

Intégration de la logique combinatoire dans les systèmes DEVS pour le comportement autonome des panneaux photovoltaïques

Doumbia Niamakolo dit Tiemoko, Faculté des Sciences et des Technologies et des Technologies du Mali, +223-78-27-34-39, n_doumbia@yahoo.fr,

RÉSUMÉ : Le rendement des systèmes photovoltaïques dépend fortement des conditions environnementales telles que l'irradiation solaire, la température ambiante et la vitesse du vent. Les modèles classiques présentent des limites dans la représentation des comportements autonomes et dynamiques des systèmes énergétiques. Cet article propose une approche basée sur l'intégration de la logique combinatoire dans le formalisme DEVS (Discrete Event System Specification) afin de modéliser le comportement autonome des panneaux photovoltaïques. Une classification scientifique des facteurs naturels est utilisée pour transformer les données météorologiques en variables logiques exploitables dans la simulation. Les états environnementaux sont ensuite interprétés par des règles combinatoires permettant au système DEVS d'adapter automatiquement ses états de fonctionnement. Les résultats obtenus montrent une amélioration de l'autonomie décisionnelle ainsi qu'une meilleure représentation des conditions climatiques sahéliennes, notamment au Mali.

Mots-clés : Photovoltaïque, logique combinatoire, DEVS, simulation énergétique, comportement autonome

I. INTRODUCTION

La production d'énergie photovoltaïque constitue aujourd'hui une solution importante pour répondre aux besoins énergétiques tout en réduisant les impacts environnementaux liés aux énergies fossiles. Cependant, le rendement des panneaux photovoltaïques dépend fortement des conditions climatiques telles que l'irradiation solaire, la température ambiante et la vitesse du vent.

La modélisation et la simulation jouent un rôle essentiel dans l'analyse du comportement dynamique des systèmes photovoltaïques. Parmi les approches existantes, le formalisme DEVS (Discrete Event System Specification), proposé par Bernard P. Zeigler, est largement utilisé pour représenter les systèmes complexes à événements discrets grâce à son architecture modulaire et hiérarchique [1].

Plusieurs travaux ont utilisé DEVS dans la modélisation des systèmes énergétiques et environnementaux. Toutefois, les approches existantes présentent certaines limites dans la gestion autonome des transitions internes, notamment lorsque plusieurs états doivent être validés simultanément selon des contraintes logiques ou environnementales.

Par ailleurs, la logique combinatoire, basée sur les tables de vérité et l'algèbre de Boole, permet de réaliser des mécanismes de décision autonomes capables de traiter efficacement plusieurs états binaires, son utilisation dans les systèmes DEVS reste encore peu explorée dans le domaine des systèmes photovoltaïques autonomes.

Dans ce contexte, cet article propose une intégration de la logique combinatoire dans les modèles DEVS afin d'améliorer la cohérence des transitions

internes et le comportement autonome des systèmes photovoltaïques simulés.

Les principales contributions de cet article sont les suivantes :

- la classification des facteurs naturels selon des seuils scientifiques
- une formalisation logique des transitions internes DEVS ;
- la conception d'un modèle atomique et couple logique ;
- l'intégration de règles combinatoires dans un modèle couplé DEVS ;
- une validation expérimentale basée sur des simulations photovoltaïques.

II. MATERELS ET METHODES

2.1 Matériels utilisés

Les expérimentations ont été réalisées à l'aide des outils, des matériels et des logiciels suivants :

- Un ordinateur Intel Core i5 avec 8 Go de mémoire RAM ;
- Un environnement Java JDK 17 ;
- Un logiciel Logisim Evolution pour la conception des circuits logiques ;
- Une plateforme de simulation DEVS-Java ;
- Des données environnementales relatives à l'irradiation solaire, la température et la vitesse du vent.

Les simulations ont été effectuées sur des données environnementales représentatives des conditions climatiques observées dans les zones sahéliennes.

2.2 Classification scientifique des facteurs naturels

- Niveau d'irradiance

L'irradiation solaire G représente l'énergie solaire reçue par unité de surface. Elle influence directement la production électrique des panneaux photovoltaïques.

La classification adoptée est présentée dans le tableau suivant :

Tableau 1: Intervalles de références de l'irradiante

Niveau d'irradiation	Condition	Etat logique	Couleur
Favorable	$G = 700 \text{ W/m}^2$	1	
Moins favorable	$400 = G < 700 \text{ W/m}^2$	0,5	
Défavorable	$G < 400 \text{ W/m}^2$	0	

- Temperature ambiante

La température ambiante TTT influence le rendement des cellules photovoltaïques. Une température excessive provoque généralement une diminution du rendement énergétique.

Tableau 2: Intervalles de références de la température

Niveau d'irradiation	Condition	Etat logique	Couleur
Favorable	$20^\circ\text{C} = T = 30^\circ\text{C}$	1	
Moins favorable	$30^\circ\text{C} < T = 40^\circ\text{C}$	0,5	
Défavorable	$T < 20^\circ\text{C}$ ou $T > 40^\circ\text{C}$	0	

Toute valeur hors des intervalles définis est considérée comme défavorable.

La température du panneau photovoltaïque est estimée par: $T_{\text{panneau}} = T_{\text{air}} + \frac{\text{NOCT} - 20}{800} \cdot G - \delta V$

où :

- ✓ T_{air} : température ambiante
- ✓ NOCT: représente la température nominale de cellule en fonctionnement.
- ✓ δ :représente le coefficient de refroidissement du vent.

Modèle mathématique du rendement

$$P(t) = P_{\text{ref}} \times C_{\text{global}} \times [1 - \beta(T_{\text{panneau}} - T_{\text{ref}})] \times (G_{\text{ref}} / G)$$

- Vitesse du vent

La vitesse du vent améliore le refroidissement naturel des panneaux photovoltaïques.

Tableau 3: Intervalles de refences du vent

Niveau d'irradiation	Condition	Etat logique	Couleur
Favorable	$2 = V = 6\text{m/s}$	1	●
Moins favorable	$0 < V < 2\text{m/s}$	0,5	●
Défavorable	$V=0$ ou $V>6\text{m}$	0	●

2.3 Méthodologie

La méthodologie adoptée repose sur cinq principales étapes :

- Modélisation atomique DEVS ;
- Conception du modèle couplé ;
- Intégration de la logique combinatoire
- Expérimentation
- Simulation et validation expérimentale

2.3.1 Modèle atomique DEVS

Le modèle atomique de chaque facteur est représenté par ce schéma suivant :



Figure 1: Représentation graphique du modèle atomique

$M : (X, Y, S, \delta_{\text{ext}}, \delta_{\text{int}}, \lambda, ta)$ d'où X : est l'ensemble des ports et des valeurs d'entrée, Y : l'ensemble des ports et des valeurs de sortie, $S : \{(v, Sv) | v \in \text{State}\}$: l'ensemble des états du système, State : est l'ensemble des variables d'état, Sv : est l'ensemble des valeurs possibles pour la variable V . $\delta_{\text{ext}} : Q \times S \rightarrow S$ est la fonction de transition externe où $Q = \{(e, s) / s \in S, 0 \leq e \leq ta(s)\}$, e : représente le temps écoulé dans l'état s , $\delta_{\text{int}} : S \rightarrow S$ est la fonction de transition interne définissant les changements d'états dus à des événements internes, $\lambda : S \rightarrow Y$ la fonction de sortie, $ta : S \rightarrow \mathbb{R}^+$ est la

fonction durée de vie d'un état du système (ta : fonction d'avancement du temps).

Ainsi, chaque événement interne dans le modèle couplé DEVS (M_{TVS}) met à jour l'état des trois facteurs, permettant de simuler l'évolution continue du rendement en fonction des conditions réelles.

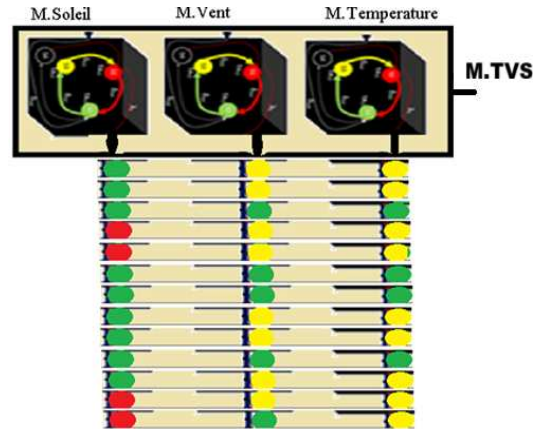


Figure 2: Modèle couplé en fonctionnement

2.3.2 Analyses du modèle atomique DEVS et integration de la logique combinatoire

L'analyse des transitions internes a conduit à l'introduction d'une logique combinatoire afin d'éviter les états incohérents dans les simulations.

La règle fondamentale utilisée est la suivante :

$$S_i \neq S_j$$

Cette contrainte signifie qu'une transition interne valide nécessite au moins une différence entre deux états successifs.

Les tables de vérité ont été utilisées pour éliminer :

- les lignes où tous les états sont actifs simultanément ;
- les lignes où tous les états sont inactifs simultanément

Par conséquent nous obtenons ces tables de vérité, l'équation et le modèle atomique logique ci-dessous.

Tableau 4: table de vérité

Tableau 5: table de vérité pour sélection

Modèle atomique à 3 états (s1, s2, s3)			Ou - exclusif
S1	S2	S3	Matronique (Y)
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	1

Tableau 6: table de vérité pour l'équation

Modèle atomique à 3 états (s1, s2, s3)			Ou - exclusif	Matronique (Y)
S1	S2	S3	Matronique	
0	0	1	1	$\overline{S1.S2.S3}$
0	1	0	1	$\overline{S1.S2.S3}$
1	0	0	1	$\overline{S1.S2.S3}$

Équation 1: Equation du modèle atomique

$$M_{\text{atomique}} = \overline{S1.S2.S3} + \overline{S1.S2.S3} + \overline{S1.S2.S3} = S1\overline{0S2\overline{0S3}}$$

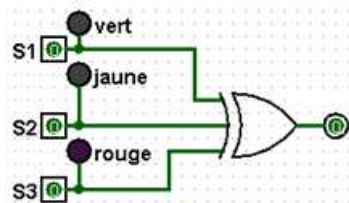


Figure 3: Schéma du modèle atomique

2.3.2 Expérimentation

Appliquons au cas d'étude des systèmes naturels qui influencent le rendement des panneaux solaires photovoltaïques (Doubmbia.N.T & Keita.A.K, 2024), nous obtenons enfin cette table de vérité du modèle couplé des trois facteurs dont le circuit est simulé avec le concept design hiérarchie dans le logiciel de simulation Logisim.

Tableau 7: Table de vérité du modèle couple

Modèles			M _{temp}	M _{vent}	M _{soleil}	M _{TVS}
S1	S2	S3	S1S2S3	S1S2S3	S1S2S3	M _{temp} et M _{vent} et M _{soleil}
0	0	1	1	1	1	$\overline{S1\overline{0S2\overline{0S3}}}$
0	1	0	1	1	1	
1	0	0	1	1	1	
1	0	0	1	1	1	

Le Design hiérarchique de la logique combinatoire permet de gérer des systèmes complexes en utilisant des blocs comme modèles atomiques pour construire des modèles couplés hiérarchiques.

Les Règles pour la simulation du modèle couplé M_{TVS} sont:

- Une ligne est prise en compte uniquement si les trois valeurs sont dans la même catégorie (vert, jaune ou rouge).
- Les lignes mixtes sont ignorées.

Les variables environnementales sont converties en variables logiques afin de permettre une prise de décision autonome.

La fonction logique globale est donnée par :

Rendement = Irradiance.Temperature.Vent

R = G.T.V

où :

- R=1 correspond à un état favorable, et indique la couleur verte ;
- R=0.5 correspond à un état intermédiaire et désigne la couleur jaune;
- R=0 correspond à un état défavorable et impose la couleur rouge.

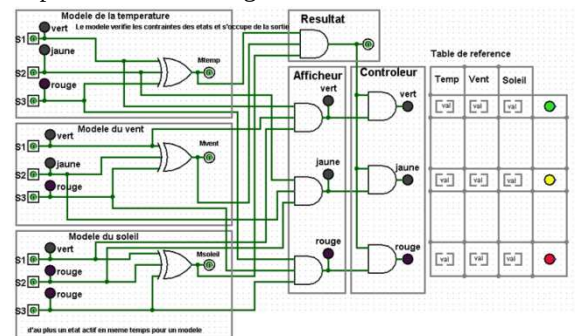


Figure 4: modèle couplé logique

Cette table de vérité et le circuit ci-dessous décrivent le fonctionnement final de ce modèle couple logique.

Tableau 8: table de vérité logique de décision du système

G	T	V	R (état système)	Interprétation	Couleur
1	1	1	1	Favorable	vert
1	1	0	0,5	Intermédiaire	jaune
1	0	1	0,5	Intermédiaire	jaune
0	1	1	0,5	Intermédiaire	jaune
1	0	0	0	Défavorable	rouge
0	1	0	0	Défavorable	rouge
0	0	1	0	Défavorable	rouge
0	0	0	0	Défavorable	rouge

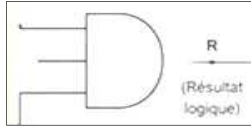


Figure 5: circuit Et

Enfin nous obtenons ce schéma ci dessous pour le modèle couple du système intégrant la logique.

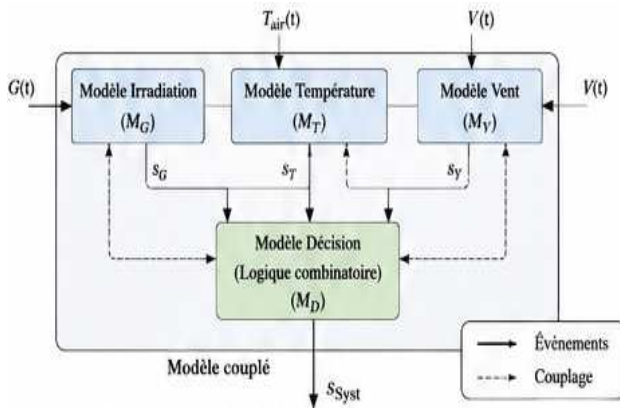


Figure 6: schéma du modèle couple

2.3.3 Simulation et validation

Ce schéma ci-dessous représente l'architecture globale du système, il est composé de 5 blocs.

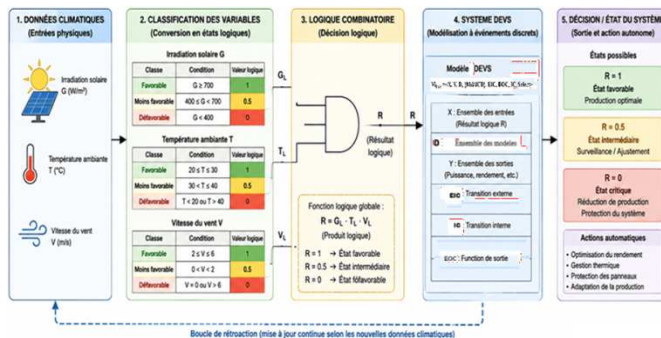


Figure 7: Architecture globale du système

2.3.3.1 Bloc des données climatiques

Ce premier bloc représente les paramètres environnementaux reçus par le système :

- irradiation solaire (G)
- température ambiante (T)
- vitesse du vent (V)

Ces données peuvent provenir :

- de stations météorologiques,
- de capteurs,
- de bases climatiques,
- ou de données simulées.

2.3.3.2 Classification des variables

Cette étape transforme les valeurs physiques en états logiques. Les données météorologiques sont transformées en états logiques grâce à des seuils scientifiques. C'est une opération essentielle car la logique combinatoire ne travaille pas directement avec des grandeurs analogiques.

2.3.3.3 Logique combinatoire

La logique combinatoire constitue le cœur décisionnel du système. Elle combine les états logiques des variables environnementales pour produire une décision automatique. La règle générale utilisée est : $R = G_L \cdot T_L \cdot V_L$

2.3.3.3 Bloc DEVS

Le modèle DEVS reçoit le résultat logique (R) comme événement d'entrée. Le système change alors automatiquement d'état. Le modèle couple M_{TVS} est défini par : (X, Y, D, IC, EOC, EIC, Select)

2.3.3.4 Décision et état du système

Le système prend finalement une décision autonome :

- Si l'état favorable $R = 1$ le système fonctionne normalement, la production est optimale et le rendement l'est aussi.
- Si l'état intermédiaire $R=0.5$ le système active la surveillance et ajustement automatique.
- Si l'état critique $R=0$ le système peut réduire la production et protéger les panneaux afin d'éviter la surchauffe.

Après cette logique des actions automatiques sont possibles telles que : l'optimisation du rendement, la gestion thermique, la protection des panneaux et l'adaptation de la production, cela signifie que le système devient intelligent et autonome.

2.3.3.5 Boucle de rétroaction

Cette flèche en pointillés signifie que :

- le climat change ;
- les données sont mises à jour ;
- la logique est recalculée ;

- le modèle DEVS adapte le système.
- Le processus est donc : dynamique et continu.

2.3.3.6 La plateforme DEVS-Java

Cette plateforme intègre cet architecture globale du système et permet de :

- charger les données expérimentales du terrain (irradiation, température, vent).
- déclencher automatiquement les transitions internes dans le modèle DEVS.
- afficher les résultats en temps réel, comparables aux mesures sur le champ d'expérimentation.



Figure 8: Plateforme DEVS-Java

2.3.3.7 Avantages de cette intégration

Ils sont multiples et varies, le système peut:

- décider tout seul et s'adapter rapide aux variations climatiques ce qui entraine l'optimisation énergétique, l'amélioration du rendement photovoltaïque, la protection des panneaux face aux conditions dangereuses.
- effectuer la simulation, la prévision, et le contrôle intelligent.
- définir un comportement autonome plus fin, en combinant simultanément les états des trois facteurs pour déterminer le rendement.
- réduire la complexité de certaines transitions lorsque plusieurs événements coexistent.
- permettre des décisions locales sans intervention externe, ce qui est utile pour des simulations de grande échelle ou en temps réel.
- d'intégrer la logique de classification des facteurs naturels.

Ainsi, la logique combinatoire ne remplace pas DEVS, mais améliore la réactivité et l'autonomie du modèle.

2.3.3.8 Application aux panneaux photovoltaïques au Mali

Dans le contexte sahélien, l'irradiation solaire est élevée, les températures sont souvent extrêmes et le vent influence fortement le refroidissement.

Cette architecture proposée permet d'analyser les conditions climatiques réelles, de prédire les états du système et d'optimiser la production énergétique photovoltaïque

2.3.3.9 Conclusion

Cette architecture intelligente où :

Climat→Logique combinatoire→DEVS→Decision autonome, le système photovoltaïque devient alors capable:

- d'analyser son environnement ;
- d'évaluer les conditions climatiques ;
- de prendre automatiquement des décisions ;
- d'optimiser son rendement énergétique ;
- de protéger ses composants.

C'est une approche moderne combinant l'énergie solaire, l'intelligence logique et la modélisation DEVS.

III. RÉSULTATS

Tableau 9: Comparaison DEVS pur vs DEVS + logique combinatoire :

Comparaison	Autonomie	Réactivité	Complexité DEVS	Méthode Rendement max
DEVS pur	Élevée	Bonne	Bonne	94 %
DEVS+logique combinatoire	Très bonne	Bonne	Très bonne	96 %

La simulation basée sur les données réelles confirme la capacité de DEVS à reproduire fidèlement le comportement des panneaux, tandis que la logique combinatoire apporte un plus

significatif dans la gestion autonome des états multiples.

Les simulations réalisées montrent que l'intégration de la logique combinatoire améliore l'autonomie des systèmes photovoltaïques modélisés sous DEVS.

Les principaux résultats observés sont :

- Une meilleure adaptation aux variations climatiques ;
- Une amélioration de la représentation dynamique du système ;
- Une réduction des pertes liées aux fortes températures ;
- Une optimisation du rendement énergétique.

Dans les conditions climatiques sahéniennes, les fortes irradiances favorisent la production énergétique tandis que les températures élevées diminuent le rendement des cellules photovoltaïques. L'intégration de la logique combinatoire permet donc au système DEVS de réagir automatiquement aux changements environnementaux.

IV. CONCLUSION

Cette étude a présenté une approche combinant logique combinatoire et formalisme DEVS pour modéliser le comportement autonome des panneaux photovoltaïques.

La classification scientifique des facteurs naturels permet de transformer les données météorologiques en variables logiques exploitables dans la simulation. L'intégration des règles combinatoires améliore la prise de décision autonome ainsi que la représentation dynamique des systèmes photovoltaïques.

Les perspectives futures concernent l'intégration de techniques d'intelligence artificielle, des réseaux de neurones et des systèmes IoT pour optimiser davantage les performances énergétiques.

REMERCIEMENTS

Nous adressons nos sincères remerciements à la Faculté des Sciences et des Technologies du Mali

pour son accompagnement scientifique et académique dans la réalisation de ce travail.

Nous exprimons également notre profonde gratitude aux enseignants, chercheurs et spécialistes des systèmes photovoltaïques et de la modélisation DEVS dont les travaux ont contribué à l'élaboration de cette étude.

Une reconnaissance particulière est accordée aux chercheurs œuvrant dans les domaines des énergies renouvelables, de la simulation des systèmes dynamiques et de la logique combinatoire, pour leurs contributions scientifiques qui ont servi de base théorique à cette recherche.

Nous remercions enfin toutes les personnes ayant participé, de près ou de loin, à la collecte des données climatiques, aux expérimentations et aux échanges scientifiques ayant permis l'aboutissement de cet article.

REFERENCES

- [1] Bernard P. Zeigler, *Theory of Modeling and Simulation*, Academic Press, 2000.
 - [2] Doumbia Niamakolo dit Tiemoko and Keita Abdel Kader, *Modélisation et simulation des systèmes naturels influençant le rendement des panneaux photovoltaïques*, Thèse de Doctorat, Bamako, 2024.
 - [3] Jean-Baptiste Filippi, *Une architecture logicielle pour la multi-modélisation et la simulation à événements discrets de systèmes naturels complexes*, Thèse de Doctorat, 2003.
 - [4] Y.-J. Wang and W.-C. Hsu, "An investigation on partial shading of PV modules with different connection configurations of PV cells," *Energy*, vol. 36, no. 5, pp. 3069–3078, 2011.
 - [5] G. M. Masters, *Renewable and Efficient Electric Power Systems*, Wiley, 2013.
- nal*, vol. 45, pp. 210–220, 2021