Reddy, "Handbook of Batteries, 3rd Edition". Edition McGraw-Hill, INC New York 2002.
- [28] Julien LABBÉ, "L'hydrogène Electrolytique Comme Moyen De Stockage D'électricité Pour Systèmes Photovoltaïques Isoles" thèse de doctorat ; l'Ecole des Mines de Paris ; 2006.
- [29] Théodore Wildi, Electrotechnique 2, édition ESKA, presses de l'Université de Laval, 1991.
- [30] Centrales photovoltaïques – Guide pour le dimensionnement et la réalisation de projets ; 1996.
- [31] D. Berndt, "Valve-regulated lead-acid batteries" Journal of Power Sources; 2001.
- [32] Linden D, "Handbook of Batteries and fuel cells", Mc Graw-Hill Inc, Third edition, 2002.
- [33] Jimmy Royer et Eric Schiller, Pompage photovoltaïque, édition Multi mondes, IEPF/Université d'Ottawa/EIER/CREPA, 1998.

## La Bibliographie

---

- [34] Théodore Wildi, Electrotechnique 2, édition ESKA, presses de l'Université de Laval, 1991.
- [35] M. Belarbi “Modélisation et Simulation d'un Système de pompage photovoltaïque” Mémoire de magister en électronique Université des sciences et de la technologie d'oran, juin 2006.
- [36] B. Mamri, M. Zaidi “contribution de système photovoltaïque avec pompage”, Mémoire d'ingénieur en électronique, Université de Constantine, 2006.
- [37] Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin 07
- [38] MEHDAOUI AHMED “ Identification par Rauschenbach et par Neuro-Flou du Point de Puissance Maximal du Générateur Photovoltaïque d'un Système Solaire En Milieu Saharien ” thèse de magister ; Ecole Normale Supérieur de l'Enseignement Technique d'ORAN ;2007.
- [39] Ressources Naturelles Canada, “Technologie et application – Photovoltaïque ; Intégration des panneaux solaires aux immeubles”.
- [40] BENCHERIF Mohammed “Modélisation de systèmes énergétiques photovoltaïques et éoliens intégration dans un système hybride basse tension ” thèse de doctorat, Departement De Physique, Universite Abou-BekrBelkaid Tlemcen, 2012.
- [41] F. Kininger, "PhotovoltaicSystemsTechnology", University of Kassel, 2003.
- [42] Jungst, R., Urbina, A., et Paez, T. (2000). Stochastic modeling of rechargeable battery life in a photovoltaic power system. Rapport Technique 1541C, Sandianationallaboratories.
- [43] Notton, G., Muselli, M., Poggi, P., et Louche, A. (2000). Optimization of stand-alone hybrid pv/engine generator/battery system for small energy load, a case study incorsica. PV Hybrid Power Systems 2000 Conference.
- [44] Haykin, S. (1994). *Neural Networks : A Comprehensive Foundation*. Macmillan.

## La Bibliographie

---

- [45] Stimpfl-Abele, G. (1995). Validation of input data for trained neural-nets. *Computer Physics Communications*.
- [46] Hecht-Nielsen, R. (1989). Neural network primer : part i. *AI Expert*.
- [47] Filippi, J.-B. (2000). Analyse, conception et programmation d'un logiciel de simulation de bassins versants. Rapport technique, University of Corsica. TCUDC5092000.
- [48] Gamma, E., Helm, R., Johnson, R., et Vlissides, J. (Addison- Wesley). *Design Patterns : Elements of Reusable Object Oriented Software*. Addison- Wesley. ISBN : 0-201-63361-2.
- [49] Jean Baptiste FILIPPI, Une architecture logiciel pour la multi-modélisation et la simulation à évènements discrets de systèmes naturels complexes, THÈSE doctorat, 2003.

**UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET**  
**FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES**  
**DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**



# **MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

**Pour l'obtention du diplôme de Master**

**Domaine : Sciences et Technologie**

**Filière : Génie Electrique**

**Spécialité : Automatique et informatique industrielle**

## **THÈME**

# **SIMULATION A ENVENIMENTS DISCRETS DEVS**

**ETUDE DE CAS : SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUES**

*Préparé par : MOSTEFAI M'hamed*

*MERABET Ahmed*

**Devant le Jury :**

<b>Noms et prénoms</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
BENABID Houari	MAA	Président
GOISMI Mohamed	MAA	Examineur
MAASKRI Mostafa	MAA	Encadreur

# *Remerciement*

*Pour assurer ce mémoire.*

*Au terme de ce travail, je remercie le bon dieu qui m'a donné la force  
et la volonté d'achever cette recherche*

*Mes plus vifs remerciements vont en premier lieu à Monsieur  
**MAASKRI MOUSTAFA** de m'avoir proposé le présent sujet, de  
m'avoir encadré et dirigé attentivement mes travaux, ainsi pour  
l'attention, le dévouement et la confiance accordée. Je voudrais  
encore remercier mes proches, ma famille qui est source d'inspiration  
suprême, qui a souvent cru en moi et qui ne m'a jamais abandonné, et  
sans avoir douté de mes capacités.*

*Je tiens à remercier tous les membres de jury qui ont consacré une  
partie de leurs temps précieux à examiner mon travail*

*Ma gratitude s'adresse aussi à tous mes amis qui m'ont encouragé  
de continuer Mes études à l'université*

*Sans oublier de remercier tous les enseignants de la faculté de  
sciences appliquées département de génie électrique à TIARET pour  
leurs patience et servitude. Ils ont contribué à nous transmettre leur  
savoir Mes remerciements les plus sincères s'adressent à toute  
personne ayant façonné ma vie et ayant contribué d'une manière ou  
d'une autre à l'achèvement de ce travail.*

## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*A l'esprit de ma mère aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour  
dont elle m'a comblé que dieu la protège dans son vaste paradis .*

*A mon père qui m'a aidé à devenir ce que je aujourd'hui, que Dieu le garde et le  
protège*

*A ma femme mon soutien moral que dieu la garde pour moi*

*A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma  
vie et mon bonheur ma fille Norelhouda Fatima Zahraa*

*A mes sœurs et frères, mon exemple éternel, et source de joie et de bonheur, que  
dieu vous garde pour moi*

*A toutes mes nièces et mes neveux que dieu vous bénéfice*

*Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient  
toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagnaient durant mon  
chemin d'études supérieures.*

*M'hamed*

## Liste d'abréviation

- M&S : modélisation et simulation
- DEVS : Discret Event System
- MA : Modèle Atomique
- MC : Modèle Couplé
- EIC : externat input coupling
- EOC : externat output coupling
- IC : internal coupling
- LF : Logique Floue
- SEF: Sous Ensemble Flou
- L-R : left - right
- SIF: System d'inférence flou
- JDEVS : JAVADEVES
- EEM : Expected Existence Measure
- GCC: GNU Compiler Collection
- PV : Photovoltaïque
- Ah : Ampèreheure
- Wh : Wattheure
- H : Heure
- SIG : système géographie
- URI : Uniform Resource Identifier
- ASCII : American Standard Code for Information Interchange
- MPPT : Maximum power point tracker

# Sommaire

# Sommaire

---

## Sommaire

Liste d'abréviation .....	I
Sommaire .....	II
List des figures .....	VI
Introduction générale .....	9

## CHAPITRE I

### Modelisation et Simulation

I.1. Introduction : .....	4
I.2. Modelisation et simulation de systemes .....	4
I.2.1 Approches de modélisation .....	6
I.2.2 Théorie Systémique .....	7
I.2.2.1 Systèmes .....	10
I.2.2.2 Modélisation .....	11
I.2.2.3 Simulation .....	13
I.2.2.4 Paradigme de Modélisation et de Simulation .....	16
I.2.3 Modélisation à évènement discret .....	18
I.2.3.1 Modélisation DEVS .....	19
I.2.3.1.1 Modèle Atomique .....	20
I.2.3.1.2 Modèle Couplé .....	23
I.2.3.2 Simulation DEVS .....	25
I.2.4 Modélisation approximative .....	27
I.2.4.1 Fuzzy-DEVS .....	28
I.2.4.2 Min-Max-DEVS .....	30
I.3. Conclusion : .....	32

## CHAPITRE II

### Présentation du logiciel JDEVS

II.1. Introduction : .....	34
II.2. Le logiciel JDEVS : .....	35
II.2.1 Moteur de modélisation et de simulation : .....	35

## Sommaire

II.2.2 Interface graphique de modélisation : .....	37
II.2.3 Stockage .....	38
II.2.4 Cadres expérimentaux : .....	39
II.3. Modélisation par automates cellulaires .....	40
II.3.1 Interface graphique de modélisation par automates cellulaires .....	41
II.3.2 Stockage de modèles cellulaires .....	42
II.4. Conclusion .....	44

### CHAPITRE III

#### Presentation Le Système photovoltaïque

III.1 Introduction : .....	46
III.2 Centrale solaire photovoltaïque .....	46
III.3 Eléments de l'installation photovoltaïque .....	46
III.3.1 Production d'énergie (Panneaux photovoltaïques) .....	47
III.3.2 Stockage de l'énergie .....	47
III.3.3 Système de régulation .....	54
III.3.4 Système de conversion .....	55
III.4 Utilisation de l'énergie produite .....	56
III.4.1 Expression en Wattheures par jour (Wh/j) : .....	56
III.4.2 Expression en Ampère-heure par jour (Ah/j) : .....	57
III.5 Type de systèmes photovoltaïque .....	57
III.5.1 Système autonome avec batterie : .....	57
III.5.2 Système autonome sans batterie : .....	57
III.5.3 Système hybride PV/génératrice : .....	58
III.5.4 Système PV centralisé : .....	58
III.5.5 Système PV sur réseau décentralisé : .....	58
III.5.6 Système PV sur réseau diesel : .....	59
III.6 Protection des systèmes solaires photovoltaïques .....	59
III.6.1 Protection par diodes .....	59
III.7 Le câblage .....	60
III.8 Avantages et Inconvénients de l'énergie Photovoltaïque .....	60

## Sommaire

---

III.8.1 Principaux avantages de l'énergie photovoltaïque :.....	60
III.8.2 Inconvénients de l'énergie photovoltaïque : .....	60
III.9 Conclusion .....	61

### **CHAPITRE IV**

#### **Résultats et discussions**

IV.1.Introduction : .....	63
IV.2. Modélisation d'un système photovoltaïque .....	63
IV.2.1 Le panneau photovoltaïque .....	65
IV.2.2 Le distributeur (Hub).....	66
IV.2.3 La batterie.....	67
2.4 Résultats de simulation .....	69
Conclusion générale .....	78
La Bibliographie .....	80

# Liste des figures

## Liste des Tableaux

Titre de Figure	Page
Figure I.1: Etapes du processus de modélisation et de simulation	05
Figure I.2: Interrelation qui constituent un Système	09
Figure I.3: Cycle de vie d'un modèle.	12
Figure I.4: Simulation continue	14
Figure I.5: Simulation discrète dirigée par horloge	14
Figure I.6: Simulation discrète dirigée par évènements	16
Figure I.7: Description d'un modèle atomique DEVS	20
Figure I.8: Description de l'évolution des éléments d'un modèle atomique	21
Figure I.9: Description d'un modèle couplé DEVS	23
Figure I.10: Arbre de Classe du simulateur DEVS	25
Figure I.11: Hiérarchie de Classe d'un environnement DEVS	26
Figure I.12: Arbre de simulation Fuzzy-DEVS	30
Figure II.1: Vue des modules du logiciel JDEVS, les carrés correspondent aux modules, les losanges correspondent aux acteurs et les cercles aux formats d'échange de données.	34
Figure II.2: Code source JAVA pour un composant atomique DEVS standard	35
Figure II.3: de Interface de modélisation en diagramme contenant un modèle couplé et	36
son panneau propriétés	38
Figure II.4: Interface de modélisation en diagramme contenant un modèle atomique et son panneau de propriétés	38
Figure II.5: Composant de l'interface graphique présentant les modèles disponibles dans la bibliothèque	39
Figure II.6: Interface de modélisation en diagramme de l'environnement JDEVS	40
Figure II.7: Architecture standard des modèles cellulaires dans JDEVS	41
Figure II.8: Document de de format XML des modèles cellulaires	43
Figure II.9: Cadres expérimentaux 3d et 2d de simulation de modèles cellulaires	43

## Liste des Tableaux

Figure III.1 Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec batterie de stockage	46
Figure III-2 Principe de production d'électricité dans un convertisseur électrochimique.	48
Figure III-3 Protection par diodes en série.	59
Figure IV.1:Un système photovoltaïque	63
Figure IV.2:Modèle du système PV dans JDEVS	64
Figure IV.4:le traitement des résultats donnés par JDEV en MATLAB	69
Figure IV.5: l'utilisation de la batterie après 03 ans, en fonction de la taille du panneau photovoltaïque	70
Figure IV.6: Prix d'un système PV déconnecté après 15 ans.	70
Figure IV.7: présentation du résultat du panneau solaire pour 03 ans.	71
Figure IV.7:Satisfaction moyenne sur 3ans.	72
Figure IV.8:La durée de la décharge en cours, exprimée en heures.	73
Figure IV.9:la charge de la batterie pendant le temps de la simulation.	73
Figure IV.10 : la résultat de puissance de la batterie dans 24 ans.	74
Figure IV.11: présentation du résultat du panneau solaire pour 24 ans.	74
Figure IV.12 : satisfaction moyenne par 24 ans.	75

# **INTRODUCTION GENERALE**

## Introduction générale

---

Avant tous, la recherche scientifique est développée en parallèle avec la technologie présente, et l'être humain a besoin de l'utilisation des capacités naturelles par moyenne basse; Dans ce mémoire on a fait la modélisation et la simulation d'un système naturel pour minimiser les couts et les frais de l'installation des panneaux solaires pour produise de l'énergie solaire (panneau photovoltaïque).

Dans le domaine d'ingénierie la modélisation et la simulation sont très importantes, alors que dans ce mémoire nous avons fait une procédure en utilisant le logiciel JDEVS, ce dernier est un outil valable et efficace pour avoir des résultats qui satisfera l'utilisateur pour objectif d'une simulation d'un system a évènement discret valide, pour faire la simulation nous avent choisir le logiciel JDEVS ; se lui la est une implémentation du cadriciel. Plusieurs raisons ont motivé le développement effectif de l'architecture générique ainsi que des techniques de modélisation. Le cas que nous étudions c'est le système photovoltaïque.

Pour organiser ce mémoire, on a présenté notre travail par quatre chapitre, le premier chapitre est intitulé la modélisation et la simulation, le 2<sup>eme</sup> chapitre nous sommes attachés à représenter une vue générale sur le logiciel qui a fait la simulation, le 3<sup>eme</sup> chapitre nous explique une vue générale sur l'énergie solaire, les moyen et l'équipement pour produire cette énergie, et dans le 4<sup>eme</sup> chapitre on fait une simulation du système par logiciel JDEVS et consultation des résultats obtenus.

# **CHAPITRE I**

## **Modélisation ET Simulation**

**I.1. Introduction :**

L'homme n'a cessé de chercher à comprendre le monde qui l'entoure. Les différentes phases d'étude nécessaires à cette compréhension ont toujours évolué de pair avec la technologie: observation, constatation, hypothèse, preuve, explication, acquisition, modélisation, etc.

L'avènement de l'informatique et l'apparition de nouveaux formalismes de traitement ont écourté ou fait disparaître certaines de ces phases; les progrès des méthodes numériques et l'augmentation des performances des ordinateurs permettent aujourd'hui, grâce à des simulations de plus en plus rapides et détaillées, de prédire le comportement de systèmes complexes. La phase qui consiste à décrire le comportement d'un système est appelée la modélisation. La théorie de la modélisation et de la simulation est basée en grande partie sur la théorie générale des systèmes. La théorie générale des systèmes est un principe selon lequel tout est système, on parle aujourd'hui de Théorie Systémique.

Les travaux présentés dans ce chapitre, et plus généralement dans ce mémoire, concernent la :

**I.2. Modélisation et simulation de systèmes**

Modélisation et la simulation informatique de systèmes complexes. Notre réflexion et les développements associés se réfèrent aux notions de système, de modèle, de modélisation, et de simulation. Ces notions sont dépendantes des techniques et du domaine d'application choisis. Toutes ces entités interviennent dans le processus de modélisation et de simulation. La figure I.1 présente ces différents éléments.

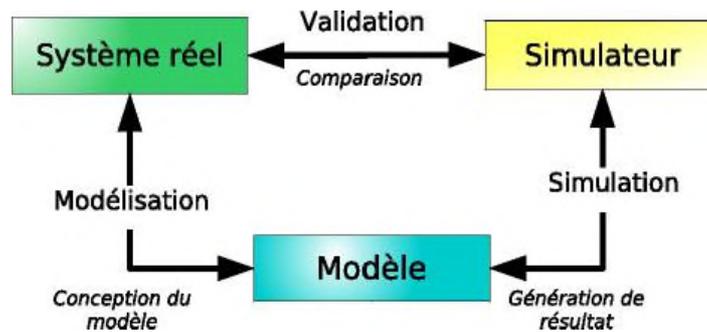


Figure I.1: Etapes du processus de modélisation et de simulation [1]

Le système est l'élément à la base de l'étude, c'est de là que les données nécessaires à l'élaboration du modèle puis à sa validation sont issues. Il est lié au modèle par une relation appelée la relation de modélisation qui décrit le système dans un environnement choisi.

Le modèle est une représentation du système réel dans un certain environnement. Les modèles sont associés à une structure de contrôle appelée simulateur. Il reproduit le comportement du système sous certaines conditions et génère les résultats issus de la simulation du modèle. Ce processus est appelé simulation.

Le simulateur permet de faire évoluer le modèle dans le temps. Les résultats de ce processus sont comparés aux données du système réel afin de vérifier la conformité du modèle, cette relation entre le simulateur et le système est appelée la relation de validation. Dans ce chapitre nous revenons en détail sur toutes ces notions[1].

Dans la première partie nous décrivons succinctement différentes approches de modélisation: systémique, empirique mécaniste et approximative.

Dans la seconde partie nous présentons de manière générale l'approche de modélisation systémique. Elle est à la base du formalisme de modélisation utilisé. De plus, nous présentons la théorie systémique, et donnons les définitions de système, de modèle, de modélisation et de simulation.

Avant de conclure, dans la troisième partie, nous décrivons le formalisme de modélisation et de simulation à la base de nos travaux, à savoir le formalisme DEVS (Discrete Event system), introduit par le professeur B.P. Zeigler [1].

### I.2.1 Approches de modélisation

D'une façon générale, nous pouvons distinguer plusieurs approches de modélisation : systémique, empirique, mécaniste, approximative. Les approches de modélisation prédictive, que l'on peut qualifier de "non approximatives" font opposition aux méthodes dites approximatives.

✓ **L'approche systémique** : se base sur une description mathématique ou physique de plusieurs processus simultanés et de leurs interactions pour définir des modèles. L'objectif de ce type de modèle est de prendre en compte l'ensemble des variables clés et leurs interactions.

✓ **L'approche empirique** : est déduite des tendances observées à l'intérieur d'un ensemble de données, elle part du postulat que ces tendances ne vont pas changer dans le temps. Les représentations logiques structurent certaines de ces approches empiriques. Trois types de raisonnements logiques peuvent être distingués:

1. le raisonnement déductif, qui permet à partir de connaissances sur un phénomène quelconque de déduire des conclusions;
2. le raisonnement inductif au contraire part des conclusions pour déterminer les prémisses de règle;
3. le raisonnement adductif qui cherche à attacher des causes plausibles à un ensemble de prémisses.

✓ **L'approche mécaniste** : est basée sur la connaissance du fonctionnement d'un système. Les différents processus qui composent le système sont modélisés indépendamment à l'aide de formules qui décrivent une loi ou une règle. Les modèles issus de cette approche comprennent trois parties:

1. Une base de fait, mémoire de travail qui contient les données initiales et les hypothèses émises décrivant le problème à traiter;
2. Une base de règles constituant la connaissance permanente;

3. Un moteur d'inférence, mécanisme ou algorithme, qui exploite les règles.

Les moteurs d'inférence fonctionnent selon deux mécanismes:

- (a) par chaînage avant, ils partent de la base de faits pour aboutir à des conclusions: "si Y alors X";
- (b) par chaînage arrière ils prennent la procédure dans le sens inverse, des conclusions aux conditions initiales. Ces deux mécanismes peuvent aussi être combinés.

Ce genre d'approche se prête bien à la modélisation de processus complexes qui requièrent l'expertise de spécialistes. Le savoir-faire de ces derniers aide à l'élaboration des bases de règles pour la modélisation des processus. Ces modèles sont en revanche peu appropriés pour décrire un système dans sa totalité quand les bases de règles à mettre en œuvre ne peuvent pas prendre en compte l'ensemble des paramètres du phénomène.

✓ **L'approche approximative:** dans le cadre des modes de raisonnement présentés, un prédicat est soit vrai soit faux. Cependant, le raisonnement et la mise en place de modèles reposent souvent sur des connaissances et des bases de données imparfaites. La mise en place de procédures visant à établir des scénarii prédictifs fiables doit permettre de prendre en compte les données incertaines et / ou imprécises des modèles. Concevoir de telles procédures implique de sortir des approches classiques de la logique. Cela exige aussi de définir une représentation de l'incertitude et de l'imprécision, de choisir des procédures de raisonnement qui prennent en compte ces aspects tout en les propageant au cours des étapes du raisonnement afin de pouvoir les qualifier et les quantifier dans les résultats.

Dans la partie suivante nous revenons en détail sur l'approche systémique, en effet le formalisme de modélisation utilisé est basé sur cette approche.

### I.2.2 Théorie Systémique

Notre étude s'inscrit dans un courant de pensée qui propose une certaine vision du monde, la systémique. De cette vision découle une pratique particulière de l'activité scientifique. La partie proprement opératoire de l'analyse systémique est née

des travaux de L. Von Bertalanffy [2]; elle met l'accent sur la notion du système comme faisant partie d'un tout. Jusque-là, l'approche scientifique était résolument réductionniste, c'est-à-dire qu'elle procédait par décomposition du réel pour en isoler une partie qui devenait l'objet d'étude. Cette approche a trouvé ses limites dans des perspectives d'explications plus globales où les mécanismes décrits au niveau individuel ne suffisent pas à expliquer le comportement de l'ensemble.

Le mot "système" apparaît dès le XVIII<sup>ème</sup> siècle, il est à l'origine des concepts fondateurs de la systémique ou de la science des systèmes. Il sera repris en 1950 par le biologiste théoricien V. Bertalanffy qui voulait pouvoir décrire dans le même langage les systèmes artificiels et les systèmes naturels, à l'époque les systèmes fermés ou statiques et les systèmes ouverts ou dynamiques.

Un système permet de représenter un phénomène perçu comme complexe, il peut être déterminé à partir de quatre questions intrinsèquement liées:

Ces questions sont résumées par la figure I.2 :

1. il fait quoi? → fonction;
2. dans quoi? → environnement;
3. pour quoi? → finalités;
4. devenant quoi? → transformation.

Autrement dit en interrogeant les interrelations qui le constituent, interrelations avec ses sous-systèmes et avec son environnement, il est possible de décrire un système.

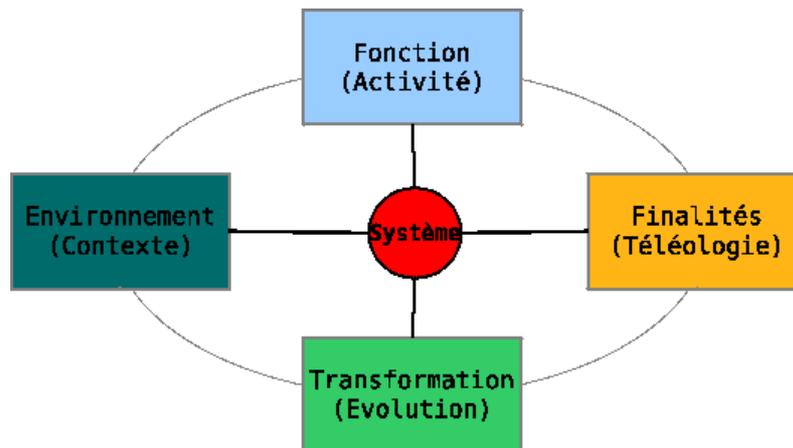


Figure I.2: Interrelation qui constitue un Système

Le concept moderne de système date des années 50. Un système est décrit sous deux aspects: structurel et fonctionnel (comportemental) [3].

Sous son aspect structurel un système comprend quatre composants:

1. les éléments constitutifs. Nous pouvons en évaluer le nombre et la nature;
2. une limite, ou une frontière, qui sépare la totalité des éléments de son environnement avec le milieu extérieur. La limite d'un système peut être floue, ou mouvante, comme dans le cas d'un feu de forêt avec son front de flamme;
3. des réseaux de relations (liens). Les éléments sont en effet inter reliés ou connectés pour pouvoir communiquer et s'échanger des informations;
4. des stocks (lieu de stockage) où sont gardées les informations qui doivent être transmises ou réceptionnées.

L'aspect structurel est la représentation de la structure potentielle d'un système. Sous son aspect fonctionnel un système est aussi décrit par quatre éléments:

1. des flux d'informations, qui empruntent les réseaux de relations et transitent par les stocks. Ils fonctionnent par entrées / sorties avec l'environnement;
2. des centres de décision qui organisent les réseaux de relations, ils coordonnent les flux et gèrent les stocks;
3. des boucles de rétroaction, elles servent à informer les centres de décision sur l'état général du système;

4. des ajustements réalisés par les centres de décision en fonction des boucles de rétroaction.

L'aspect fonctionnel est la représentation du comportement du système.

Dans cette partie nous donnons plusieurs définitions. Dans la première section nous décrivons la notion de système. Dans les sections deux, trois et quatre nous apportons les notions de modélisation, simulation et paradigme de modélisation et de simulation.

### I.2.2.1 Systèmes

Le système comme étant un ensemble hiérarchique d'éléments matériels ou immatériels (êtres vivants, machines, méthodes, règles, etc.) en interaction, transformant par un processus des éléments d'entrée en éléments de sortie. Par exemple, une éolienne transforme le vent en électricité. C'est une organisation hiérarchique de sous-systèmes, considérés eux-mêmes comme des systèmes à part entière (le système "éolienne" est composé de sous-systèmes "palles", "moteur", etc.). Nous parlons de systèmes physiques, biologiques ou sociaux, systèmes qui relèvent de la systémique. Nous voyons ici que la systémique se veut transdisciplinaire et / ou pluridisciplinaire en essayant de trouver des lois générales indépendantes des contextes d'application. Cette transdisciplinarité nous intéresse tout particulièrement [6].

La systémique distingue l'aspect structurel et fonctionnel des systèmes, elle définit aussi les systèmes comme causaux, les sorties sont la conséquence d'une entrée, ou déterministes, à une entrée donnée ne peut correspondre qu'une seule sortie. Cette définition est à la base de nombreux formalismes tels les équations différentielles, les automates à états finis, les réseaux de Pétri, etc.

Plus généralement, un système A peut être défini par la formule:

$$A = \langle r, X, \Omega, S, Y, \delta, s\lambda \rangle \quad (I.1)$$

avec:

–r : base de temps;

- $X$  : ensemble des états d'entrée;
- $\Omega : r \rightarrow X$  : états d'entrée courants;
- $S$  : ensemble des états du modèle;
- $\delta : \Omega \times S \rightarrow S$  : fonction de transition, elle fait évoluer l'état du modèle en fonction des états d'entrées (activations);
- $Y$  : ensemble des états de sortie;
- $\lambda : S \rightarrow Y$  : fonction de sortie.

Dans l'équation I.1, la base de temps  $r$  représente la variable de temps ou l'écoulement d'une durée. L'ensemble des états d'entrée  $X$  constitue toutes les activations d'entrées possibles pour le système.  $S$  représente l'ensemble des états que peut prendre le système. Etymologiquement, un état est une matière d'être à un moment donné.

La dynamique du système est décrite par la fonction de transition  $\delta$ , elle applique les états d'entrée  $\Omega$  à l'état courant  $S$  pour transiter vers un nouvel état. Le système génère une sortie en appliquant la fonction  $\lambda$  à partir de l'état courant. Les fonctions de transition et de sortie sont activées pour faire évoluer le système dans le temps.

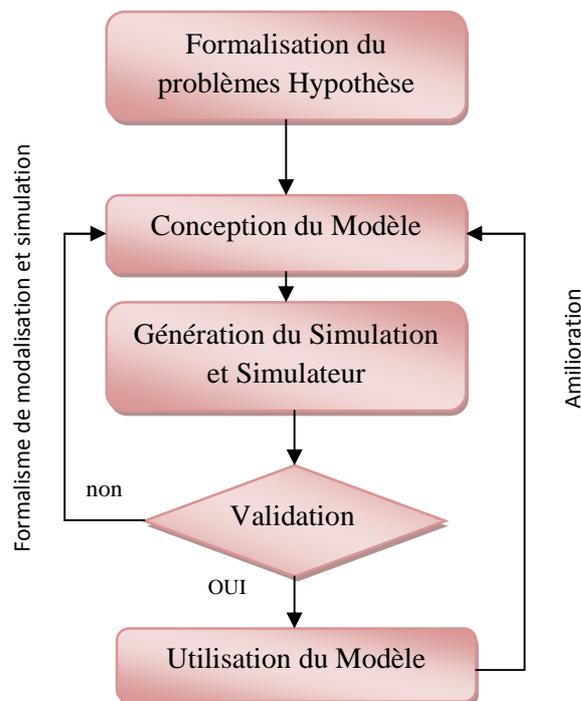
### I.2.2.2 Modélisation

Selon le domaine historique et la discipline étudiée, la définition de modèle et de modélisation peut varier notablement. Il y a une relation forte entre contexte et définition. D'après P. Fishwich [6] "modéliser c'est décrire une réalité sous la forme d'un système dynamique, à l'aide d'un langage de description, à un certain niveau d'abstraction". Toujours d'après P. Fish-wich [6] la modélisation est représentée par la symbiose entre le formalisme et les techniques de modélisation qui poursuivent le même objectif: "dégager les meilleures métaphores et analogies permettant de mieux comprendre un phénomène quelconque".

Selon C. Oussalah [4] "la modélisation est un épimorphisme entre un système réel et un modèle dont la finalité est de donner une représentation simplifiée et observable de la structure et du comportement du système réel".

Ceci nous conduit à définir, dans notre contexte, la modélisation comme un processus d'identification d'un phénomène et l'opération par laquelle on établit son modèle, afin d'en proposer une représentation interprétable, reproductible et simulable. C'est une technique qui consiste à restituer, sous une forme compréhensible par l'ordinateur, un objet ou un phénomène quelconque. Ce modèle, ainsi constitué, permet d'approcher le fonctionnement ou le comportement du système par l'intermédiaire d'un certain nombre d'hypothèses et de règles qui composent ce que l'on appelle un formalisme de modélisation.

La modélisation et la simulation sont des domaines scientifiques faisant un grand usage de l'informatique, et leur mise en œuvre s'effectue au sein de logiciels appelés environnements de modélisation et de simulation.



FigureI.3: Cycle de vie d'un modèle.

La modélisation systémique caractérise une des grandes méthodes de modélisation contemporaine. Elle veille à expliciter "les points de vue" de l'observateur-concepteur qui la met en œuvre, et à proposer une des formes de compréhension intelligible du système sans prétendre l'expliquer. La modélisation systémique est fondée sur deux hypothèses:

1. rendre compte des fonctions et fonctionnements du système;
2. expliciter les finalités attribuées au phénomène modélisé en veillant à les différencier explicitement des finalités de l'observateur-concepteur.

En considérant un système de manière globale, par abstraction de certaines contraintes, nous pouvons associer à un système complexe une représentation simplifiée de sa structure et de son fonctionnement. Cette représentation, plus simple à décrire et utiliser s'appelle un modèle.

L'usage de l'ordinateur et des modèles numériques ouvre, grâce à la modélisation et à la simulation, un champ scientifique nouveau avec sa méthodologie propre de validation expérimentale du modèle (figure I.3) et l'usage de celui-ci pour prédire des comportements inaccessibles à la mesure car situés dans le futur lointain ou à des échelles trop grandes ou trop petites pour être instrumentées.

### **I.2.2.3 Simulation**

La simulation est rapidement devenue incontournable pour la modélisation des systèmes complexes. Elle permet de gérer des modèles afin de produire des données comportementales, c'est-à-dire de faire évoluer les états du modèle dans le temps.

Le temps peut être vu de manière continue ou discrète. Selon que les états du système soient spécifiés de manière dénombrable ou non dans un modèle on parle de simulation discrète ou continue. Parmi ces systèmes, les ondes en général, ou la quantité d'oxygène dans l'air, constituent des systèmes à états continus car leurs valeurs changent continuellement. Un système représentant un guichet automatique de banque peut être vu au contraire comme un système à états discrets car l'arrivée d'un client est un événement subi et dont les quantités sont dénombrables.

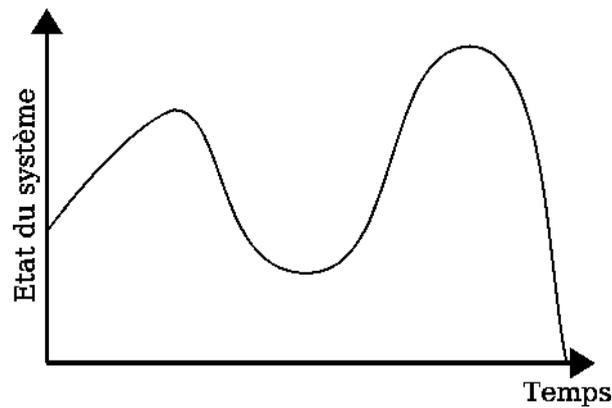


Figure I.4: Simulation continue.

Figure I.4 : Un système continu est un système mettant en jeu des signaux continus. Ils ont les mêmes propriétés qu'une fonction continue. Dans le cadre de simulation continue, une fonction continue est à la base de l'évolution du modèle dans le temps. Ces simulations nécessitent une description de type mathématique analytique du modèle car il doit être possible de donner l'état du système en tout temps. La complexité de tels modèles grandit toutefois avec le nombre de paramètres et il devient rapidement impossible de modéliser des systèmes complexes de manière purement analytique. Il est alors nécessaire de décrire ces systèmes avec d'autres approches de simulation.

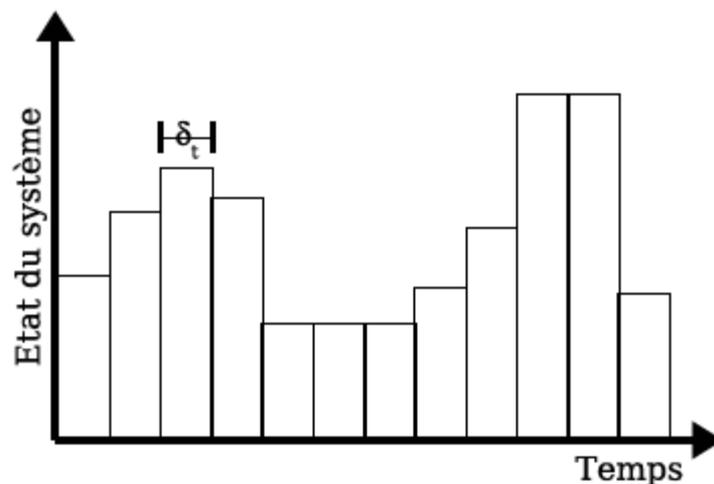


Figure I.5: Simulation discrète dirigée par horloge.

Figure I.5 : Un système discret est un système qui met en jeu des informations qui ne sont prises en compte qu'à des moments précis. En général ces instants sont

espacés d'une durée constante appelée période d'échantillonnage ( $\delta_t$ ). On parle de systèmes discrets par opposition aux systèmes continus. Le terme discret vient des mathématiques.

Dans une approche de simulation discrète, l'état futur du modèle dépend de son état actuel. Les méthodes de simulation discrète correspondent aux méthodes de résolution d'équations différentielles. La simulation de ce type de modèles implique que les changements d'états s'effectuent de manière discrète dans le temps. Il existe deux façons de gérer le temps en simulation discrète. La simulation est :

- dirigée par une horloge, lorsque l'état du modèle est réévalué à intervalles réguliers. Dans la figure I.5, un intervalle  $\delta_t$  sépare deux transitions d'états.
- dirigée par les événements, lorsque l'état du modèle est réévalué en fonction de l'arrivée d'évènement. Dans ce cas la simulation est dite à événements discrets (figure I.6).

Les méthodologies de simulation à événements discrets présentent de nombreux avantages sur la simulation dirigée par horloge. En effet, il est possible de simuler un modèle en temps discret grâce aux événements discrets en programmant des événements d'activation à intervalles réguliers. L'intérêt de l'utilisation de la simulation à événements discrets apparaît lorsque le phénomène simulé utilise des échelles de temps très différentes, de l'ordre de la seconde pour une partie du modèle et de l'année pour une autre; dans ce cas, si la simulation est dirigée par une horloge, la règle veut que le pas de temps utilisé soit celui du modèle utilisant la plus petite échelle de temps, même si le sous modèle n'est actif que pendant une petite partie du temps complet de la simulation. Les simulations dirigées par événements discrets permettent de ne pas réévaluer l'état du modèle lorsque ce n'est pas jugé nécessaire.

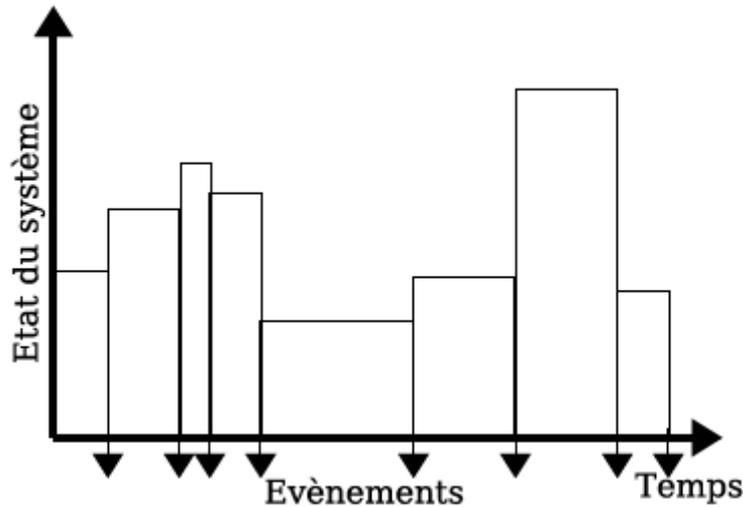


Figure I.6: Simulation discrète dirigée par événements.

Dans notre contexte, nous pouvons définir la simulation comme un procédé informatique visant à faire évoluer un système afin de prédire son comportement. Ceci dit, il ne faut pas oublier que les résultats obtenus par simulation dépendent des hypothèses retenues pour construire les modèles (figure I.3); et qu'il ne faut évidemment pas confondre résultat de simulation et résultat réel. La simulation ne doit pas être utilisée sans prise de recul; la vérification de la validité des modèles (figure I.3), et si nécessaire leurs améliorations sont des phases importantes afin de ne pas prendre de risque inconsidéré dans les décisions.

Nous l'avons vu, la modélisation peut être représentée par la symbiose entre le formalisme et les techniques de modélisation; en fonction du système à étudier ou du domaine d'application, il peut être nécessaire d'utiliser différentes techniques de modélisation. Celles-ci peuvent être regroupées au sein d'un paradigme de modélisation et de simulation.

#### **I.2.2.4 Paradigme de Modélisation et de Simulation**

Un paradigme est un modèle exemplaire d'une chose ou d'une réalité. En sciences le paradigme désigne une vision du monde ou un mythe fondateur d'une communauté scientifique particulière. Nous pouvons alors parler d'un paradigme de modélisation et de simulation comme étant l'ensemble des définitions et formalismes, des méthodes, des outils et techniques qui caractérisent une activité de modélisation.

Par exemple, nous parlons du paradigme objet, caractérisé par les notions d'encapsulation, d'héritage et de polymorphisme.

Il existe beaucoup de paradigmes de modélisation. Parmi les plus connus, nous pouvons citer les modèles stochastiques, les algorithmes évolutionnaires ou les techniques d'apprentissage comme les réseaux de neurones.

L'augmentation de la puissance de calcul des ordinateurs nous autorise aujourd'hui à être plus pointus dans nos représentations des systèmes. La question n'est pas de savoir si leurs états sont dénombrables ou indénombrables, mais plutôt de faire cohabiter plusieurs représentations au sein d'un même modèle. Il semble assez évident que la complexité et la diversité des systèmes soient mieux appréhendées par une diversité des modèles. L'hétérogénéité des modèles nous amène donc à la construction de multi-modèles. Un multi-modèle rassemble plusieurs paradigmes et / ou formalismes dans sa réalisation - nous parlons alors de multi-modélisation. Ce terme a été introduit par T.I. Oren en 1989 [5] et s'est fait connaître par les travaux de P. Fishwick et B.P. Ziegler [8]. Il existe aussi le terme de modélisation multi-paradigmes ; H. Vangheluwe [7] le définit comme s'adressant à trois axes de recherches orthogonaux:

1. à la modélisation liée au multi-formalisme (donc à la multi-modélisation), c'est-à-dire au couplage de modèles spécifiés dans différents formalismes;
2. au problème de changement de niveau d'abstraction dans les modèles;
3. à la méta-modélisation, c'est-à-dire la construction de modèles de modèles.

Pour intégrer différents paradigmes, nous considérons les travaux effectués par B.P. Zeigler depuis le début des années 1970 [1]. Ces travaux se basent sur les mathématiques discrètes et plus particulièrement sur la théorie générale des systèmes. Dans ce contexte, des travaux formels ont été menés pour développer les fondements théoriques de la modélisation et de la simulation des systèmes dynamiques [10]. Ces travaux ont notamment donné naissance au formalisme DEVS (Discrete Event system) pour la spécification des systèmes à événements discrets.

Nous avons choisi comme paradigme de modélisation et de simulation le multi formalisme DEVS [1]. Il offre la possibilité d'encapsuler, pour un même système, des modèles décrits à partir de différents formalismes tels que les équations différentielles [10] ou les réseaux de Pétri [11], etc. De plus, il permet d'appréhender la complexité des systèmes étudiés, et il s'abstrait totalement de la mise en œuvre des simulateurs associés aux modèles. Il existe également plusieurs extensions du formalisme DEVS adaptées à domaines précis mais nous y reviendrons par la suite.

### **I.2.3 Modélisation à évènement discret**

Depuis les années 1970, des travaux formels ont été menés pour développer les fondements théoriques de la modélisation et de la simulation des systèmes dynamiques à évènements discrets. Le formalisme DEVS, de l'anglais Discrète Event system Spécification, a été introduit par le professeur B.P. Zeigler [1] comme un formalisme abstrait pour la modélisation à évènements discrets.

Le formalisme DEVS est une approche de modélisation basée sur la théorie générale des systèmes. Plus précisément, c'est un formalisme modulaire et hiérarchique pour la modélisation, centré sur la notion d'état. Un système est représenté, pour sa forme structurelle, par deux types de modèles.

La modélisation consiste à interconnecter ces différents types de modèles afin de former un nouveau modèle décrivant le comportement du système étudié, c'est l'aspect fonctionnel.

Les modèles atomiques sont les composants de base du formalisme, ils décrivent le comportement du système. Leur fonctionnement est proche de celui des "states machine" (machines d'états).

Pour décrire un système plus complexe nous interconnectons plusieurs modèles atomiques pour former un modèle couplé. Ce nouveau modèle peut être utilisé comme modèle de base dans une description de plus haut niveau, c'est l'aspect hiérarchique du formalisme.

Au niveau de la structure du système, cette approche peut sembler statique; le formalisme DEVS dans sa forme basique ne tient pas compte de l'évolution potentielle de la structure du système, seul les états peuvent évoluer. Toutefois le formalisme a été étendu pour permettre ces changements de structure, et il en est, ou peut en être de même pour d'autres aspects.

Le formalisme DEVS peut être vu comme un environnement de multi-modélisation regroupant de manière cohérente d'autres formalismes de modélisation basés eux aussi sur la théorie générale des systèmes et centrés sur les états. Sa capacité d'ouverture, au sens informatique, en fait un formalisme adapté à un grand nombre de domaines d'application [12][13][14][15].

Au niveau de la simulation, il permet l'analyse de systèmes complexes à évènements discrets décrits par des fonctions de transitions d'états, et des systèmes continus décrits par des équations différentielles [10]. A ce niveau, le principal avantage de l'approche tient au fait que, pour un modèle décrit suivant les spécifications du formalisme, les algorithmes de simulations sont générés automatiquement. Cela permet de s'abstraire totalement de l'implémentation des simulateurs lors de la phase de modélisation, ce qui conduit à une séparation explicite entre la modélisation et la simulation.

Les deux types de modèles (atomique et couplé) du formalisme sont décrits dans la première section, dédiée à la phase de modélisation, et dans la seconde section, nous présentons les aspects de simulation.

### **I.2.3.1 Modélisation DEVS**

Le formalisme DEVS repose sur la définition de deux types de modèles : les modèles atomiques et les modèles couplés. Les modèles atomiques permettent de représenter le comportement de base du système. Les modèles couplés, quant à eux, sont définis par un ensemble de sous modèles atomiques et / ou couplés. Ils permettent de représenter la structure interne du système grâce à la définition de couplages entre modèles.

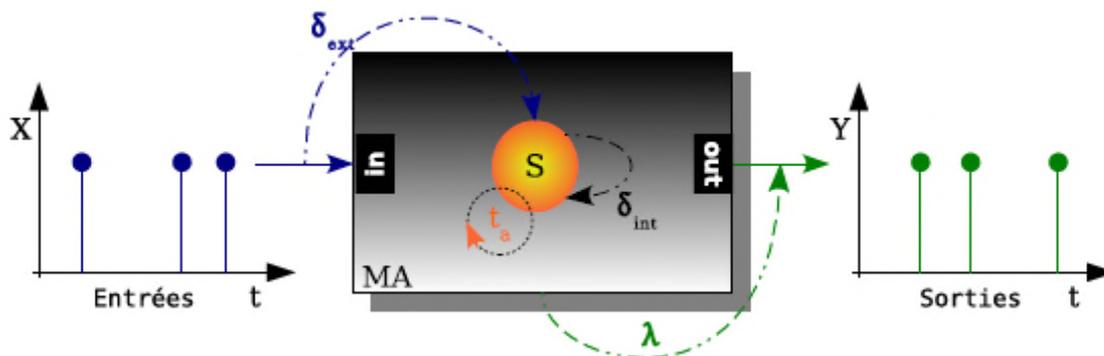
### I.2.3.1.1 Modèle Atomique

Le modèle atomique peut être vu comme un machine d'états basé sur le temps. Il permet de décrire l'aspect fonctionnel ou comportemental du système.

Le modèle atomique fournit une description autonome du comportement du système, défini par des états et des fonctions d'entrées / sorties et de transitions internes du modèle. L'évolution du modèle se fait par changement d'état en fonction de stimuli externes (via une entrée) ou internes (via une fonction de transition). Ces changements d'états ont pour but de déterminer la réponse comportementale du système à ces stimuli.

Dans le formalisme DEVS (classique) la notion de couple (numéro de port, valeur) est introduite pour chaque entrée, ou sortie d'un modèle atomique. Une entrée correspond à la réception d'une ou plusieurs valeur(s) sur un numéro de port. Une sortie correspond à l'émission d'une ou plusieurs valeur(s) sur un numéro de port.

Le modèle atomique, figure I.7, est caractérisé par la formule suivante (équation I.2):



Fig

ure I.7: Description d'un modèle atomique DEVS

$$MA = \langle X, Y, S, t_a, \delta_{ext}, \delta_{int}, \lambda \rangle \quad (I.2)$$

Avec

–  $X = \{(PIN, v) \mid PIN \in \text{Ports d'entrée}, v \in X_{PIN}\}$  : la liste des entrées du modèle, chaque entrée étant caractérisée par un couple (numéro du port / valeur);

- $Y = \{(POUT, v) | Pout \in Ports \text{ de sortie}, v \in Y_{POUT}\}$  : la liste des sorties du modèle, chaque sortie étant caractérisée par un couple (numéro du port / valeur);
- $S$  : l'ensemble des états ou des variables d'états du système;
- $t_a : S \rightarrow \mathbb{R}^+$  : la fonction d'avancement du temps, ou le temps de vie de l'état  $S$  ;
- $\delta_{ext} : Q \times X \rightarrow S$  : la fonction de transition externe, où:
- $Q = \{(S_i, e) | S_i \in S, 0 \leq e \leq t_a(S_i)\}$  : l'ensemble des états  $S_{\{1, 2, \dots, n\}}$  ;
- $e$  : est le temps écoulé depuis la dernière transition; La fonction de transition externe spécifie comment le modèle atomique change d'état (passage de l'état  $S_1$  à l'état  $S_2$  (figure I.8)) quand une entrée survient (évènement externe) avant que  $t_a(S_1)$  ne soit écoulé;
- $\delta_{int} : S \rightarrow S$  : la fonction de transition interne. Elle permet de passer d'un état  $S_2$  à l'instant  $t_1$ , à un état  $S_1$  à l'instant  $t_2$  lorsqu'aucun évènement externe n'arrive durant le temps de vie de l'état  $t_a(S_2)$  (figure I.8);
- $\lambda : S \rightarrow Y$  : la fonction de sortie.

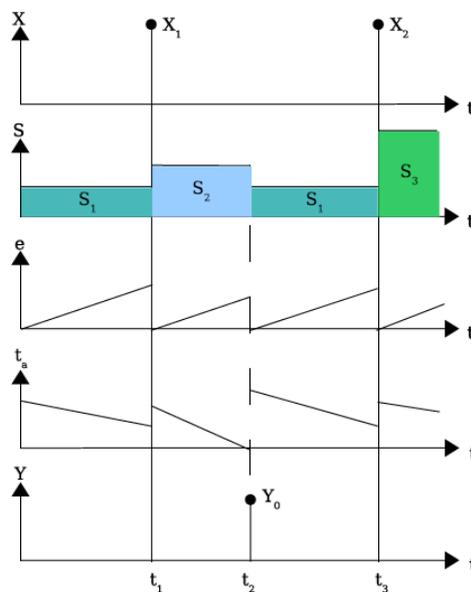


Figure I.8: Description de l'évolution des éléments d'un modèle atomique

Les modèles atomiques réagissent à deux types d'évènements (stimuli) externes ou internes. Un évènement externe provient d'un autre modèle, il déclenche la fonction

de transition externe ( $\delta_{\text{ext}}$ ) et met à jour le temps de vie de l'état ( $t_a(S_i)$ ). Un évènement interne entraîne un changement d'état du modèle. Il déclenche les fonctions de transition interne ( $\delta_{\text{int}}$ ) et de sortie (2). Le modèle calcule ensuite avec la fonction d'avancement du temps ( $t_a$ ) la date du prochain évènement interne. Ces enchaînements d'actions et la description du comportement du modèle sont présentés figure I.7.

La figure I.8 présente l'évolution des états d'un modèle.  $X_{i=\{1, 2\}}$  représente les entrées,  $S_{i=\{1, 2, 3\}}$  les états du modèle,  $e$  l'écoulement du temps, il est remis à zéro à chaque changement d'état.  $t_a$  représente la durée de vie d'un état, elle est mise à jour après chaque changement d'état, si elle est égale à zéro la fonction de transition interne est déclenchée.  $Y$  représente les sorties du modèle.

A chaque instant le modèle est dans un état ( $S_{i=\{1, 2, 3\}}$ ). Si un évènement externe  $X_{i=\{1, 2\}} \in X$  est détecté avant que  $e = t_a(S_i)$ , le système change d'état grâce à la fonction de transition externe ( $\delta_{\text{ext}}(S_i, e, X_i)$ ).

Dans la figure I.8, nous passons de l'état  $S_1$  à l'état  $S_2$  lorsque l'entrée  $X_1$  est détectée, puis de l'état  $S_1$  à l'état  $S_3$  lorsque  $X_2$  est détectée à son tour.

Si aucun évènement externe ( $X_{i=\{1, 2\}}$ ) n'est détecté, le modèle reste dans le même état pendant un temps donné par la fonction  $t_a(S_i)$ . Lorsque le temps de vie de l'état est écoulé, c'est-à-dire lorsque  $e = t_a(S_i)$  le système active sa fonction de sortie ( $\lambda(S_i)$ ) (envoi de  $Y_0$  sur la figure I.8). De plus, l'état du système est aussi mis à jour grâce à l'exécution de la fonction de transition interne ( $\delta_{\text{int}}(S_i)$ ). Dans les deux cas, le système est dans un nouvel état (figure I.8 :  $S_1$  avec  $\delta_{\text{int}}$  et  $S_2$  et  $S_3$  avec  $\delta_{\text{ext}}$ ), avec un nouveau temps de vie et ainsi de suite.

En fonction de son temps de vie, l'état d'un modèle peut être défini comme transitoire ou passif.

Si  $t_a(S) = \infty$  alors la durée de vie de l'état est tellement courte qu'aucun évènement externe ne peut intervenir avant l'arrivée du prochain changement d'état, le système est dans un état transitoire.

$S_i t_a(S) = \infty$  le système restera dans le même état tant qu'aucun évènement externe n'est détecté, il est dans un état passif.

A partir de modèles atomiques nous pouvons représenter un grand nombre de systèmes en les interconnectant au sein d'un modèle couplé de plus haut niveau.

### I.2.3.1.2 Modèle Couplé

Le formalisme DEVS utilise la notion de hiérarchie de description qui permet la construction de modèles dits "couplés" à partir d'un ensemble de modèles atomiques et ou couplés, et de trois relations de couplage:

- une relation de couplage interne (IC) pour le couplage des ports des sous-modèles qui composent le modèle couplé (en bleu sur la figure I.9);
- une relation de couplage des entrées externes (EIC) pour le couplage des ports d'entrée du modèle couplé avec les ports d'entrées de ses sous-modèles (en noir sur la figure I.9);
- une relation de couplage des sorties externes (EOC) pour le couplage des ports de sortie du modèle couplé avec les ports de sortie de ses sous-modèles (en rouge sur la figure I.9).

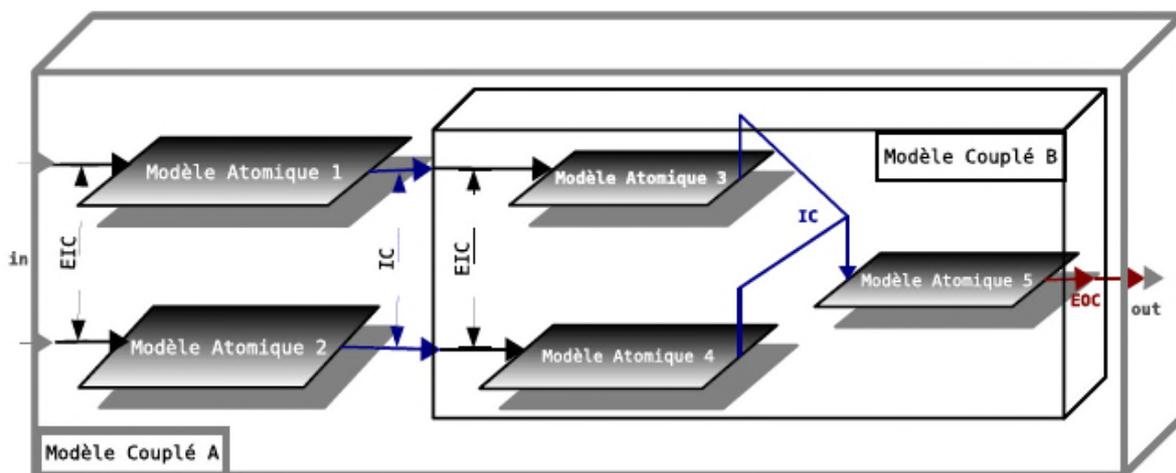


Figure I.9: Description d'un modèle couplé DEVS

Le modèle couplé (équation I.3 et figure I.9) est une composition de modèles atomiques et / ou de modèles couplés. Il présente un exemple de hiérarchie entre

modèles, il est composé de deux modèles couplés (A et B) et cinq modèles atomiques (1, 2, 3, 4 et 5) sur la figure I.9.

Le modèle de plus haut niveau, qui contient tous les autres modèles est le modèle couplé A. Le second modèle couplé B est composé des modèles atomiques (3, 4, 5). La figure I.9 présente un modèle couplé A avec 2 entrées "IN" et une sortie "OUT". Il contient 2 modèles atomiques (1) et (2) et un modèle couplé B.

Un modèle couplé DEVS est modulaire et présente une structure hiérarchique, ce qui permet la création de modèles complexes à partir de modèles atomiques et / ou couplés. Il est décrit par la formule :

$$MC = \langle X, Y, D, \{M_i\}, \{I_i\}, \{Z_{i,j}\}, L \rangle \quad (I.3)$$

Avec :

- $X = \{(PIN, v) | PIN \in \text{Ports d'entrée}, v \in X_{PIN}\}$  la liste des entrées du modèle, chaque entrée étant caractérisée par un couple (numéro du port / valeur) ;
- $Y = \{(POUT, v) | POUT \in \text{Ports de sortie}, v \in Y_{POUT}\}$ : la liste des sorties du modèle, chaque sortie étant caractérisée par un couple (numéro du port / valeur);
- $D$  : la liste des modèles composant le modèle couplé MC ;
- $M_i = \langle X_i, Y_i, S_i, \delta_{exti}, \delta_{inti}, \lambda_i, t_{ai} \rangle$  : un modèle atomique ;
- Pour chaque modèle  $i \in DU\{MC\}$ ,  $I_i$  est l'ensemble des modèles qui influence  $i$  ;
- $Z_{i,j}$  est la fonction de transition des sorties du modèle  $i$  vers le modèle  $j$ , telle que:
  - $Z_{MC,j} : X_{MC} \rightarrow X_j$  est la fonction de couplage des entrées externes (EIC) ;
  - $Z_{i,MC} : Y_i \rightarrow X_{MC}$  est la fonction de couplage des sorties externes (EOC);
  - $Z_{i,j} : Y_i \rightarrow X_j$  est la fonction de couplage interne (IC);
  - $L$  : la liste des priorités entre modèles.

La structure d'un modèle couplé doit répondre à des contraintes telles que,  $\forall i \in D$  :

1.  $M_i$  doit être un modèle atomique ;
2. Une seule fonction  $Z_{i,j}$  peut contenir l'ensemble des informations sur le couplage du modèle couplé ;
3.  $I_i$  est un sous ensemble de DUMC et  $i \notin I_i$ .

La cohérence et la conservation des propriétés du système entre ces niveaux de hiérarchie est résumée par la propriété de "fermeture sous composition. En effet dans le formalisme DEVS, chaque modèle est indépendant et peut être considéré comme une entité à part entière ou comme le modèle d'un système plus grand. Il a été montré dans [15] que le formalisme DEVS est fermé sous composition, c'est à dire que pour chaque modèle couplé DEVS, représenté par le couplage d'un ensemble de sous modèles, il est possible de construire un modèle atomique DEVS équivalent.

### I.2.3.2 Simulation DEVS

Nous définissons la simulation comme un procédé informatique visant à faire évoluer un système afin de prédire son comportement. Etablir une simulation exige donc la définition précise du comportement ainsi que la description des interactions qui existent entre les modèles.

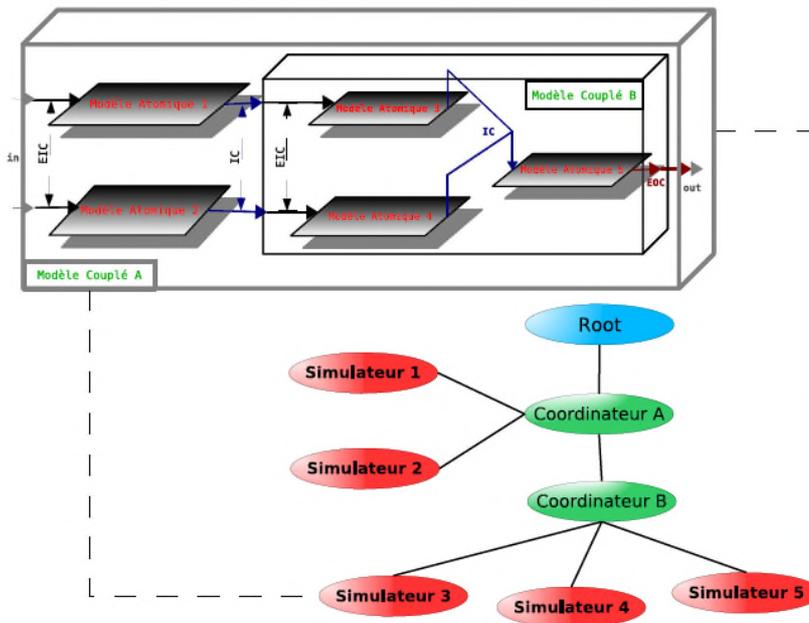


Figure I.10: Arbre de Classe du simulateur DEVS.

L'une des propriétés importantes du formalisme DEVS est qu'il fournit automatiquement un processeur pour chacun des modèles. Le formalisme DEVS établit une distinction entre la modélisation et la simulation (figure I.10) d'un système telle que n'importe quel modèle DEVS puisse être simulé sans qu'il soit nécessaire d'implémenter un processeur spécifique.

La figure I.10 montre comment sont organisés les processeurs (figure I.11, root, coordinateur, simulateur) dans le cas du modèle couplé présenté dans la partie modélisation (figure I.9).

Chaque modèle atomique est associé à un Simulateur (figures I.10 et figures I.11) chargé de gérer le comportement du modèle, et chaque modèle couplé est associé à un Coordinateur chargé de la synchronisation temporelle des modèles sous-jacents. L'ensemble de ces modèles est géré par un processeur spécifique appelé Root [15, 16].

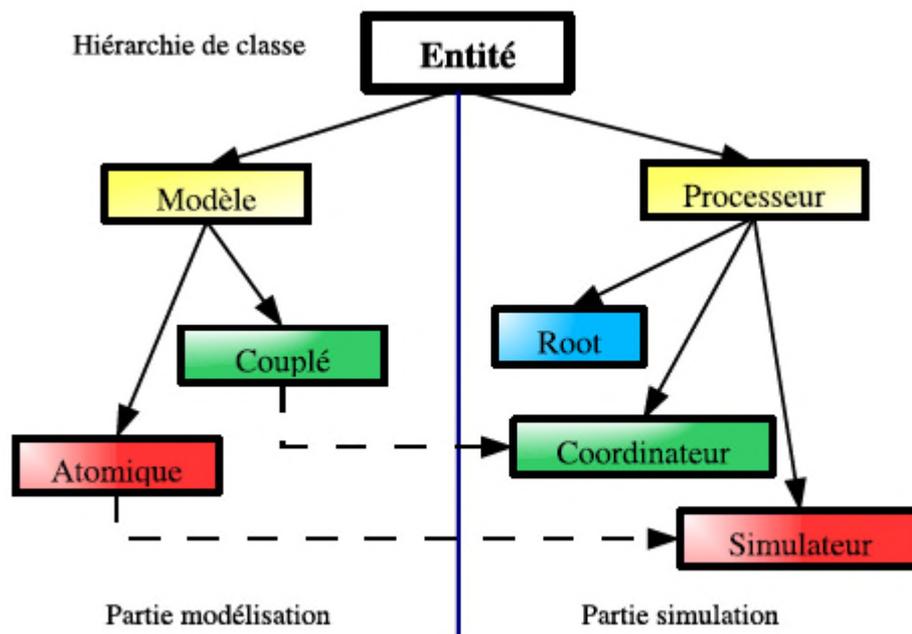


Figure I.11: Hiérarchie de Classe d'un environnement DEVS

Comme nous l'avons vu, le formalisme DEVS est basé, pour la modélisation, sur deux types de modèles : les modèles couplés et atomiques. Ces modèles possèdent des ports d'entrée, des ports de sortie et des variables d'état. Chaque modèle

communique grâce à l'envoi et à la réception de plusieurs types de messages. Le principe est décrit dans [15][16]. Chaque message génère des événements qui sont stockés dans un échéancier, qui est une structure de données composée d'événements classés suivant un ordre chronologique, la tête de l'échéancier représentant le futur immédiat, et la queue le futur plus lointain. La simulation consiste à faire évoluer les états des modèles dans le temps en fonction d'événements. Nous distinguons deux types d'événements : les événements externes et les événements internes:

- Un événement externe, prévu à l'instant  $t$  sur un port d'entrée donné du modèle représente une modification d'un des états du modèle;
- Un événement interne, prévu à l'instant  $t$ , correspond à une modification d'un des états du modèle et provoque l'émission d'une valeur de sortie via la fonction ( $\lambda$ ) sur un des ports de sortie du modèle.

Un événement interne ou externe DEVS peut être caractérisé de la façon suivante (équation I.4) :

$$E = (\text{temps}, \text{port}, \text{valeur}) \quad (\text{I.4})$$

Le premier champ représente la date d'occurrence de l'événement, le second désigne le port sur lequel l'événement intervient, il n'est pas renseigné pour les événements internes, et le troisième symbolise la valeur de l'événement.

Il a été défini dans le formalisme DEVS [17], dans le cas où plusieurs événements sont programmés au même instant  $t$ , que le choix de l'événement à exécuter en premier se fait en fonction de la liste de priorité.

Après avoir détaillé les mécanismes de fonctionnement du formalisme DEVS, dans la partie suivante, nous nous intéressons à deux extensions du formalisme DEVS qui permettent de faire de la modélisation approximative.

### **I.2.4 Modélisation approximative**

On peut intégrer dans le multi-formalisme DEVS de nombreux autres formalismes ou méthodes de modélisation. Dans cette partie nous nous intéressons aux

extensions de DEVS qui permettent de prendre en compte imprécision et incertitude sur les événements ou sur les états. L'incertitude intervient au niveau des changements d'états, alors que l'imprécision intervient sur le temps ou les variables des événements. Dans les deux cas, ces changements modifient la structure des modèles et les algorithmes de simulation.

Le formalisme Fuzzy-DEVS [17] permet de traiter des données incertaines, cette incertitude intervient uniquement au niveau des changements d'états du système. Une méthode de défuzzification permet de transformer les incertitudes sur le temps des événements en valeurs réelles, et effectue l'opération inverse pour fournir un temps de sortie flou. Le formalisme Min-Max-DEVS [19][20] permet de prendre en compte uniquement une imprécision sur le temps d'un événement pour des systèmes électroniques. Ces deux formalismes sont détaillés dans cette partie.

#### 1.2.4.1 Fuzzy-DEVS

Le formalisme Fuzzy-DEVS introduit par Y. Kwon dans [17], dérive du formalisme DEVS tout en conservant sa sémantique, une partie de ses concepts et sa modularité. Il est basé sur la logique floue, une règle "max-min" définie dans [17] et les méthodes de fuzzification et de défuzzification pour prendre en compte les incertitudes sur le temps des événements. Pour permettre la simulation, les incertitudes sur le temps doivent être transformées en valeurs réelles (défuzzification); pour pouvoir être exploités, les temps de sortie sont de nouveau transformés en données incertaines (fuzzification).

La structure du modèle atomique flou décrite dans [17] est la suivante:

$$A\tilde{M}_F = \langle X, Y, S, \tilde{\delta}_{int}, \tilde{\delta}_{ext}, \tilde{\lambda}, \tilde{t}_a \rangle \quad (I.5)$$

avec:

- $X, Y$ , l'ensemble des ports d'entrée et de sortie non flous;
- $S$ , l'ensemble des états séquentiels non flous;
- $\tilde{\delta}_{int} : S \times S \rightarrow [0, 1]$ , fonction floue de transition interne;

- $\delta_{\text{ext}} : Q \times X \times S \rightarrow [0, 1]$ , fonction floue de transition externe, avec:
- $Q = \{(s, e) \mid s \in S, 0 \leq e \leq t_a(s)\}$ , ou
- $t_a(s)$  est la valeur de défuzzification de  $\tilde{t}_a(s)$ ;
- $\tilde{\lambda} : S \times Y \rightarrow [0, 1]$ , fonction floue de sortie;
- $\tilde{t}_a : S \times \tilde{N} \rightarrow [0, 1]$ , fonction floue d'avancement du temps, où  $\tilde{N}$  est l'ensemble des nombres

flous appartenant à  $R_{[0, \infty[}$ .

Tel qu'il est décrit, le modèle atomique Fuzzy-DEVS ne permet de prendre en compte que les différentes possibilités de transition ( $\tilde{\delta}_{\text{int}}, \tilde{\delta}_{\text{ext}}$ ) entre état. Les entrées et les sorties du modèle ne sont d'ailleurs pas représentées comme imprécises. De plus, le modèle atomique flou de Fuzzy-DEVS, contrairement au modèle atomique DEVS, est non déterministe, c'est-à-dire qu'il ne répond pas aux deux conditions suivantes:

1. la fonction de transition interne est exécutée ( $\delta_{\text{int}}(s_i) = s_{i+1}$ ) quand la durée de vie de l'état est écoulee ( $t_a = 0$  ou  $t_a = e$ ) et la fonction de transition externe ( $\delta_{\text{ext}}(s_i, X_i) = s_{i+1}$ ) est exécutée lorsqu'un évènement externe arrive;
2. la fonction de sortie ( $\lambda(s_i) = Y_i$ ) est exécutée quand la durée de vie d'un état est finie ( $t_a = 0$ ).

Dans le formalisme Fuzzy-DEVS, l'état suivant du système  $s_{i+1}$  n'est pas déterminé avec  $\delta_{\text{int}}$  et  $\delta_{\text{ext}}$  mais avec la règle "max-min"; elle détermine, suivant un algorithme, l'état qui a le plus de chances d'être mis à jour. Les différentes possibilités de changement d'état sont représentées par des matrices, et l'évolution du modèle par des arbres de possibilités [17].

Fuzzy-DEVS ne traite pas les valeurs imprécises d'un modèle, mais propose une méthode qui fournit un arbre de possibilités représentant l'évolution des états du système, les feuilles sont les états et les branches la possibilité associée à un état.

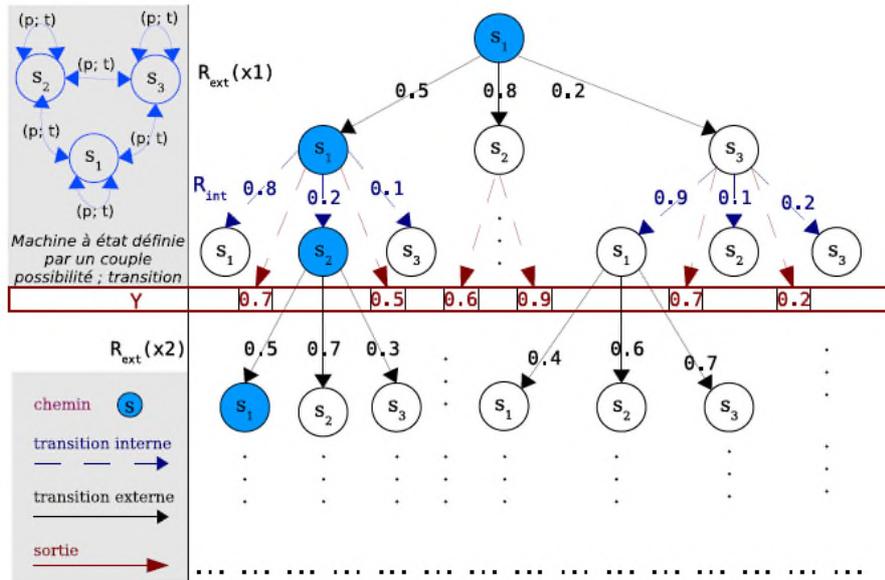


Figure I.12: Arbres de simulation Fuzzy-DEVS

La figure I.12 présente l'évolution d'un système en fonction des possibilités.

Après une transition interne  $\max(\min(0.8, 0.2), \min(0.8, 0.1)) = 0.2$ , nous passons dans l'état  $s_1 \rightarrow s_2$ .

Nous pouvons remarquer que comme dans le formalisme DEVS classique, avant une transition interne, la fonction de sortie est déclenchée.

Fuzzy-DEVS est un formalisme théorique toujours en phase de recherche [17][22]. L'idée de base est très intéressante, mais est limitée à l'étude de systèmes à états finis. De plus, ce formalisme ne nous paraît pas totalement cohérent avec le formalisme DEVS, mais il fournit de bonnes pistes de travail, comme la possibilité de définir le temps de vie d'un modèle  $t_a$  à l'aide d'un label linguistique [19]. Pour autant il ne permet pas de répondre à notre problématique, à savoir la définition d'une méthode de prise en compte d'imprécision au niveau de tous les paramètres du modèle  $(X, Y, S, \lambda, t_a, \delta_{ext}, \delta_{int})$  et pas seulement au niveau des transitions entre états.

### I.2.4.2 Min-Max-DEVS

Le formalisme Min-Max-DEVS [19][20] introduit par N. Giambiasi fait suite aux travaux de M. Smali [21] sur la modélisation et la simulation de circuits logiques à retard flou. Le but de Min-Max-DEVS est de permettre de modéliser et de simuler

des systèmes réels pour lesquels les valeurs des retards ne sont pas connues avec exactitude. Ce formalisme a été proposé pour modéliser les systèmes dans lesquels la durée de vie des états transitoires est représentée par des intervalles de temps et non par les valeurs moyennes comme dans le formalisme DEVS classique.

Les modèles atomiques Min-Max-DEVS et DEVS classique sont quasiment identiques, le seul changement est la représentation de la fonction d'avancement du temps  $ta$ . Dans Min-Max-DEVS elle est définie comme suit:

$$- ta(s_i): S \rightarrow \mathbb{R}^+ \times \mathbb{R}^+;$$

$$- ta(s_i) = (d_{\min}, d_{\max});$$

où

-  $d_{\min}$  est le temps minimum pendant lequel le modèle reste dans le même état  $s_i$ ,  $d_{\min}$  représente l'évolution la plus rapide du système;

-  $d_{\max}$  est le temps maximum pendant lequel le modèle reste dans le même état  $s_i$ ,  $d_{\max}$  représente l'évolution la plus lente du système.

Cette modification entraîne deux changements importants par rapport au formalisme DEVS classique. Le premier intervient au niveau de l'évolution du modèle; dans Min-Max-DEVS les événements externes sont choisis en fonction du temps minimum; s'il n'y a pas d'évènement externe détecté, un évènement interne est déclenché au temps maximum. Le second changement touche les algorithmes de simulation, la fonction  $ta$  ayant été modifiée, il faut en tenir compte de niveau de la simulation. Chaque évènement est déclenché en fonction du temps, et tous les temps des évènements internes sont fixés par la fonction  $ta$ . Pour cela deux nouvelles variables de temps ont été définies,  $t_s$  représentant le temps maximum avant le prochain évènement et  $t_f$  représentant le temps minimum avant le prochain évènement. Ces évolutions ont engendré une modification des algorithmes de simulation, ils sont présentés dans [19].

**I.3. Conclusion :**

Nous avons présenté dans ce chapitre les notions théoriques de la modélisation et de la simulation de système, et en particulier nous avons détaillé le formalisme développé par B.P Zeigler. Ce formalisme présente plusieurs avantages en ce qui concerne les objectifs que nous nous sommes fixés, à savoir la modélisation de systèmes naturels.

En effet, le formalisme DEVS peut être défini comme une méthodologie universelle et générale qui fournit des outils pour modéliser et simuler des systèmes dont le comportement repose sur la notion d'évènements. Ce formalisme est basé sur la théorie générale des systèmes, la notion de modèle, et permet la spécification de systèmes complexes à évènements discrets sous forme modulaire et hiérarchique. Nous pouvons aussi définir le formalisme DEVS comme un outil de multi-modélisation regroupant plusieurs formalismes de modélisation de manière cohérente, de fait, lorsqu'il est replacé dans le contexte spécifique d'un domaine d'application, si aucune approche de modélisation ne permet de traiter le domaine, il doit être adapté et étendu.

Les formalismes de modélisation sont des outils d'analyse et de prédiction indispensables pour nous renseigner sur les conséquences des actions humaines ou sur les changements naturels, mais il est important d'évaluer et de prendre en compte correctement le système étudié. Tout ce qui touche à l'homme ou à son environnement est difficile à décrire précisément, et pour cela, prendre en compte, dans des modèles. Le résultat est plus imprécis, certes, mais a de grandes chances d'être juste.

Deux approches basées sur le formalisme DEVS permettent de prendre en compte des imperfections sur les paramètres des modèles. Min-Max-DEVS est trop spécifique à un domaine d'application, et ne traite que les retards sur le temps de déclenchement des évènements, et Fuzzy-DEVS ne traite que les incertitudes au niveau des transitions entre états.

# **CHAPITRE II**

## **Présentation du logiciel JDEVS**

## II.1. Introduction :

JDEVS est une implémentation du cadriciel. Plusieurs raisons ont motivé le développement effectif de l'architecture générique ainsi que des techniques de modélisation. La première concerne la validation des choix d'architecture logiciel, certains problèmes ne devenant apparents que lors de l'implémentation de l'outil. Ainsi, l'expérience de ce développement nous a conduits d'abord à redéfinir l'architecture de classes du cadriciel afin qu'il puisse mieux correspondre aux attentes des utilisateurs. JDEVS est largement utilisé dans plusieurs projets de recherche scientifique.

Ce chapitre est décomposé en quatre sections, la première présente les différents modules de JDEVS. Les techniques de modélisation et de simulation intégrées dans le logiciel sont ensuite détaillées dans les trois dernières sections.

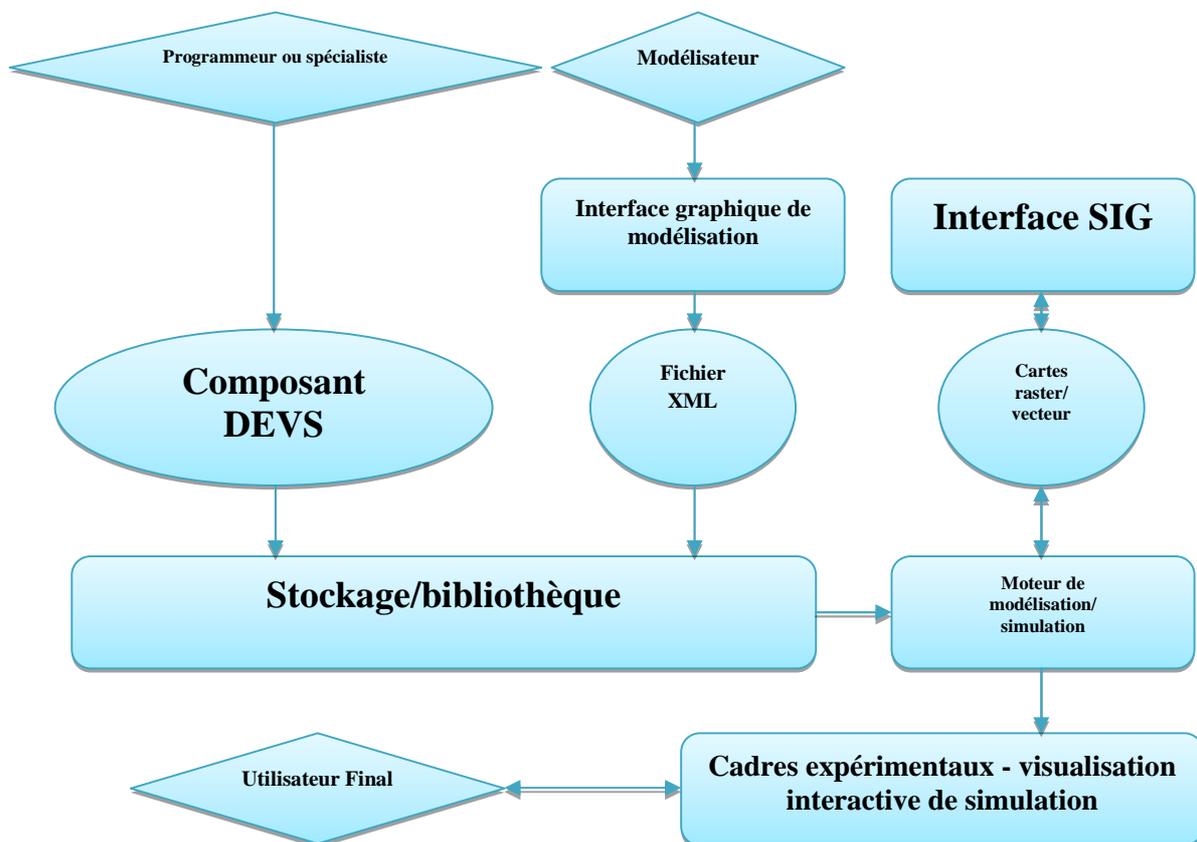


Figure II.1: Vue des modules du logiciel JDEVS, les carrés correspondent aux modules, les losanges correspondent aux acteurs et les cercles aux formats d'échange de données.

## II.2. Le logiciel JDEVS :

JDEVS est composé de cinq modules indépendants présentés en figure II.1 : un moteur de simulation, une interface graphique de modélisation, un module de stockage dans des bibliothèques, un module de connexions au SIG et les cadres expérimentaux de visualisation et de simulation. Chacun de ces modules reprend l'architecture de classe définie dans le cadriceil ce qui permet à ces modules de fonctionner ensemble et de pouvoir être éventuellement remis à jour indépendamment. Sans la prise en compte de techniques de modélisation spécifique JDEVS prend pour base la technique de modélisation classic-DEVS [2]. La première section est consacrée au moteur de modélisation et de simulation implémentant cette technique.

### II.2.1 Moteur de modélisation et de simulation :

Le moteur de modélisation et de simulation est une implémentation de la méthodologie classic-DEVS avec ports. Dans l'attente d'une standardisation par le DEVS standardisation group [23], les modèles DEVS atomiques doivent pour l'instant être transformé en instructions JAVA.

```
public class DevsFAtom extends FeedbackModel{
Port i1 = new Port(this,"i1","IN") ;
Port f1 = new Port(this,"f1","FEEDBACK") ;
Port o1 = new Port(this,"o1","OUT") ;
public DevsFAtom () { }
super("DevsFAtom") ;
states.setProperty("A","") ; }
EventVector outFunction(Message m) {
return new EventVector() ;}
void intTransition() {}
EventVector extTransition(Message m) {
return new EventVector() ;}
EventVector react(Message m) {
return new EventVector() ;}
int advanceTime(){return A ;}
}
```

Figure II.2:Code source JAVA pour un composant atomique DEVS standard

Le formalisme DEVS propose des interfaces bien définies pour la description de systèmes. Ces interfaces nous permettent de pouvoir utiliser des modèles

programmés dans de nombreux langages orientés objets et d'y accéder ensuite grâce à des appels de méthodes à distance (comme Java RMI). La modélisation de modèles atomiques peut toutefois se faire directement dans l'interface et en utilisant Java. Aussi, il est possible d'ajouter un composant atomique vide, de définir ses interfaces d'entrée/sortie et de générer le squelette du code du modèle. Ce modèle vide est ensuite enregistré dans la bibliothèque et compilé. La figure II.2 présente le code généré automatiquement pour :

$$\text{DevsAtom} = \langle X(\text{il}), S(A), Y(\text{ol}), \delta_{\text{int}}, \delta_{\text{ext}}, X, t_a \rangle$$

Les fonctions de sortie et de transition externe renvoient des vecteurs d'événements qui sont ajoutés à la liste générale des événements. La seule tâche de programmation qui incombe au spécialiste du domaine, est de spécifier la dynamique des modèles atomiques à travers ses quatre méthodes. Une fois le modèle atomique créé, il est stocké dans la bibliothèque pour être utilisé plus tard dans une composition de modèle à l'intérieur d'un modèle couplé. Les compositions de modèles sont réalisées à travers l'interface graphique de modélisation présentée dans la section suivante.[3]

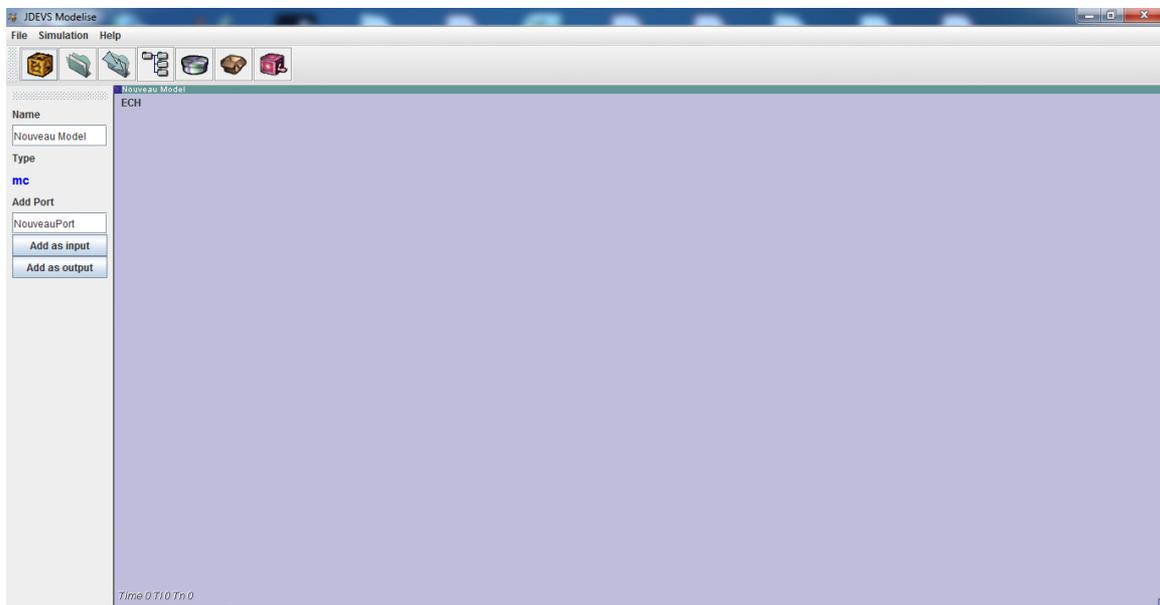


Figure II.3: Interface de modélisation en diagramme contenant un modèle couplé et son panneau propriétés

## II.2.2 Interface graphique de modélisation :

L'interface de modélisation en diagrammes permet aux utilisateurs de construire graphiquement leurs modèles. La figure II.3 représente une vue de l'outil constitué d'un modèle couplé avec deux ports d'entrée et un port de sortie. L'implémentation de cette interface est conforme au cadriceil, ainsi chaque modèle est présenté dans un espace de travail et est associé à un panneau de propriétés. De plus, l'interface dispose d'une barre de menu simple permettant d'ajouter des modèles vides (atomique, couplés ou d'autres techniques de modélisation), d'ouvrir une bibliothèque et de supprimer des modèles. Modèles atomiques et couplés ont des panneaux de propriétés différents, la figure II.3 présente celui d'un modèle couplé permettant d'ajouter et de supprimer des ports et de changer son nom.

Le panneau de modèles atomiques figure II.4 permet d'inspecter et de modifier la valeur des paramètres du modèle, de lancer l'éditeur correspondant (ici éditeur de code Java) et de compiler le modèle afin de le recharger dans l'interface graphique.

Les composants peuvent être déplacés et redimensionnés à l'aide de la souris dans ce canevas. Un port est représenté par une poignée noire dans un composant : les couplages s'effectuent en cliquant dans les ports source puis destination.

Pour ajouter des modèles existant il suffit de les glisser depuis le composant bibliothèque vers l'espace de travail. La bibliothèque est l'élément essentiel permettant le stockage de modèles ; il est brièvement présenté dans la section suivante.

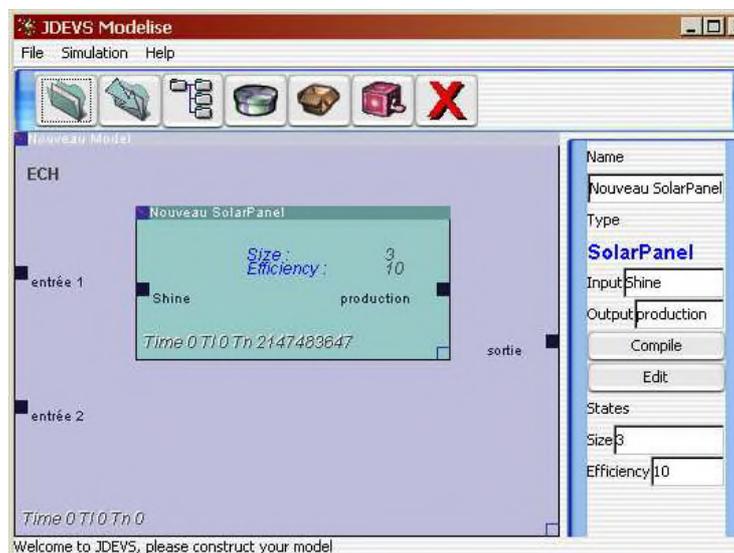


Figure II.4:Interface de modélisation en diagramme contenant un modèle atomique et son panneau de propriétés

### II.2.3 Stockage

La partie visible du module de stockage de JDEVS est un composant graphique présenté en figure II.5;ce composant présente les modèles par domaine et sous-domaines sous la forme d'un arbre.

Le module de stockage permet de formater la structure des modèles pour pouvoir l'enregistrer au format XML et la stocker dans une bibliothèque du type HmLib. Une description détaillée de l'architecture de bibliothèque HmLib est disponible dans [12]. Le but d'une telle bibliothèque est d'offrir un moyen facile et performant de stocker et de récupérer les modèles. La bibliothèque HmLib peut aussi être considérée comme une base de données orientée objet, ce qui facilite aussi le stockage des modèles en XML. En plus de la structure, il est aussi possible de stocker les liens d'héritage et d'abstraction entre modèles. Les modèles stockés dans la bibliothèque (habituellement sous la forme de code source) sont appelés "hors-contexte". Pour récupérer un modèle, il faut l'instancier puis le mettre "en-contexte" en le replaçant dans l'état où avait été stocké l'objet. Plusieurs scénarii de simulation peuvent ainsi créer plusieurs modèles "en-contexte" à partir d'un modèle "hors-contexte". C'est à partir de modules "en contexte" qu'est lancée la simulation dans les cadres expérimentaux présentés dans la section suivante.

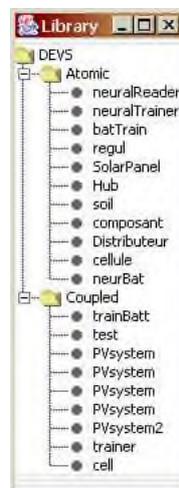


Figure II.5: Composant de l'interface graphique présentant les modèles disponibles dans la bibliothèque

#### II.2.4 Cadres expérimentaux :

Les cadres expérimentaux sont les interfaces utilisateur de simulation des modèles stockés dans la bibliothèque. Les expérimentations sur des modèles en diagramme peuvent être effectuées directement depuis l'interface graphique de modélisation. Il est ainsi possible de vérifier le comportement d'un modèle en cours de création et donc d'ajuster ses paramètres ou corriger les erreurs de conception sans explicitement utiliser le module cadre expérimental. L'application permettant d'exécuter les expérimentations se présente avec la même interface que l'interface de modélisation, chaque modèle possède un panneau de propriétés. Le panneau de propriété affiché est le panneau du modèle actif (i.e. le composant sélectionné).

La figure II.6 présente un modèle en cours de simulation dans l'interface. Le lancement de la simulation depuis l'interface graphique permet de charger une liste d'événements d'entrée et de les paramètres de l'expérimentation; ces actions sont effectuées depuis le panneau de simulation (figure II.6, en haut à gauche). L'option "track simulation" permet de réaliser la simulation en insérant un temps d'attente entre l'envoi de deux événements d'entrée pour le comportement du modèle. La liste des événements à traiter est affichée à l'intérieur de chaque modèle couplé et évolue au cours de la simulation. Il est possible de changer les paramètres de chaque modèle atomique durant la simulation en l'activant puis en les valeurs à l'intérieur de son panneau de propriétés (figure II.6, à droite). Le résultat de simulation est une liste d'événements de sortie qui peut être soit affichée (figure II.6, en bas à gauche), soit sauvegardé dans un fichée.

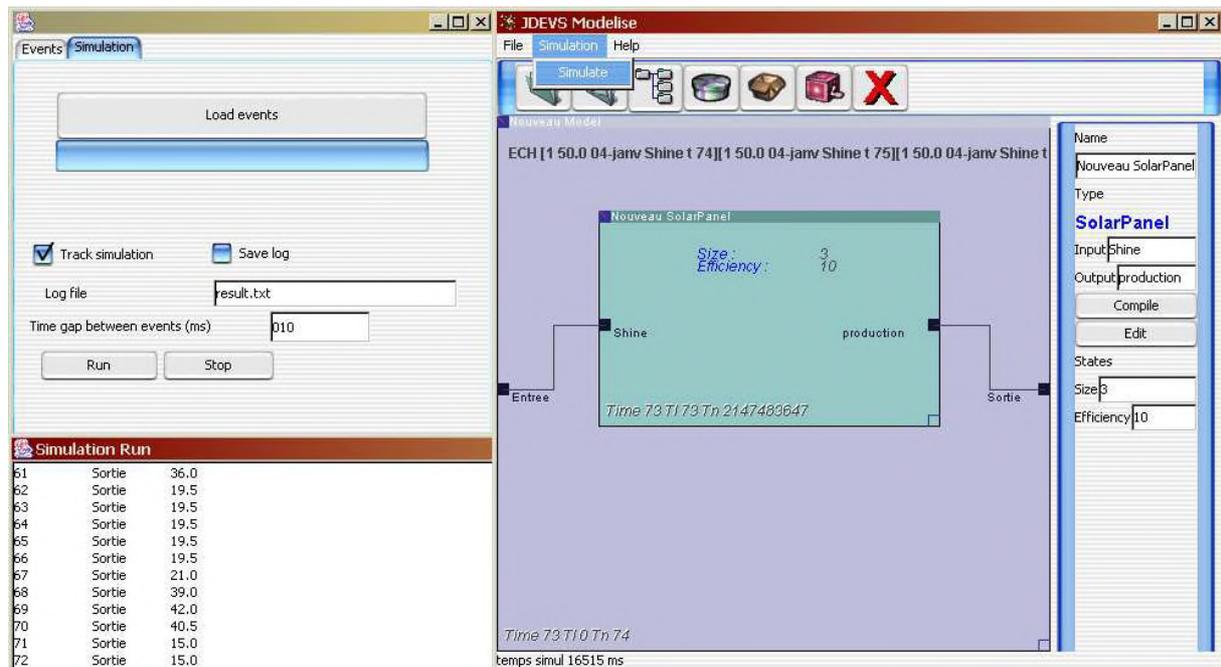


Figure II.6: Interface de modélisation en diagramme de l'environnement JDEVS

### II.3. Modélisation par automates cellulaires

La modélisation par automates cellulaires permet de modéliser le comportement d'un domaine en le morcelant en zones de comportements identiques, les cellules. Pour permettre l'intégration de cette technique à JDEVS, nous avons une architecture standard de ce type de modèles présentée en figure II.7.

Dans la plupart des modèles que nous avons eu à simuler, les données d'entrée devaient être identiques pour toutes les cellules, c'est pour ce laque chaque cellule est connectée en entrée à un modèle distributeur chargé d'envoyer les messages d'entrée à toutes les cellules. Tous les ports de sortie des cellules sont connectés à un modèle concentrateur, chargé d'acheminer tous les événements reçus depuis les cellules vers un unique port de sortie. L'utilisation des modèles distributeur et concentrateur n'est toutefois pas obligatoire; il suffit alors de connecter directement les ports d'entrée ou de sortie d'une cellule à un port externe du modèle. Cette section présente l'extension de JDEVS, composée des modules à l'interface graphique, au stockage et aux cadres expérimentaux.

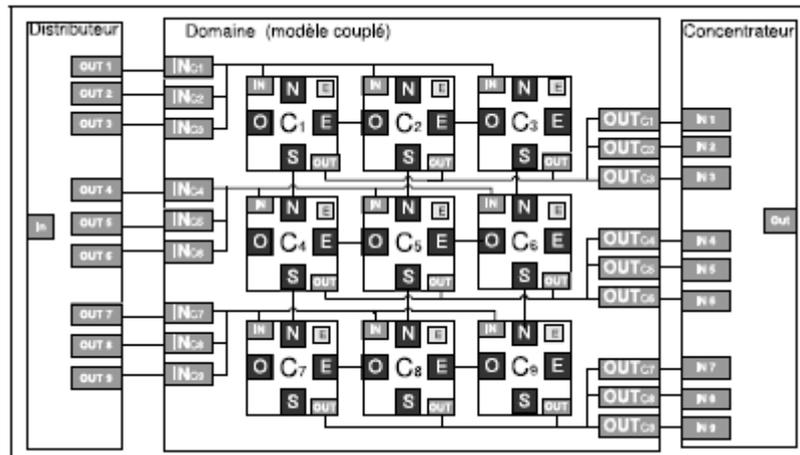


Figure II.7: Architecture standard des modèles cellulaires dans JDEVS [22]

### II.3.1 Interface graphique de modélisation par automates cellulaires

La création d'un modèle cellulaire implique la création d'une cellule comme composante du domaine. Un modèle de cellule est un modèle atomique standard composé de ports de connexion aux cellules voisines. Pour créer un modèle cellulaire dans JDEVS il faut ajouter un modèle cellulaire vide, cette action génère un squelette de code java pour la cellule générique du domaine. Ce squelette contient au minimum cinq ports d'entrée et autant de sortie :

$$\langle XN,S,E,O_{in},YN,S,E,O_{out} \rangle$$

Ces ports correspondent aux ports de connexion au voisinage et aux ports d'entrée et de sortie généraux. Le squelette de code aussi les fonctions vides correspondant aux méthodes DEVS standard permettant de le comportement général. Une fois le comportement de la cellule décrit en code Java, le modèle doit être mis en contexte pour permettre le couplage avec une cellule en particulier. Pour mettre en contexte un modèle cellulaire il faut charger les cartes nécessaires exportées d'un SIG au moment de son initialisation. Chaque instance de cellule créée prend alors le sufe [numéro ligne-numéro colonne] comme nom d'indentification. Par exemple, une instance d'un modèle atomique cellule nommé "cell" situé à la ligne 12 et à la colonne 8 prendra le nom "celle[12-8]".

Le modèle mis en contexte se représente sous la forme d'un modèle avec les ports d'entrée et de sortie généraux des distributeurs et concentrateur comme nous

l'illustrons dans la figure II.8. Le panneau de contrôle des modèles cellulaires permet de charger les cartes d'initialisation des paramètres du modèle, chaque carte correspond à un attribut des modèles atomiques cellules. Une carte est un lien URI vers un fichier raster ASCII, ce qui permet d'accéder à des ressources partagées sur un serveur d'informations géographiques.

La visualisation de l'état d'un modèle en cours de simulation est importante pour vérifier son comportement. Pour cela, il est possible de spécifier les attributs du modèle devant être affichés ainsi que la palette de couleurs associée à ces attributs. Une palette est composée en associant une couleur à un état dans lequel peut se trouver le modèle.

Le couplage entre différents modèles se fait à l'intérieur de l'interface de modélisation. Il est possible de lier un port externe à une cellule directement en la sélectionnant et en choisissant le port approprié. Les structures ainsi créées sont enregistrées dans un fichier XML par le moteur de stockage décrit dans la section suivante.

### **II.3.2 Stockage de modèles cellulaires**

Le stockage de la structure des modèles cellulaires s'effectue dans un XML pouvant être stocké dans une bibliothèque. Le format du fichier XML résultant, est présenté en figure II.9; il est compatible avec le format standard de stockage de modèles couplés et ajoute la balise TERRAINDATA contenant un lien URI vers les cartes destinées à la mise en contexte du modèle. La balise CLASS représente ici le lien URI vers la classe du modèle atomique de la cellule composant le domaine.

```

< ?xml version="1.0" encoding="UTF-8" ?>

< !DOCTYPE MODEL [
< !ELEMENT MODEL (TYPE, NAME, CLASS ?, BOUNDS ?, TERRAINDATA*, INPUT*,
OUTPUT*, CHILD*, EIC ?, EOC ?, IC ?, EXECUTIVE ?)>
< !ELEMENT NAME (#PCDATA)>
< !ELEMENT TYPE (#PCDATA)>
< !ELEMENT CLASS (URI)>
< !ELEMENT BOUNDS (LOCX, LOCY, WIDTH, HEIGHT)>
< !ELEMENT LOCX(#PCDATA)>
< !ELEMENT LOCY (#PCDATA)>
< !ELEMENT TERRAINDATA (URI)>
< !ELEMENT WIDTH (#PCDATA)>
< !ELEMENT HEIGHT (#PCDATA)>
< !ELEMENT PORT (URI ?, #PCDATA)>
< !ELEMENT URI (#PCDATA)>
< !ELEMENT CHILD (MODEL* | URI*)>
< !ELEMENT INPUT (PORT*)>
< !ELEMENT OUTPUT (PORT*)>
< !ELEMENT LINK (PORT, PORT)>
< !ELEMENT EIC (LINK*)
< !ELEMENT EOC (LINK*)>
< !ELEMENT IC (LINK*)>
< !ELEMENT EXECUTIVE (MODEL* | URI*)> ]

```

Figure II.8: Document de format XML des modèles cellulaires

En somme, les domaines créés et stockés dans la bibliothèque au format XML peuvent être directement simulés dans le module de simulation. Cependant cette interface n'est pas destinée à un utilisateur qui désire effectuer des expérimentations plus simples et sans contrôle sur un modèle. Pour cela, plusieurs cadres expérimentaux ont été développés pour les modèles cellulaires, ils sont présentés dans la section suivante.

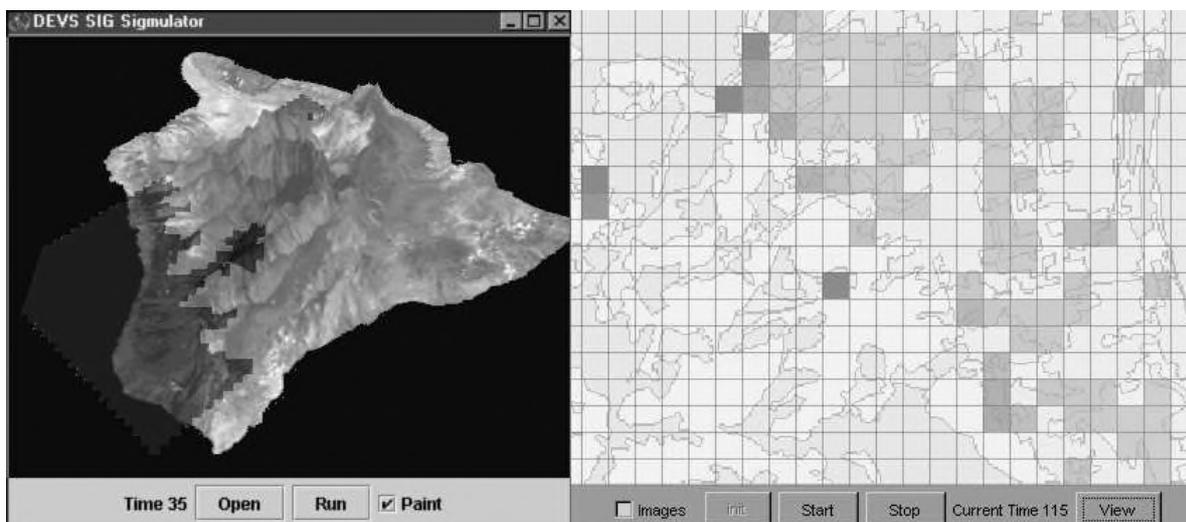


Figure II.9: Cadres expérimentaux 3d et 2d de simulation de modèles cellulaires

**II.4. Conclusion**

Cette section après enté JDEVS, implémentation logiciel du cadriciel générique de modélisation et de simulation. A travers ce développement nous avons pu démontrer la validité de notre cadriciel et l'intérêt de son utilisation comme base de construction, d'environnements de modélisation. Plusieurs techniques ayant été ajoutées au logiciel, ceci nous autorise à l'exploiter comme plate-forme de développement de modèles, dans le domaine de la modélisation et de la simulation de systèmes naturels complexes.

Des expérimentations diverses furent réalisés avec JDEVS tout au long de l'étude à l'aide de JDEVS; elles sont présentées dans le chapitre suivant.

# **CHAPITRE III**

## **Systeme photovoltaïque**

### III.1 Introduction :

Un système photovoltaïque se compose de plusieurs outils nécessaires pour assurer une production d'électricité optimale. Ce chapitre donne un aperçu général sur les différents composants et types d'installations d'un système photovoltaïque.

### III.2 Centrale solaire photovoltaïque

Une centrale solaire photovoltaïque est formée par un ensemble de panneaux solaires photovoltaïques, à base de silicium, reliés entre eux en série ou en parallèle, et branchés sur un ou plusieurs onduleurs. Ces derniers sont utilisés pour transformer le courant continu basse tension en courant alternatif haute tension, utilisable directement par les appareils classiques. La quantité d'énergie obtenue dépend toutefois de plusieurs facteurs, à savoir, la surface des modules utilisées ainsi que leur rendement et de l'ensoleillement qui varie selon la latitude, la saison et la météo par exemple [24].

### III.3 Eléments de l'installation photovoltaïque

Tout système photovoltaïque peut se composer, comme il est montré sur la figure (III.1), en trois parties :

- Une partie de production d'énergie.
- Une partie de conversion de cette énergie.
- Une partie de stockage de l'énergie.

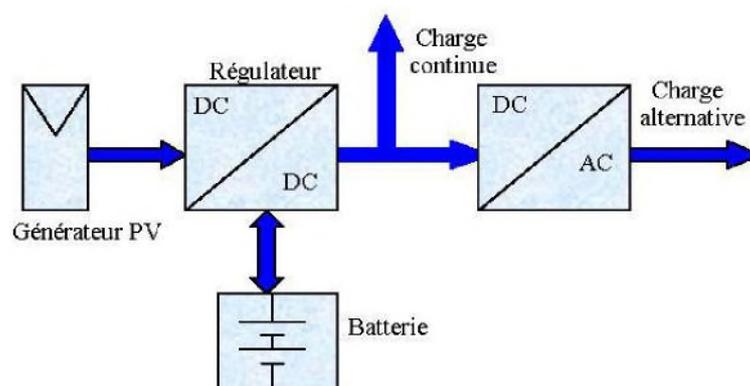


Figure III.1 Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec batterie de stockage[25]

### III.3.1 Production d'énergie (Panneaux photovoltaïques)

La production d'énergie se réalise par la conversion d'énergie solaire en électricité, cette partie est composée essentiellement d'un ou plusieurs modules, Le panneau photovoltaïque se compose de petites cellules qui produisent une très faible puissance électrique (1 à 3 W). Ces cellules sont disposées en série pour former un module ou panneau permettant de produire une puissance plus élevée. Les panneaux sont finalement interconnectés entre eux (en série et/ou en parallèle) pour obtenir un champ photovoltaïque [26].

### III.3.2 Stockage de l'énergie

Dans les systèmes de production d'électricité à partir d'énergies intermittentes, en particulier les systèmes photovoltaïques, il est indispensable de pouvoir stocker l'énergie pour ajuster la production à la consommation.

Ceci est particulièrement vrai pour les systèmes autonomes (non connectés à un réseau électrique). Même dans le cas où le réseau électrique est présent, l'utilisation d'un moyen de stockage permet de lisser les productions intermittentes et d'injecter l'énergie pendant les périodes les plus pertinentes (la nuit et les jours "sans soleil").

Le système de stockage est un élément crucial de l'installation photovoltaïque du point de vue technique, mais aussi du point de vue économique ; car il représente 40 à 50 % du coût de l'installation. Vue l'importance du stockage électrochimique de l'énergie solaire [27], une étude théorique des différents types de batteries est menée, en particulier la batterie au plomb qui est la moins coûteuse comparativement aux autres batteries.

#### a) Principe général de fonctionnement d'une batterie [28] :

Deux électrodes, l'une positive et l'autre négative, sont séparées par un électrolyte. Aux deux interfaces électrode-électrolyte interviennent des réactions électrochimiques.

A l'anode (électrode négative en décharge) s'opère une réaction d'oxydation selon la formule suivante :

$M1 \rightarrow M1^{n+} + n e^-$ , de potentiel redox  $E1$  ;  $M1$  étant l'espèce active de l'anode.

Les électrons libérés transitent dans le circuit extérieur pour atteindre finalement la cathode (électrode positive en décharge) où s'opère une réaction de *réduction* selon :

$M2^{n+} + n e^- \rightarrow M2$ , de potentiel redox  $E2$  ;  $M2$  étant l'espèce active de la cathode.

L'électrolyte assure le transport des espèces ioniques mises en jeu dans la réaction globale d'oxydoréduction, qui s'écrit :

$M1 + M2^{n+} \rightarrow M1^{n+} + M2$ .

La force électromotrice  $E$  de ce convertisseur se calcule selon :  $E = E2 - E1$ .

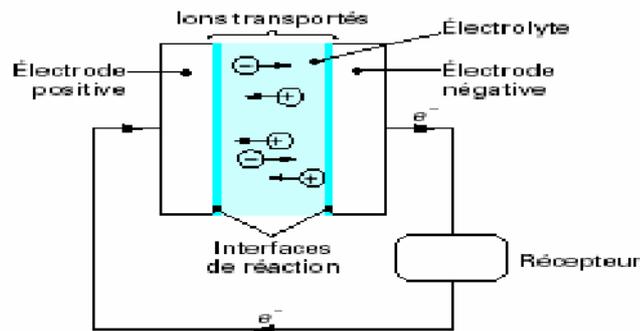


Figure III.2 Principe de production d'électricité dans un convertisseur électrochimique.

La Figure III.2 présente le fonctionnement d'un accumulateur en décharge. A la différence des piles électrochimiques, les réactions d'oxydoréduction intervenant dans les batteries sont inversibles. On peut donc, à l'aide d'une source extérieure, fournir du courant à la batterie qui fonctionnera alors en charge et les réactions s'effectueront inversement.

La capacité (en Ah) du convertisseur électrochimique est directement liée à la quantité des matières actives mises en jeu dans la réaction d'oxydoréduction. Elle confère en outre au convertisseur son rôle d'accumulateur d'énergie, dont l'expression est, en chaque instant, le produit de la capacité (chargée ou déchargée) et de la tension aux bornes de l'accumulateur.

## b) Différents type de batterie (avantages et inconvénients)[29]

Tableau III.1 Les avantages et les inconvénients des différents types de batterie :

Type de la batterie	Avantages	Inconvénients
Plomb (Pb)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prix bas</li> <li>• Solides</li> <li>• Capables de fournir des courants élevés</li> <li>• Eléments standards se trouvent n'importe où dans le commerce</li> <li>• Facilité de mise en œuvre</li> <li>• Sans effet mémoire (c'est à dire qu'on peut les recharger quand on veut, à n'importe quel niveau de décharge)</li> </ul> <p>Souplesse d'utilisation</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Densité d'énergie</li> <li>• Poids</li> <li>• Autodécharge(1% par jour environ)</li> <li>• Sensibles aux températures</li> <li>• Négatives(perte d'autonomie jusqu'à -25% à -10°C)</li> <li>• Risque de cristallisation desulfatée de Pb silaissé trop longtemps déchargée</li> </ul>
Nickel Cadmium (Ni-Cd)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aptes à supporter de grands courants décharge et recharge grâce à leurs faibles résistances internes.</li> <li>• Faible coût</li> <li>• Solidité mécanique et électrique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Effet mémoire</li> <li>• Densité énergétique moyenne</li> <li>• Recyclage compliqué à cause du cadmium qui est un métal lourd et polluant</li> </ul>
Nickel Métal Hydride (NiMH)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bonne densité d'énergie</li> <li>• Supporte des courants importants car résistance interne faible (les Ni-cd gardent cependant l'avantage dans ce domaine)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fragile car ne supportent pas la surcharge, nécessitant par conséquent l'usage de chargeurs automatiques performants et coûteux</li> <li>• Détection de fin de charge</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simples à stocker et à transporter</li> </ul>	difficile <ul style="list-style-type: none"> <li>• 0Durée de vie faible</li> </ul>
Lithium (Li)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Densité énergétique très élevée grâce aux propriétés physiques du lithium</li> <li>• Autodécharge très faible (5% par mois)</li> <li>• Aucun effet mémoire -Poids</li> <li>• Agrément d'utilisation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prix très élevé</li> <li>• Nécessite un circuit de protection sérieux (B.M.S. et P.C.M.) pour gérer la charge et la décharge afin d'éviter la destruction des éléments.</li> </ul>

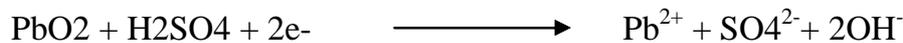
### c) Les batteries au plomb :

Les batteries utilisées dans les systèmes solaires autonomes sont en général de type plomb acide [30]. Ils sont basés sur la réaction d'oxydoréduction suivante [31] :

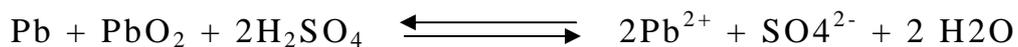
À l'anode :



À la cathode :



Reaction global:



### d) Les différents types de batteries au plomb

Les accumulateurs au plomb sont divisés en deux grandes familles : les batteries ouvertes (Vente de Batteries) et les batteries scellées (recombinaison de gaz) [32].

**Tableau III-2** Principales comparaisons des 2 familles technologiques de la batterie au plomb

Type de batterie au plomb	Ouverte	A recombinaison de gaz
Electrolyte	Liquide	gélifié
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> <li>• durée de vie pouvant être importante (5 à 15 ans)</li> <li>• technologie la moins chère</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• recombinaison =&gt; pas de perte en eau (pas d'entretien)</li> <li>• très faible taux de dégagement de gaz (sécurité)</li> </ul>
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> <li>• consommation d'eau(maintenance)</li> <li>• installation en locaux spécifiques(dégagements gazeux)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• plus faible durée de vie (modes de défaillance spécifiques)</li> <li>• plus sensible à la température</li> </ul>

**e) Caractéristiques de la batterie :**

**Capacité nominale :** C'est la quantité maximum d'énergie que contient une batterie (sous température idéale de 25°). Elle s'exprime en Ampère heure (Ah).

**Etat de charge :** C'est le pourcentage de la quantité d'énergie disponible dans la batterie à un instant t.

**Profondeur de décharge (PDD) :** C'est le pourcentage d'énergie maximum que l'on peut retirer d'une batterie. Elle ne doit pas être déchargée au-delà de cette valeur, afin de prolonger sa durée de vie.

**Température :** La variation de température influence le rendement de la batterie. Celle-ci a un fonctionnement idéal à température ambiante de 25°C ; Il faut donc prévoir si possible une régulation thermique pour maintenir sa durée de vie.

**Tension nominale :** C'est la tension type de la batterie. Elle correspond aussi à la tension de fonctionnement du système autonome. Ex : Tension 12V, 24V, 48V...

**Taux de décharge :** C'est le temps nécessaire pour décharger entièrement la batterie. Supposons une batterie de capacité de 100Ah et de courant de décharge de 5 A : Le taux de décharge sera  $100\text{Ah} / 5\text{A}$  soit 20 heures ; Il est noté  $C/20$ .

**Taux de recharge :** C'est la quantité de courant qu'il faut pour recharger une batterie en un temps donné (temps du taux de décharge). Supposons une batterie de 100Ah et de taux de décharge  $C/20$  : Le taux de recharge sera  $100\text{Ah} / 20\text{h}$  soit 5 A.

**Cycle et durée de vie :** C'est le nombre de séquences de charge/décharge, que peut subir une batterie à sa profondeur de décharge. Il détermine les performances de la batterie et sa durée de vie.

**Nombres de jours d'autonomie :** C'est la durée pendant laquelle la batterie peut alimenter toute seule l'installation en courant, sans être rechargée ni endommagée[33].

#### **f) Problèmes liés aux batteries [34] :**

Les batteries, quel que soit la technologie qu'elles utilisent, peuvent poser un certain nombre de problèmes, souvent évitables lors d'une utilisation correcte ou en s'équipant du matériel adéquat.

##### **Stratification :**

Ce phénomène signifie que l'électrolyte n'est pas homogène. L'acide étant plus lourd que l'eau, il s'accumule au fond de la batterie et l'eau au-dessus. La réaction ne se fait plus aussi bien, le haut des électrodes s'oxyde et risque de geler, tandis que le bas est attaqué par l'acide. On remédie facilement à cela par une charge d'égalisation délivrée périodiquement par le régulateur.

##### **Sulfatation :**

La sulfatation apparaît naturellement lorsque la batterie se décharge. Il se forme alors une accumulation de sulfate de plomb sur les électrodes, ce qui réduit les surfaces de contact avec l'électrolyte et par conséquent l'intensité du courant. Quand

la batterie est rechargée, la sulfatation disparaît sauf en cas de forte température, de décharge trop profonde ou de dégagement gazeux.

### **Oxydation des électrodes et des bornes :**

Lorsque le niveau de l'électrolyte est trop faible, les électrodes sont exposées à l'air et s'oxydent. Il en va de même pour les bornes de la batterie si celle-ci n'est pas dans un endroit sec ou si les cosses ne sont pas assez serrées. L'oxydation empêche de manière définitive le courant de circuler.

### **Prix :**

Une batterie coûte relativement cher comparé aux autres équipements d'une installation photovoltaïque autonome (environ 25% du coût initial). Sachant qu'une installation peut vivre plus de 30 ans, et que durant cette période il faudra nécessairement changer les batteries, leur prix peut facilement représenter la moitié du coût final. Les véritables économies ne se font pas à court terme. Choisir une batterie moins chère qui ne fonctionnera que 2 ou 3 ans n'est pas rentable. Il existe des modèles, plus onéreux, qui peuvent fonctionner pendant 10 ans voir plus.

### **g) Solutions :**

- Acheter des batteries ayant une longue durée de vie pour faire de vraies économies.
- Les conserver dans un endroit ventilé et d'une température proche de 25°C.
- Vérifier le serrage des cosses et les niveaux d'électrolyte.
- Il faut que les batteries soient chargées pour être stockées si on ne les utilise pas.
- Choisir un bon régulateur capable d'effectuer des charges d'égalisation et de ne pas délivrer des tensions trop fortes.
- Si l'endroit où sont placées les batteries subit de grandes variations de température il faut que les batteries disposent d'une sonde thermique pour adapter la tension du régulateur.

### **h) Contexte industriel et économique [28]**

Le marché de la batterie au plomb est un enjeu industriel important. Il concerne les batteries de démarrage (SLI, Starting Lighting Ignition) ainsi que la plupart des batteries stationnaires.

Les industriels sont par conséquent très nombreux dans le monde entier : Panasonic, Hawkerou GP Batteries, CEAC, Fulmen ou Varta. Le marché est donc très concurrentiel.

Le coût des accumulateurs au plomb varie entre 50 et 150 Euros/kWh, qui est un des plus faibles parmi les systèmes de stockage. C'est l'une des principales raisons pour lesquelles la batterie au plomb est très utilisée. Ce coût est quasiment incompressible, du fait de la très grande maturité de la technologie.

Le taux de recyclabilité de la batterie au plomb atteint pratiquement 100 % ce qui participe aux avantages de ce type d'accumulateur malgré la haute toxicité de son principal matériau, le plomb.

### **III.3.3 Système de régulation**

Tous les systèmes photovoltaïques doivent comporter une régulation soignée de la charge et de la décharge de la batterie. En effet, la batterie est l'un des éléments les plus fragiles d'un système PV ; sa durée de vie est étroitement liée à la façon dont elle est chargée et déchargée : une longévité raisonnable n'est atteinte que par une protection soignée contre la surcharge ou la décharge trop profonde.

Le régulateur a un rôle essentiel dans la réduction du courant lorsque la batterie est presque entièrement chargée. Lorsqu'une batterie se rapproche d'un état de charge complète, de petites bulles commencent à se former sur les électrodes positives. A partir de ce moment, il vaut mieux réduire le courant de charge non seulement pour éviter des dégâts mais aussi afin de mieux atteindre l'état de charge complète. Un courant trop élevé peut provoquer une déformation des électrodes à l'intérieur, ce qui pourrait créer un court-circuit.

Le régulateur de charge assure deux fonctions principales :

- La protection des batteries contre les surcharges et les décharges profondes l'optimisation du transfert d'énergie du champ PV à l'utilisation.
- La tension aux bornes de la batterie est l'indication sur laquelle s'appliquera le régulateur pour assurer sa fonction. Le régulateur mesure en permanence cette tension et la compare à deux seuils de tensions pré-réglés : seuil haut et seuil bas. Il existe plusieurs types de régulateurs.

**a) Types de régulateurs [28] :**

**Régulateur Shunt :**

Convient aux applications de petite puissance comportant 1 ou 2 modules PV. Le régulateur shunt contrôle la charge de la batterie en court-circuitant le module photovoltaïque sans aucun risque. Tous les régulateurs shunt exigent la présence d'une diode anti-retour en série entre la batterie et l'élément shunt afin d'empêcher le court-circuit de la batterie.

**Régulateur Série :**

Convient aux applications de moyenne puissance dont le courant des modules PV est supérieur à 10 A. Lorsque la batterie atteint la pleine charge, le régulateur coupe le courant provenant des modules PV.

**Régulateur MPPT :**

Convient aux applications de grande puissance. Il garantit une récupération maximale de la puissance provenant des modules PV en mesurant en permanence le courant et la tension ; Cependant il faut considérer les pertes dues à cette technique. Aussi ce régulateur peut travailler dans une vaste gamme de température.

### **III.3.4 Système de conversion**

Le système de conversion d'énergie est disposé généralement soit entre le champ PV et la charge (sans stockage avec charge en continu, convertisseur continu-

continu), soit entre la batterie et la charge (dans ce cas il sera appelé onduleur ou convertisseur continu alternatif) [35].

### **Le convertisseur continu– continu**

Ce type de convertisseur est destiné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du champ PV correspondant au point de puissance maximal. Ce système d'adaptation est couramment appelé MPPT (maximum power point tracking). Son rendement se situe entre 90 et 95 %.

Ce système présente deux inconvénients pour un PV de faible puissance

### **Prix élevé ;**

Le gain énergétique annuel par rapport à un système moins complexe (cas d'une régulation de la tension) n'est pas important [36].

### **Le convertisseur continu – alternatif**

Pour alimenter les appareils qui fonctionnent en courant alternatif, il faut interposer un convertisseur entre la batterie et ces appareils. Les convertisseurs les plus utilisés transforment le courant continu issu de la batterie en courant alternatif 220 V/50 Hz ou 380 V/50 Hz [36].

## **III.4 Utilisation de l'énergie produite**

La charge est l'équipement électrique alimenté par le système peut être de type continue comme des équipements de télécommunications, le pompage d'eau, ou de type alternative dans les cas d'usage domestique (maison solaire), ce cas nécessite un onduleur [37].

### **III.4.1 Expression en Wattheures par jour (Wh/j) :**

Multiplier la puissance que consomme chaque appareil, par le nombre d'heures durant lesquelles l'appareil est utilisé sur une journée de 24h.

Additionner ensuite la consommation électrique de tous les appareils ; Le résultat trouvé est la consommation électrique totale de l'application par jour. Elle s'exprime en Wattheure par jour (Wh/j).

#### **III.4.2 Expression en Ampère-heure par jour (Ah/j) :**

Multiplier la puissance que consomme chaque appareil, par le nombre d'heures durant lesquelles l'appareil est utilisé sur une journée de 24h ; Diviser ensuite le résultat par la tension nominale de l'appareil : On obtient ainsi la charge électrique en courant par jour de chaque appareil.

Additionner ensuite la charge électrique de tous les appareils ; Le résultat trouvé est la charge électrique totale en courant de l'application par jour. Elle s'exprime en Ampère-heure par jour (Ah/j).

Il est primordial de bien évaluer votre consommation électrique, car elle définit la taille de votre système ; Plus la consommation est élevée, plus la taille de vos composants sera importante et plus le coût d'achat sera élevé. Il faut bien choisir ses appareils, et éviter les appareils à forte consommation.

#### **III.5 Type de systèmes photovoltaïque**

On peut représenter les systèmes photovoltaïques par une très grande variété de configuration et peuvent être classés en six groupes distincts. Les trois premiers groupes a, b et c sont des systèmes autonomes non reliés à un réseau électrique. Par contre les groupes d, e et f sont reliés différemment au réseau électrique [38].

##### **III.5.1 Système autonome avec batterie :**

C'est le système photovoltaïque le plus commun. Le champ PV sert de chargeur pour la batterie. L'électricité peut alors être utilisée en tout temps. Par exemple, ce système est bien adapté pour l'éclairage d'une maison où il faut de l'électricité lorsqu'il ne fait plus jour.

##### **III.5.2 Système autonome sans batterie :**

Ce type de système ne requiert pas de stockage d'électricité, soit parce que la production d'énergie des cellules est suffisante sous un faible éclairage (ex. :

calculatrice), soit que le temps de fonctionnement de la charge n'est pas critique (ex. : pompe à eau).

### **III.5.3 Système hybride PV/génératrice :**

Ce système utilise les avantages de l'énergie photovoltaïque et de la génératrice au diesel, au propane ou à l'essence. Le système photovoltaïque fournit une énergie intermittente mais souvent moins coûteuse en régions isolées ou éloignées. La génératrice sert d'énergie d'appoint, selon la demande. Ce type de système s'applique particulièrement bien à des sites éloignés où il est important d'avoir de l'électricité à tout moment, où les coûts de transport du carburant sont élevés et où il n'est pas encore rentable d'utiliser le système photovoltaïque seul avec les batteries. Les systèmes hybrides PV/générateurs sont souvent utilisés pour les tours de télécommunications ainsi que pour les refuges et les camps forestiers en régions éloignées. Ils peuvent également être couplés avec d'autres sources d'énergie telles les éoliennes et les microcentrales hydrauliques, lorsqu'il y a une complémentarité des productions électriques.

### **III.5.4 Système PV centralisé :**

Ce système fonctionne comme une centrale électrique normale mais doit tenir compte de la fluctuation de la production d'énergie qui est liée à l'ensoleillement.

### **III.5.5 Système PV sur réseau décentralisé :**

Ce système photovoltaïque est branché directement sur un réseau électrique, mais il est installé près de la demande. Il peut être installé, par exemple, sur une résidence individuelle ou sur un centre commercial, de telle sorte qu'il alimente cette charge et fournit l'excédent de sa production sur le réseau durant le jour. Durant la nuit, la charge puise l'énergie requise sur le réseau. Ce système permet de diminuer les frais de transport d'électricité et la surcharge de ligne, particulièrement en ce qui a trait aux charges adaptées à la production photovoltaïque tels les systèmes d'air conditionné (gestion de la demande). Ce système permet aussi d'éviter le stockage classique sur batteries (d'où réduction du coût global).

### III.5.6 Système PV sur réseau diesel :

Ce système est utilisé principalement dans les communautés ou les villages éloignés. Le générateur PV est branché en parallèle avec les génératrices au diesel du réseau villageois et fournit l'électricité sur ce réseau lorsque l'ensoleillement le permet. Il permet de réduire la consommation d'un carburant diesel très coûteux en régions éloignées et diminue les temps de fonctionnement des génératrices.

## III.6 Protection des systèmes solaires photovoltaïques

### III.6.1 Protection par diodes

Le choc électrique doit être évité aux cellules, car c'est des éléments fragiles, elles peuvent être détruites par un échauffement excessif par effet Joule si elles deviennent réceptrices de courant. A cet effet, les modules doivent être protégés par des diodes.

Les diodes séries : Un module peut devenir récepteur du courant fourni par les autres séries de modules ayant une tension plus élevée. Pour empêcher la batterie de se décharger la nuit dans les photopiles, ou pour empêcher une série de modules contenant un module défaillant ou masqué, une diode "anti retour" est intégrée dans chaque série [39].

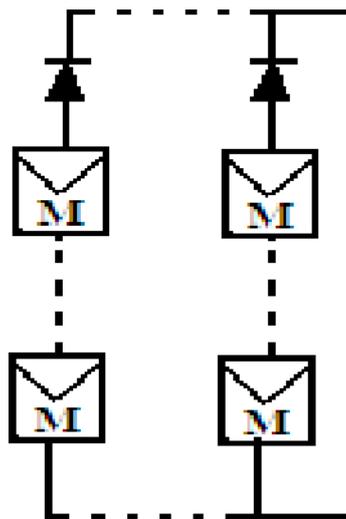


Figure III.3 Protection par diodes en série.

### III.7 Le câblage

Le câblage a pour but de regrouper électriquement les modules solaires. Généralement, les modules sont câblés tout d'abord en série pour réaliser des branches qui comportent chacune leur diode en série.

La mise en parallèle de branches est réalisée, pratiquement, à l'aide de boîtes de jonction fixées sur les châssis. Il est indispensable d'apporter un soin particulier au serrage des cosses et au câblage d'une installation. Une chute de tension trop importante dans les connexions et dans les câbles peut réduire considérablement le courant de charge de la batterie. Cette chute de tension est loin d'être négligeable lorsque de forts courants sont fournis sous de faibles tensions. Cette contrainte impose l'utilisation de câbles résistant aux intempéries et dont la section sera fonction de la distance entre panneau solaire et batterie [40].

### III.8 Avantages et Inconvénients de l'énergie Photovoltaïque [41]

#### III.8.1 Principaux avantages de l'énergie photovoltaïque :

- Energie solaire gratuite.
- Pas de pollution.
- Sa fiabilité et la longue vie de l'installation.
- Sa structure fixe.
- Son coup de maintenance bas.
- Sa flexibilité (dimensionnement selon les besoins, modularité).
- L'installation ne produit aucun bruit.
- Son potentiel illimité. 5% de la surface des déserts suffiraient pour alimenter la planète entière

#### III.8.2 Inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

- Le coût élevé de l'installation.
- Le rendement relativement bas de l'effet photovoltaïque.
- La puissance est réduite lorsque les conditions climatiques sont défavorables (nuages).

- Le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire pour une installation autonome.
- Même si l'électricité produite par une installation photovoltaïque est sans pollution, la fabrication, l'installation et l'élimination des panneaux ont un impact sur l'environnement.

### **III.9 Conclusion**

Dans ce chapitre, on a détaillé de façon relativement brève tous les éléments nécessaires afin de permettre une bonne compréhension du fonctionnement des systèmes PV ; on a présenté une description générale des systèmes photovoltaïques, parmi les éléments les plus importants, dont on a parlé dans ce chapitre, sont :

- La partie production d'énergie.
- Le stockage de l'énergie avec les accumulateurs et leur principe de fonctionnement ainsi que leurs caractéristiques.

# **CHAPITRE IV**

## **Résultats et discussions**

### IV.1.Introduction :

Ce chapitre présente le modèle développé à l'aide de logiciel JDEVS pour consulter les résultats et le MATLAB pour tracer les graphes

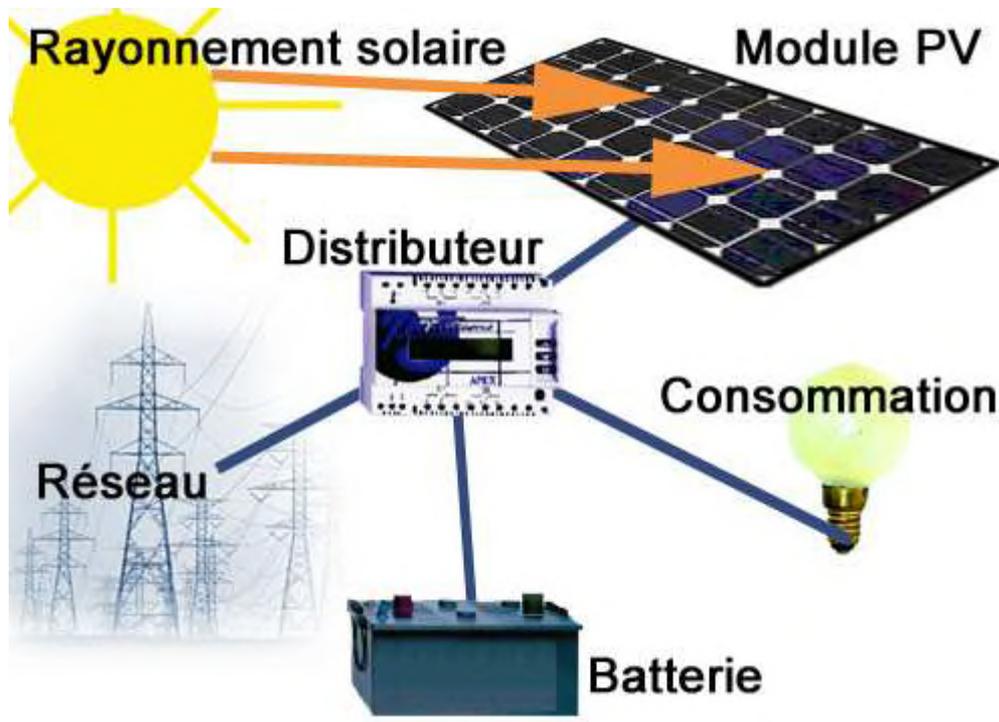


Figure IV.1:Un système photovoltaïque

### IV.2. Modélisation d'un système photovoltaïque

Les systèmes à énergie solaire photovoltaïque, présentés en figure IV.1 sont aussi connus comme systèmes "PV". Ce sont des centrales électriques en miniature pouvant fonctionner en mode autonome ou mode connecté au réseau électrique.

Les systèmes "PV" autonomes sont composés d'une batterie optionnelle de panneaux de production d'électricité photovoltaïque et d'un répartiteur [42]. Leur mode de fonctionnement est simple :le rayonnement solaire est converti en électricité par le panneau photovoltaïque, l'énergie produite est ensuite partagée par le distributeur entre la recharge de la batterie et les postes de consommation. Si le soleil ne brille pas suffisamment, la batterie est utilisée pour fournir la puissance manquante. si la batterie est complètement chargée, l'énergie non consommée est perdue.

Les systèmes "PV" connectés utilisent le réseau électrique comme batterie, ils sont uniquement composés d'un répartiteur et de panneaux photovoltaïques. Dans un système connecté, l'énergie produite peut être renvoyée sur le réseau tandis que pendant les périodes de sous production, le réseau complète l'apport énergétique, assurant du même coup un fonctionnement sans interruption de service.

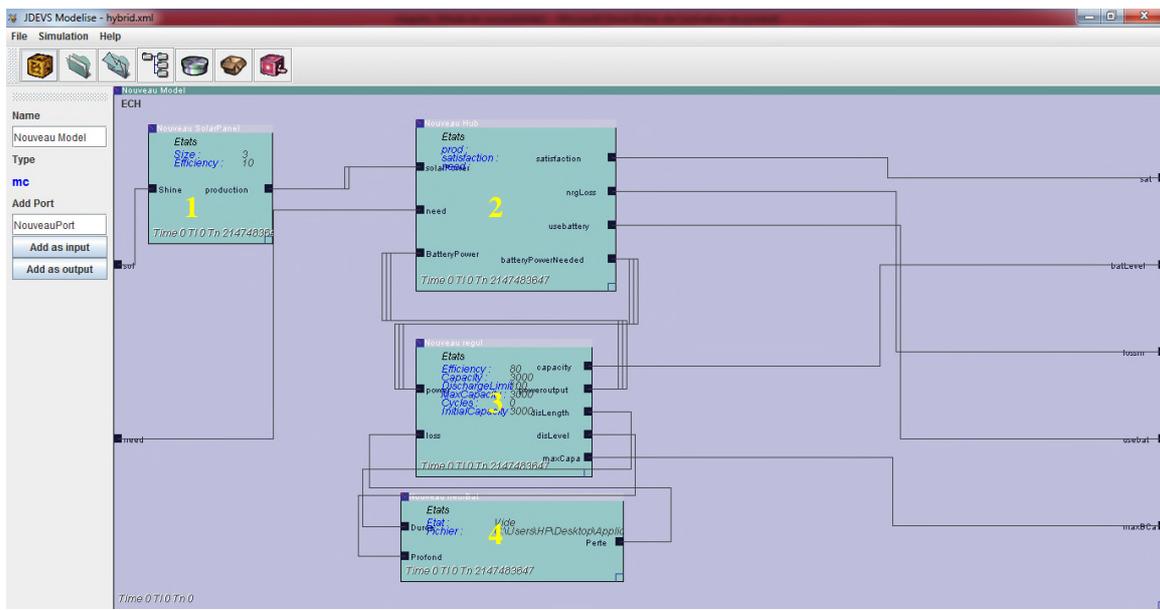


Figure IV.2:Modèle du système PV dans JDEVS

Le but de ce modèle est d'effectuer des expérimentations virtuelles sur ces systèmes et aider à leur dimensionnement en fonction des sites d'implantation [43].

Cette équipe, en tant que spécialiste du domaine, a le protocole permettant de préciser le cadre expérimental et donc les paramètres et variables d'entrée et de sortie du modèle. Figure IV.2 présente le modèle implémenté dans JDEVS.

Le modèle général a deux entrées :

- **sol** : l'ensoleillement en Watt/Heure/mètre carré.
- **need** : le besoin en consommation en Watt/heure

Il est possible de suivre plusieurs variables de sorties du modèle suivant le cadre expérimental dans lequel l'utilisateur se place. Cependant la majorité des études dans

le domaine énergétique [43] s'intéresse à un nombre restreint de ces variables. Nous avons cinq ports de sortie pour permettre de suivre l'évolution du modèle :

- **Sat** :le pourcentage de besoin satisfait par le système par rapport au besoin réel de consommation.
- **Lossrn** : la quantité d'énergie solaire perdue en Watt/heure.
- **Usebat** :le pourcentage d'utilisation d'énergie provenant de la batterie par rapport à l'énergie du panneau photovoltaïque.
- **batLevel** :le niveau de la batterie en Watt (pour une tension constante de 12 volts).
- **maxBCa**: la capacité maximum de la batterie en Watt (pour une tension constante de 12 volts).

Une des contraintes posées par les spécialistes du domaine et les utilisateurs finaux est la modalité de mesure des données d'entrée et de sortie. En effet, la grande majorité des stations de mesures, comme les modèles existants, fonctionnent en temps discret.

Le modèle doit donc être capable de recevoir en entrée des événements arrivant à intervalles de temps réguliers (ici l'heure).Les événements de sortie sur les ports Lossm et batLevel doivent aussi être générés à intervalles de temps régulier.

Les autres ports de sortie sont plus conformes à un mode de simulation à événements discrets et ne sont actifs que pour informer d'un changement de valeur. Les sous-modèles peuvent ainsi fonctionner sur ce mode mixte temps/événements discrets. Ils sont présentés en détail dans la suite de cette section.

#### IV.2.1 Le panneau photovoltaïque

Le modèle du panneau photovoltaïque (1) sur la figure IV.2 représente le système de production d'énergie, il possède deux ports :

- Un port d'entrée, Shine :l'ensoleillement en Watt/Heure/mètre carré.
- Un port de sortie, Production : la production électrique en watt/heure.

Nous avons deux paramètres dans ce modèle pour permettre à l'utilisateur final d'effectuer plusieurs expérimentations :

- **Size** : la taille en mètres carrés,
- **Efficiency** : le rendement en pourcentage (%) de conversion énergétique (solaire vers électrique).

Le comportement des cellules photovoltaïques composant un panneau est bien connu, il peut donc être modélisé comme un modèle atomique DEVS classique, en utilisant les données du fabricant. L'énergie de sortie calculée par le modèle est envoyée au distributeur.

#### IV.2.2 Le distributeur (Hub)

Le modèle du distributeur (2) sur la figure IV.2 est aussi un modèle DEVS classique ; ce modèle est chargé d'assurer la répartition des charges entre la batterie, le panneau solaire et les postes de consommation. Ce sous-modèle est dans une position centrale car il est connecté en entrée, à la batterie, au panneau photovoltaïque et aux postes de consommation par les ports :

- **Sol** : la production en Watt/heure du système source d'énergie,
- **Need** : la demande électrique en watt/heure.
- **BatteryPower** : l'énergie disponible dans la batterie, en Watt.

En sortie ce modèle est connecté à la batterie pour communiquer le besoin en énergie. Les autres ports de sortie sont utiles à la génération de données pour l'analyse des résultats de simulation. Le sous-modèle est globalement composé de quatre ports de sortie :

- **Satisfaction** : le pourcentage de besoin satisfait par le système par rapport au besoin réel de consommation,
- **nrgLoss** : la quantité d'énergie solaire perdue en Watt/heure,
- **usebattery** : le pourcentage d'utilisation d'énergie provenant de la batterie par rapport à l'énergie du panneau photovoltaïque,

- **batteryPowerNeeded** :le besoin en énergie (décharge) ou bien la quantité d'énergie disponible pour la recharge de la batterie (si la batterie n'est pas pleine), en Watt.

Dés que le niveau change dans le modèle de la batterie, un message est envoyé au distributeur pour l'informer de la nouvelle valeur; ainsi le distributeur connaît constamment le niveau d'énergie dans la batterie. Lorsqu'il y a un besoin en énergie et que l'énergie disponible est suffisante, un message est envoyé par le port `batteryPowerNeeded`, donnant la quantité d'énergie à enlever à la batterie. Lorsqu'il y a un surplus d'énergie et que le niveau de la batterie n'est pas au maximum, un message est envoyé pour la recharge de la batterie.

Le comportement de la batterie évolue durant la simulation à cause de son vieillissement. Ce vieillissement est souvent propre à un type ou même une marque de batterie. Il est alors dit de le modéliser avec des techniques conventionnelles. Le modèle de batterie qui est présenté dans la section suivante utilise.

### IV.2.3 La batterie

Le comportement physique d'une batterie est très complexe et fait intervenir de nombreuses réactions chimiques qui nécessitent beaucoup de données pour pouvoir être simulées de manière conventionnelle. Nous avons donc adapté un modèle existant, décrit dans [42], d'obtenir des résultats satisfaisants. Dans ce modèle, la batterie est considérée comme un réservoir d'électricité avec une capacité et une efficacité de charge en paramètres et peut donc être modélisée comme un modèle DEVS classique. A chaque batterie est attaché un modèle de vieillissement qui sa capacité de charge en cours de simulation.

Selon [44] Un réseau de neurones est un processeur massivement distribué en parallèle qui a une propension naturelle pour stocker de la connaissance empirique (experimental knowledge selon l'auteur) et la rendre disponible à l'usage. Il ressemble au cerveau sur deux aspects : La connaissance est acquise par le réseau au travers d'un processus d'apprentissage. Les connexions entre les neurones, connues sous le nom de poids synaptiques servent à stocker la connaissance.

Les réseaux de neurones informatiques se basent sur ces principes pour simuler le comportement d'un système lorsque les seules connaissances exploitables sont des données expérimentales. Toutefois un des principaux inconvénients des réseaux de neurones est qu'ils sont difficilement vérifiables [45]. Le lecteur intéressé trouvera dans [46] ou [47] une description détaillée de cette technique.

Le modèle de batterie(4) sur la figure IV.2 est ici considéré comme un réservoir de puissance mesurée en Watt. Il possède deux ports d'entrée :

- **Duree** : la puissance qui doit être ajoutée ou retranchée à la quantité présente dans la batterie,
- **Profond**: la perte de capacité de stockage.
- De nombreuses variables de sortie sont nécessaires au calcul de vieillissement et à l'analyse du comportement de la batterie.

Le modèle est composé de cinq ports de sortie :

<b>batLevel</b>	profondeur de la décharge en cours exprimé en pourcentage de la capacité initiale.
<b>maxBCa</b>	capacité maximum de la batterie.
<b>sat</b>	durée de la décharge en cours, exprimée en heures. Ce port émet toutes les heures dès que la puissance disponible est inférieure à la moitié de la capacité maximum.
<b>usebat</b>	la puissance disponible dans la batterie, en Watt, remise à jour dès que la capacité change. Ce port est destiné à être connecté à une sortie du modèle général pour permettre des analyses de résultats de simulation.
<b>Lossnr</b>	Identique au port précédent mais destiné au couplage avec les autres sous-modèles,

Un des avantages majeurs de l'utilisation du modèle décrit dans [42] est que l'on dispose des données pour entraîner et valider le réseau de neurones. Ces données sont collectées au Florida Solar Energy Center [48] qui dispose d'un grand centre d'étude sur les batteries. Cependant le modèle pose un problème lors de son implémentation dans un environnement de simulation à événements discrets car il est dirigé par une horloge. En effet, à cause des données disponibles nous ne pouvons calculer la perte de capacité que toutes les heures, en fonction de la durée de la décharge en cours

L'interface graphique de MATLAB permet de créer simplement et graphiquement la structure de tous ces modèles mais le comportement doit être en code Java. Le cadre expérimental de la simulation est ici identique à l'interface de modélisation. Les expérimentations, réalisées à partir d'une liste d'événements d'entrée et les différentes configurations sont obtenues en modifiant les paramètres des modèles grâce à leurs panneaux de propriétés. Quelques résultats de simulations sont présentés dans la section suivante.

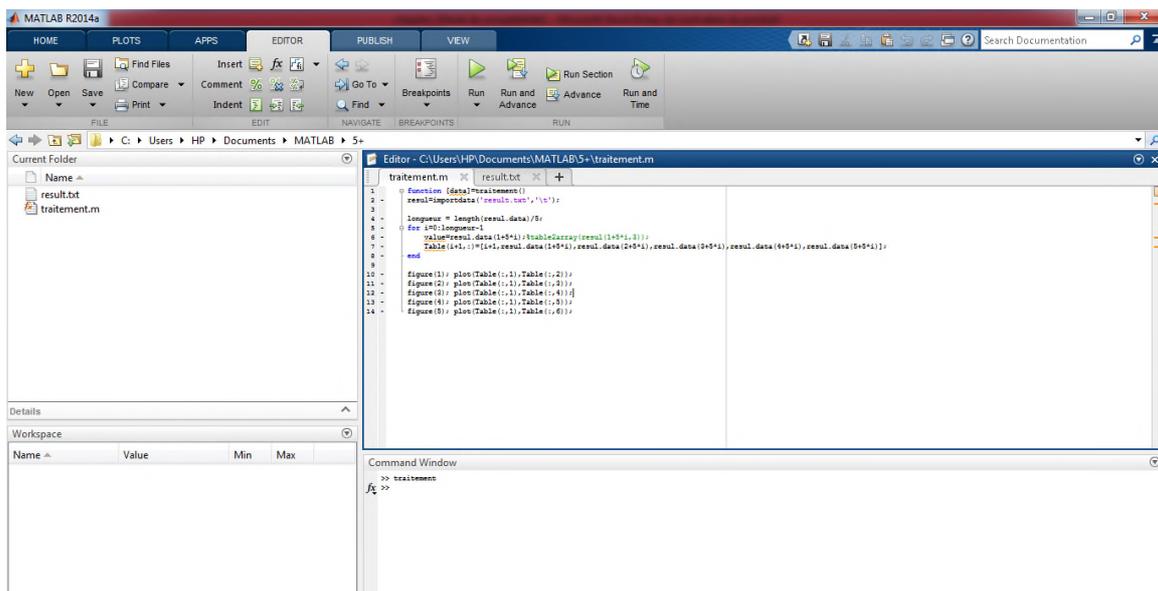


Figure IV.4:le traitement des résultats donnés par JDEVS en MATLAB

## 2.4 Résultats de simulation

Dans le cadre d'une simulation standard de ce modèle, les données d'entrée sont fournies par l'utilisateur et les événements de sorties sont directement stockés dans de fichier texte. Toutefois, grâce à la méthodologie utilisée, il est très simple d'intégrer ce modèle à l'intérieur d'un autre plus complexe comprenant, par exemple, un modèle de consommation et un modèle de calcul de pollution en fonction de l'énergie économisée.

Cinq expérimentations ont été effectuées sur une période de trois (3) ans. Les consommations ont été obtenus auprès du FSRC [48], et correspondent à la consommation d'une maison avec cinq ampoules de type basse consommation utilisées

8h/jour, une télévision utilisée 5h/jour et un petit réfrigérateur (consommation totale journalière sous 12 Volts [49] :

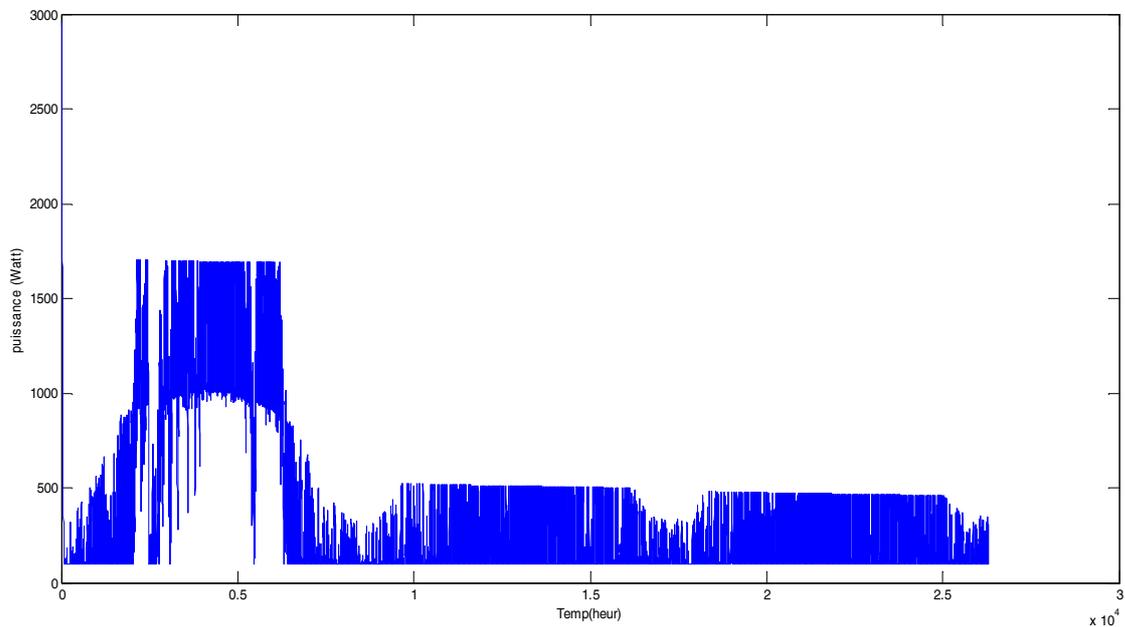


Figure IV.5: l'utilisation de la batterie après 03 ans, en fonction de la taille du panneau photovoltaïque

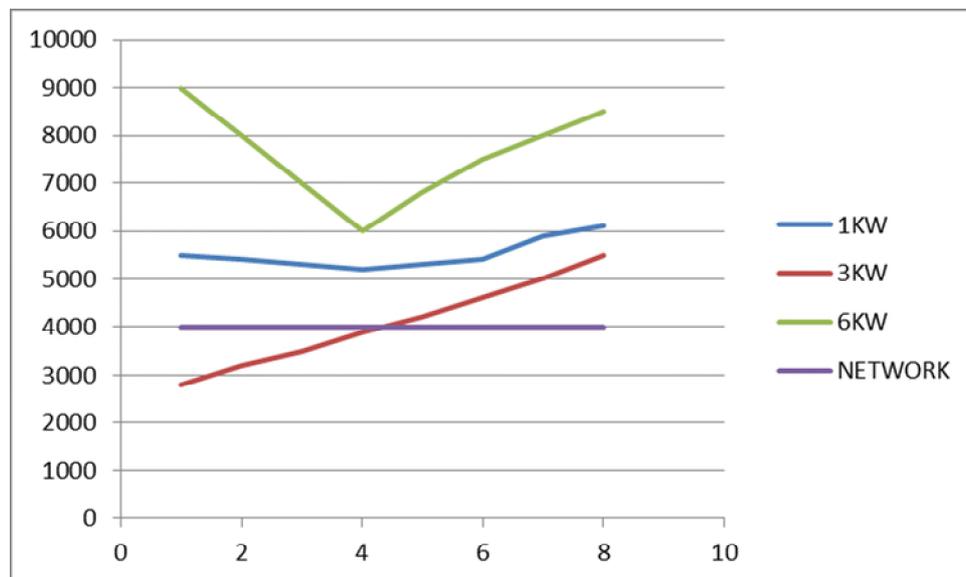


Figure IV.6: Prix d'un système PV déconnecté après 15 ans.

La figure IV.5 présenté l'utilisation de la batterie pondant 03 ans. En a voir que la puissance qui et la capacité du batterie démunie par le temps.

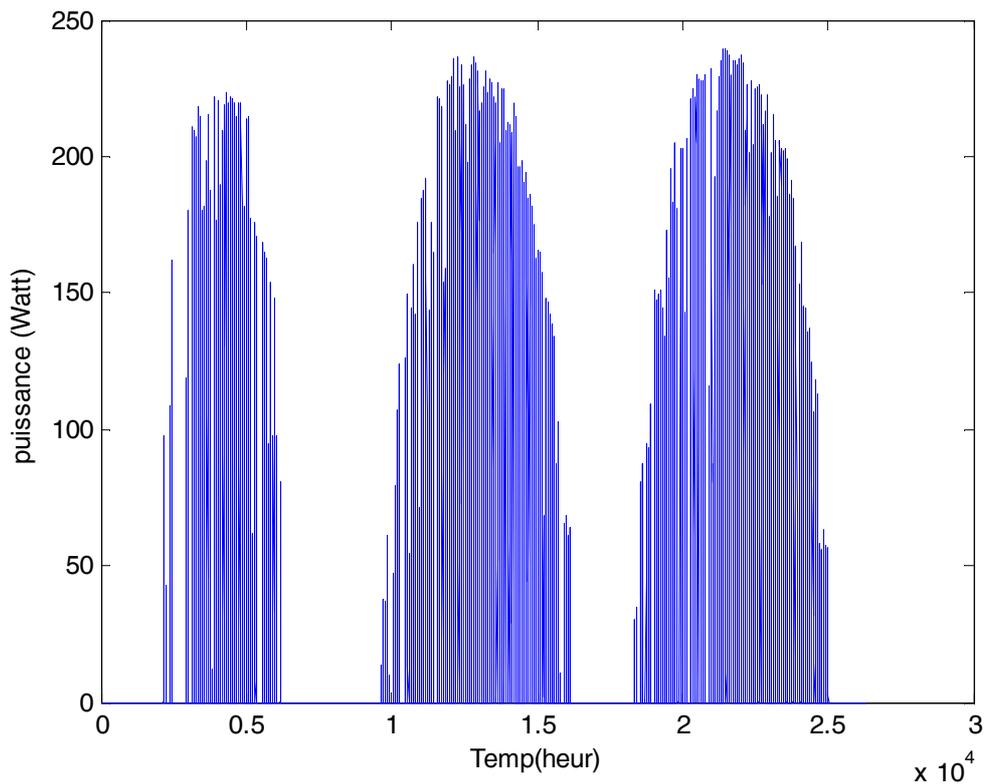


Figure IV.7: présentation du résultat du panneau solaire en Watt/h pour 03 ans.

La figure IV.7 présente une expérimentation d'une simulation avec une taille de panneau solaire de 3 mètres carrés et une puissance de 10 KW de batterie. La capacité maximum de la batterie est fortement dégradée chaque hiver. La figure II.5 montre que la perte de capacité de batterie après trois ans est dépendante de la taille du panneau photovoltaïque. Le calcul de coût d'un système photovoltaïque déconnecté est fortement dépendant de l'usure de la batterie car on considère qu'une batterie qui a perdu 40% de sa capacité doit être changée.

La figure IV.6 montre le prix cumulé d'un système connecté au réseau après 03 ans. Le coût d'un système déconnecté est calculé en ajoutant le coût des batteries de rechange au coût initial de l'installation. Le réseau électrique peut être concurrencé si le système PV est bien dimensionné, mais cela se fait au détriment de la qualité de service (faible satisfaction).

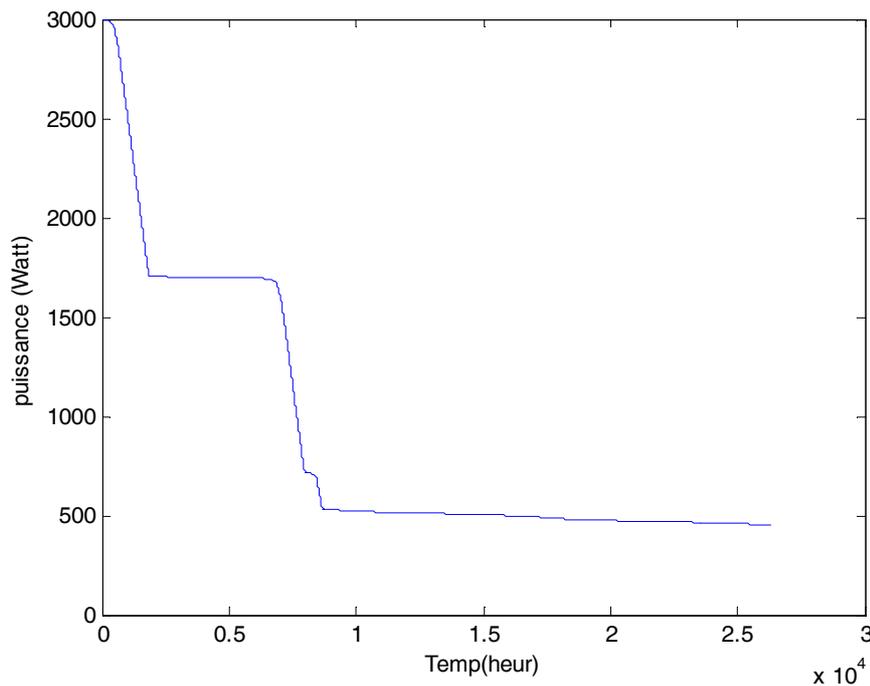


Figure IV.7: Satisfaction moyenne en watt/h sur 3ans.

La figure IV.7 présente la satisfaction moyenne. La satisfaction est un ratio entre la puissance demandée et la puissance fournie qui atteint 100% lorsque l'utilisateur ne manque jamais d'électricité. Un système PV doit être bien dimensionné pour offrir une satisfaction suffisant à de moindres coûts.

Bien que ce modèle produise des résultats exploitables, plus de données sont nécessaires pour entraîner le réseau de neurones [43] de la batterie de manière plus satisfaisante. Il serait aussi nécessaire de simuler de manière plus adéquate les cellules photovoltaïques en prenant en compte la chaleur qui est un paramètre important dans le rendement et qui n'est pas pris en compte dans ce modèle. Le principal avantage de ce modèle réside dans sa flexibilité.

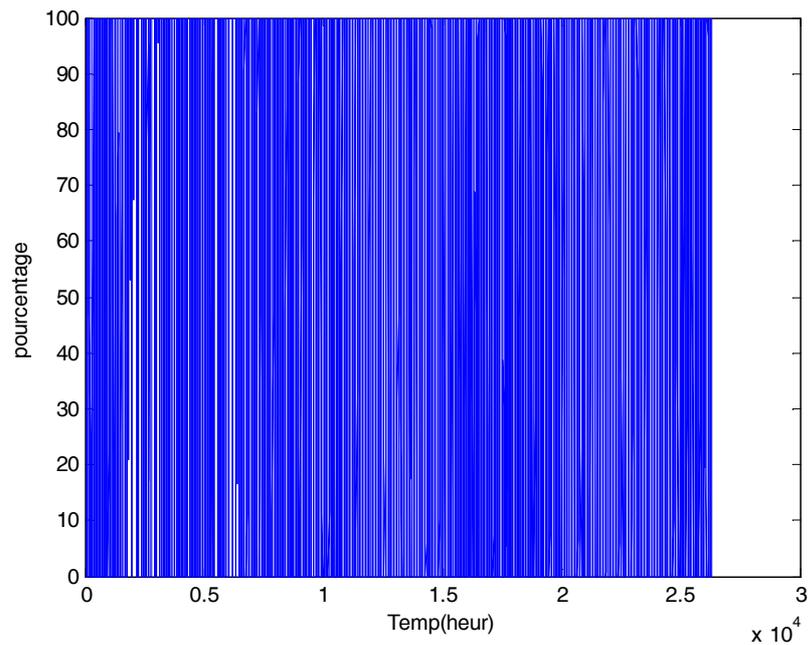


Figure IV.8: La durée de la décharge en cours, exprimée le pourcentage en heures.

Cette figure IV.8 elle est expliquée la durer de déchargement de batterie avec le temps de simulation (3ans) et nous voir quand la décharge elle est stabilisé après le 25<sup>eme</sup> jours de simulation. C'est-à-dire la fonction de charge et décharge du batterie elle est fait en règlement para port la fourniture de puissance de batterie.

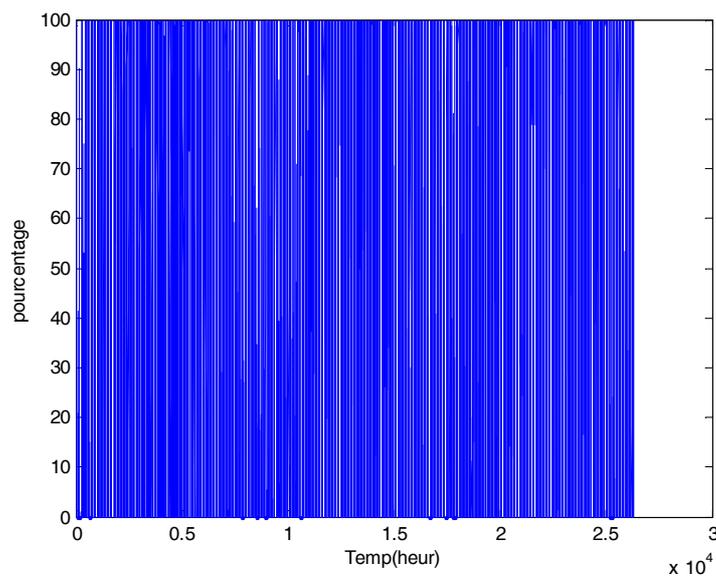


Figure IV.9: la charge de la batterie pendant le temps de la simulation, exprimée le pourcentage en heures.

Cette figure (IV.9) elle est expliquée le pourcentage de puissance de batterie avec le temps de simulation et nous avoir qui la fonction du charge du batterie elle est stabilisé para port la puissance utile.

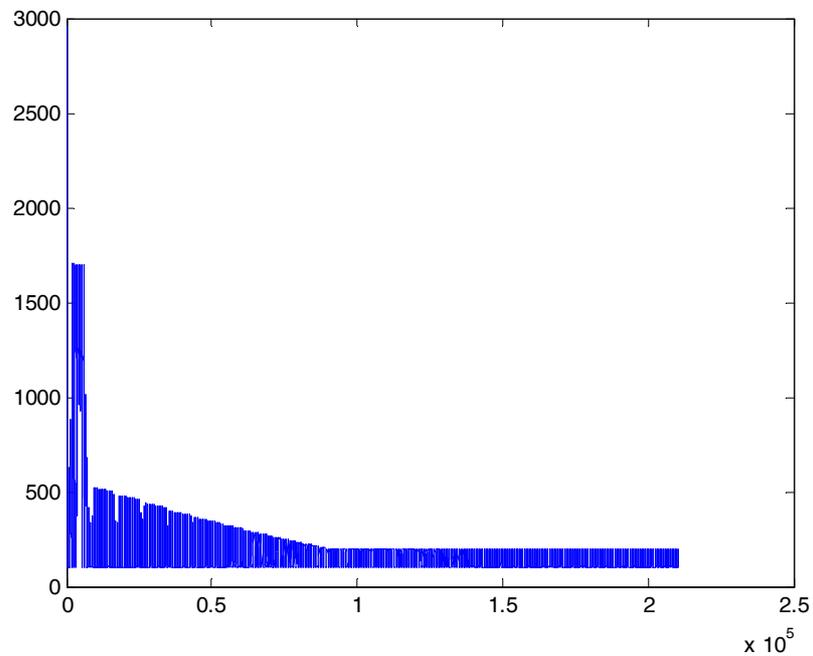


Figure IV.10 : le résultat de puissance de la batterie en Watt/h dans 24 ans.

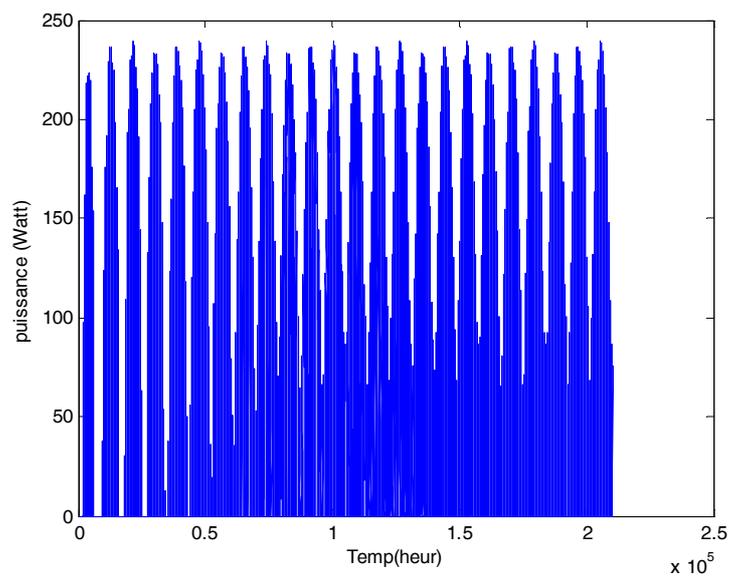


Figure IV.11: présentation du résultat du panneau solaire pour 24 ans.

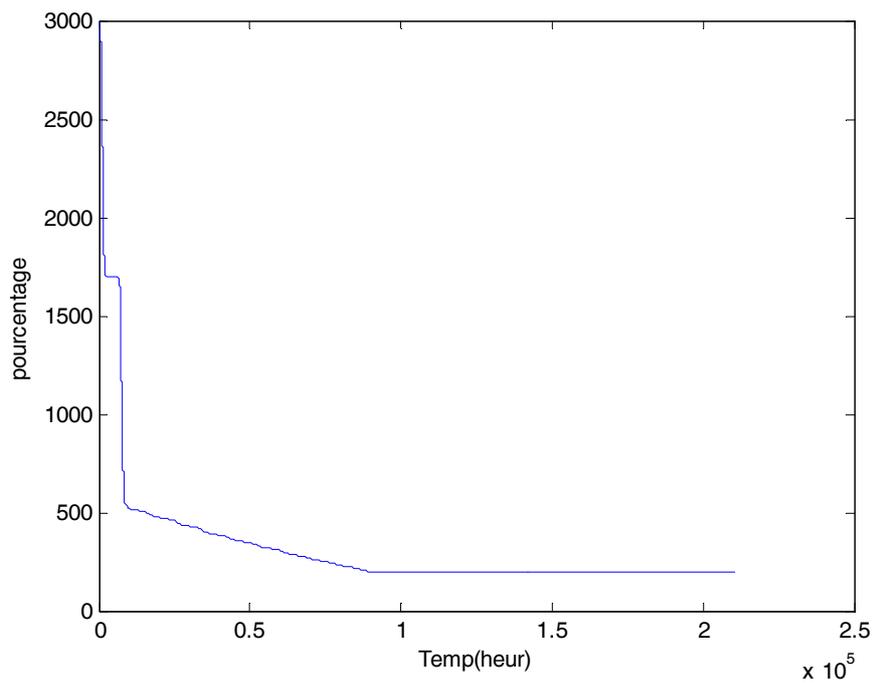


Figure IV.12 : satisfaction moyenne par 24 ans.

### Résultat :

D'après ce qui précède, nous observons que la courbe de satisfaction et le pourcentage de puissance de la batterie sont en accord avec le rapport, car le taux de satisfaction diminue à mesure que la puissance de la batterie diminue, ce qui rend le système non conforme à la neuvième année d'utilisation.

Le pourcentage d'utilisation du réseau augmente chaque jour.

# **CONCLUSION GENERALE**

## Conclusion générale

---

A partir de ce travail on a découvert l'importance de l'ingénieur et les outils de travail de modélisation et simulation sur la vue sociale et commerciale pour obtenir une vue confortable; Dans ce mémoire, nous avons présenté les définitions de simulation de la modélisation et une approche logiciel permettant la création de modèles naturelle (énergie photovoltaïque), ou multi-modèles. L'objectif final du travail était de disposer d'un outil robuste et évolutif de simulation destiné à l'étude de systèmes PV. Pour cela, nous avons analysé les approches existantes et fait le choix de cet outil sur un formalisme unificateur dans le domaine de la modélisation et de la simulation : DEVS. A partir de ce formalisme, nous avons utilisé une architecture logiciel modulaire et orientée objets.

Le logiciel JDEVS est un logiciel permet la modélisation et la simulation des systèmes complexes à événements discrets et permet l'analyse des résultats scientifiques dans plusieurs domaines de recherche, dans notre cas on a utilisé le système de photovoltaïque, on a obtenu des résultats selon plusieurs paramètres tel que la modification de la taille des panneaux, la puissance de la batterie et aussi sur les durées différentes (3 ans et 24 ans).

Dans les travaux futures nous espérons d'améliorer nos connaissances dans ce domaine et faire des modifications sur le modèle en ajoutant d'autres paramètres.

**LA  
BIBLIOGRAPHIE**

## La Bibliographie

---

- [1] Bernard P. Zeigler. Theory of Modeling and Simulation. Academic Press, 1976.
- [2] L.V. Bertalanffy. Théories générale des Systèmes. 1968.
- [3] Bernard P. Zeigler. A theory-based conceptual terminology for M and S, 2000.
- [4] C. Oussalah. Modèles hiérarchisés multi-vues pour le support de raisonnement dans les domaines techniques. Technical report, 1988.
- [5] T.I. Oren. Knowledge-Based Simulation: Methodology and Application. chap. Dynamics Templates and Semantic Rules for Simulation Advisters and Certifiers, 1989.
- [6] P. Fishwick and B.P. Zeigler. A multi-model methodology for qualitative model engineering. ACM transaction on Modeling and Simulation, vol. 2, 1992.
- [7] H. Vangheluwe, J de Lara, and P.J. Mosterman. An introduction to multi-paradigm modelling and simulation. In SCS Editions, editor, Inproceedings of AIS 2002, 2002.
- [8] Bernard P. Zeigler, Tag Gon Kim, and Herbert Praehofer. Theory of Modeling and Simulation. Academic Press, Inc., Orlando, FL, USA, 2000.
- [9] C. Jacques and G.A. Wainer. Using the cd++ DEVS toolkit to develop petri nets. In SCS, editor, Proceedings of the SCS Conference, 2002.
- [10] F. Barros. Dynamic structure discrete event system specification : a new formalism for dynamic structure modelling and simulation. In Proceedings of Winter Simulation Conference 1995, 1995.
- [11] A. Uhrmacher. Dynamic Structures in Modeling and Simulation: A Reflective Approach. ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation vol. 11, 2001.
- [12] Lewis Ntamo and Bernard P. Zeigler. Expressing a forest cell model in parallel DEVS and timed cell-DEVS formalisms. Proceedings of the 2004 Summer Computer Simulation Conference, 2002.

## La Bibliographie

---

- [13] Alejandro Troccoli and Gabriel Wainer. Implementing parallelcell-DEVS. In IEEE, editor, Proceeding of the 36th Annual Simulation Symposium, 2003.
- [14] B.P. Zeigler. Multifaceted modelling and discrete event simulation. AcademicPress, 1984.
- [15] H. Vangheluwe. The Discrete Event System specification DEVS Formalism. Tech-nical report, 2001. <http://moncs.cs.mcgill.ca/>.
- [16] Bernard P. Zeigler and S. Vahie. DEVS formalism and methodology - unity of conception diversity of application. In SCS Editions, editor, Proceedings of the 1993 Winter Simulation Conference, 1993.
- [17] Y. Kwon, H. Park, S. Jung, and T. Kim. Fuzzy-DEVS Formalisme: Concepts, Realization and Application. Proceedings AIS 1996, 1996.
- [18] N. Giambiasi and S. Ghosh. Min-Max-DEVS : A new formalism for the specification of discrete event models with min-max delays. 13th European Simulation Symposium, 2001.
- [19] A. Hamri, N. Giambiasi, and C. Frydman. Min-Max DEVS modeling and simulation. Simulation Modelling Practice and Theory (SIMPAT, October 2006. Ed. Elsevier, ISSN 1569–190X.
- [20] A. Anglani, P. Caricato, A. Grieco, F. Nucci, A. Matta, G. Semeraro, and T. Tolio. Evaluation of capacity expansion by means of fuzzy-devs. [ciseer.ist.psu.edu/499458.html](http://ciseer.ist.psu.edu/499458.html), May 2000. 14th European Simulation MultiConference. Ghent, Belgium.
- [21] Mohamed Smaili. Modélisation à retards flous de circuits logiques en vue de leursimulation. PhDthesis, 1994.
- [22] Paul-Antoine BISGAMBIGLIA, Approche de modélisation approximativepour des systèmes à événements discrets :Application à l'étude de propagation de feux de forêt, THÈSE doctorat ,UNIVERSITÉ DE CORSE, 2008.

## La Bibliographie

---

- [23] DEVS-Group (2003). Groupe de standardisation de DEVS.<http://www.sce.carleton.ca/faculty/wainer/standard/>.
- [24] A. Hamidat, A. Hadj Arab et M. Belhamel, « Etude et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque hybride pour l'électrification du refuge Assekrem » Revue des Energies Renouvelables ; 2007.
- [25] S. Zaamta, A. Dib, "Réalisation d'un régulateur solaire à base de microcontrôleur pour le contrôle de l'état de charge et la protection des accumulateurs" Revue des Energies Renouvelables ; 2009.
- [26] Y. Azoumah, D. Yamegueu, P. Ginies, Y. Coulibaly, P. Girard, "Sustainable electricity generation for rural and peri-urban populations of sub-Saharan Africa: The flexy-energy concept" Energy Policy; 2011.
- [27] D. Linden, T.B. Reddy, "Handbook of Batteries, 3rd Edition". Edition McGraw-Hill, INC New York 2002.
- [28] Julien LABBÉ, "L'hydrogène Electrolytique Comme Moyen De Stockage D'électricité Pour Systèmes Photovoltaïques Isoles" thèse de doctorat ; l'Ecole des Mines de Paris ; 2006.
- [29] Théodore Wildi, Electrotechnique 2, édition ESKA, presses de l'Université de Laval, 1991.
- [30] Centrales photovoltaïques – Guide pour le dimensionnement et la réalisation de projets ; 1996.
- [31] D. Berndt, "Valve-regulated lead-acid batteries" Journal of Power Sources; 2001.
- [32] Linden D, "Handbook of Batteries and fuel cells", Mc Graw-Hill Inc, Third edition, 2002.
- [33] Jimmy Royer et Eric Schiller, Pompage photovoltaïque, édition Multi mondes, IEPF/Université d'Ottawa/EIER/CREPA, 1998.

## La Bibliographie

---

- [34] Théodore Wildi, Electrotechnique 2, édition ESKA, presses de l'Université de Laval, 1991.
- [35] M. Belarbi “Modélisation et Simulation d'un Système de pompage photovoltaïque” Mémoire de magister en électronique Université des sciences et de la technologie d'oran, juin 2006.
- [36] B. Mamri, M. Zaidi “contribution de système photovoltaïque avec pompage”, Mémoire d'ingénieur en électronique, Université de Constantine, 2006.
- [37] Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin 07
- [38] MEHDAOUI AHMED “ Identification par Rauschenbach et par Neuro-Flou du Point de Puissance Maximal du Générateur Photovoltaïque d'un Système Solaire En Milieu Saharien ” thèse de magister ; Ecole Normale Supérieur de l'Enseignement Technique d'ORAN ;2007.
- [39] Ressources Naturelles Canada, “Technologie et application – Photovoltaïque ; Intégration des panneaux solaires aux immeubles”.
- [40] BENCHERIF Mohammed “Modélisation de systèmes énergétiques photovoltaïques et éoliens intégration dans un système hybride basse tension ” thèse de doctorat, Departement De Physique, Universite Abou-BekrBelkaid Tlemcen, 2012.
- [41] F. Kininger, "PhotovoltaicSystemsTechnology", University of Kassel, 2003.
- [42] Jungst, R., Urbina, A., et Paez, T. (2000). Stochastic modeling of rechargeable battery life in a photovoltaic power system. Rapport Technique 1541C, Sandianationallaboratories.
- [43] Notton, G., Muselli, M., Poggi, P., et Louche, A. (2000). Optimization of stand-alone hybrid pv/engine generator/battery system for small energy load, a case study incorsica. PV Hybrid Power Systems 2000 Conference.
- [44] Haykin, S. (1994). *Neural Networks : A Comprehensive Foundation*. Macmillan.

## La Bibliographie

---

- [45] Stimpfl-Abele, G. (1995). Validation of input data for trained neural-nets. *Computer Physics Communications*.
- [46] Hecht-Nielsen, R. (1989). Neural network primer : part i. *AI Expert*.
- [47] Filippi, J.-B. (2000). Analyse, conception et programmation d'un logiciel de simulation de bassins versants. Rapport technique, University of Corsica. TCUDC5092000.
- [48] Gamma, E., Helm, R., Johnson, R., et Vlissides, J. (Addison- Wesley). *Design Patterns : Elements of Reusable Object Oriented Software*. Addison- Wesley. ISBN : 0-201-63361-2.
- [49] Jean Baptiste FILIPPI, Une architecture logiciel pour la multi-modélisation et la simulation à évènements discrets de systèmes naturels complexes, THÈSE doctorat, 2003.