

III.1-SCAPS-1D (Solar Cell Capacitance Simulator in one Dimension)

III.1.1 Introduction [35]

-Après nous étudions dans les parties précédentes les notions théoriques sur l'effet photovoltaïque (définition et l'historique) ,nous présentons le spectre et le rayonnement solaire que on a utilisée , Nous décrirons en suite le fonctionnement des cellules photovoltaïques,leurs caractéristiques principales,et les limites du modèle théorique.Puis nous aborderons les cellules photovoltaïques sur couches minces de silicium et nous citons aussi quelques avantages et quelques inconvénients de l'énergie solaires.

- dans la 2^{ème} partie nous étudions les défauts (leurs origines ,leurs types, et ces effets sur le rendement des cellules solaires).nous avons prend en compte uniquement l'effet des impuretés sur la longueur de diffusion des porteurs minoritaires leur influence sur le rendement de conversion.

. Ceci fera l'objet du chapitre III.. Ce chapitre combine des résultats expérimentaux obtenus à partir de la réalisation de cellules photovoltaïques contaminées par des impuretés métalliques et des simulations numériques.

-Dans cette partie nous allons examiner quelque types de cellules solaires a l'aide de l'examineur scaps. nous représentons ce logiciel .nous donnons quelques notions principales pour ce la et nous expliquons par details comment définir et comment simuler une cellule solaire avec ce logiciel.

III.1.2-Définition [35]

SCAPS (Solar Cell Capacitance Simulator) est un logiciel de simulation numérique des cellules solaires unidimensionnelles développé par le département des systèmes électroniques et informatiques (ELIS), à l'université de Gent en Belgique. Plusieurs chercheurs ont contribué au développement de ce logiciel : Alex Niemegeers, Marc Burgelman, Koen Decock, Johan Verschraegen, Stefaan Degraeve [Ref Manuel].

Ce logiciel est disponible gratuitement pour la communauté des recherches photovoltaïques (PV) (Instituts et établissements de recherche). Il fonctionne sur PC sous les systèmes d'exploitation Windows 95, 98, NT, 2000, XP, Vista, Windows 7, Windows 8 et occupe à peu près 50 MB d'espace sur le disque. SCAPS est originellement développé pour les structures de cellules de famille CuInSe₂ et CdTe. Cependant, plusieurs extensions ont amélioré ses

capacités de façon à devenir applicable pour les cellules solaires cristallines (de la famille Si et GaAs), ainsi que les cellules solaires amorphes (a-Si et les micro-morphes Si). Un aperçu de ses principales caractéristiques est donné ci-dessous :

- Jusqu'à 7 couches semi-conductrices.
- Presque tous les paramètres peuvent être introduits avec des variations graduées (en dépendance de la composition et la profondeur de la cellule, ex :
 - Mécanismes de recombinaison : bande-à-bande (directe), Auger, SRH.
 - Les niveaux des défauts : en volume ou à l'interface, en considérant leurs états de charge et la recombinaison à leurs niveaux.
 - Les niveaux des défauts, type de charge : pas de charge (neutre), monovalent (un seul donneur, accepteur), divalent (double donneur, double accepteur, amphotère), multivalent (défini par l'utilisateur).
 - Les niveaux des défauts, distribution énergétique : niveau discret, uniforme, Gauss, sous forme de queue ou bien une combinaison.
 - Les niveaux des défauts, propriété optique : Excitation directe par la lumière est possible (connu par effet de l'impureté photovoltaïque, IPV).
 - Les niveaux des défauts, transitions métastables entre les niveaux.
- Contacts : Travail de sortie du métal ou régime de bande plate ; Propriété optique (Réflexion ou transmission) du filtre.
- Tunneling, inter-bandes (dans la bande de conduction ou dans la bande de valence), tunneling à/ou à partir des états de l'interface.
- Generations: à partir d'un calcul interne ou bien d'un fichier $g(x)$ fourni par l'utilisateur.
- Illumination: plusieurs types de spectre sont disponibles (AM0, AM1.5D, AM1.5G, AM1.5G édition 2, Monochromatique, Blanc, etc.).
- Illumination: du côté p ou n.

Et plusieurs d'autres caractéristiques, plus détaillées dans le manuel du logiciel [35].

III.2-Notions de base

SCAPS est un programme conçu pour fonctionner sous le système Windows, développé par LabWindows/CVI de la national Instruments. SCAPS s'ouvre avec l'icône 'Action Panel'. La fenêtre qui s'ouvre est présentée dans la figure suivante :

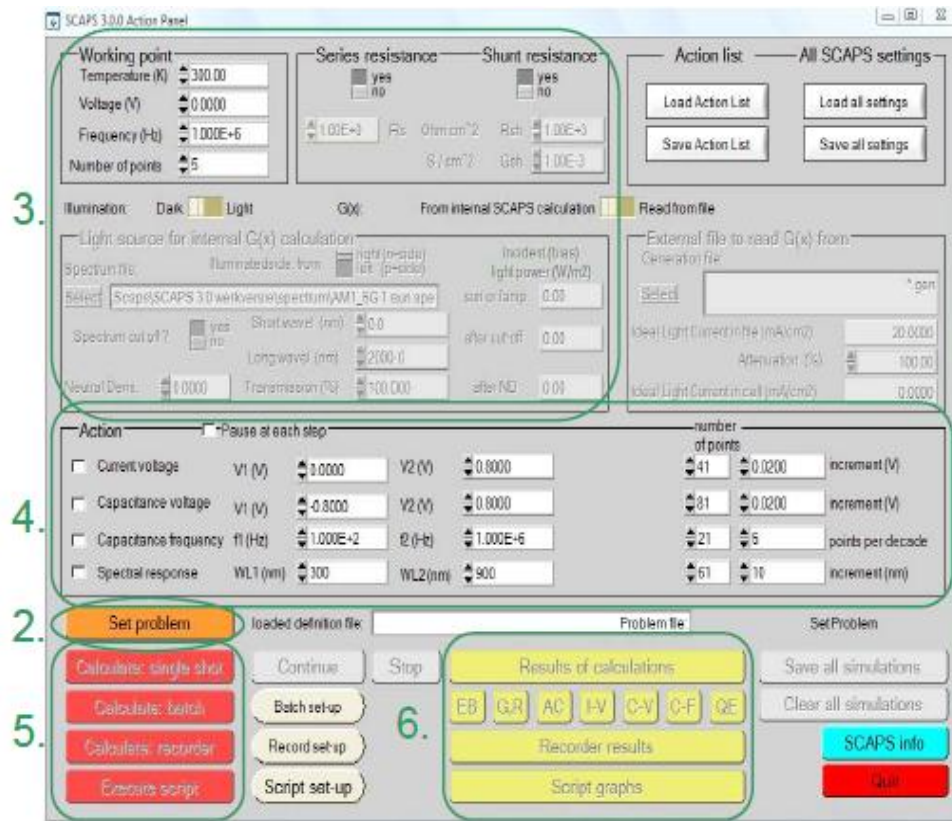


Fig 3.1 Panneau de démarrage de SCAPS, le panneau d'action ou principal.



III.2.1 Lancer SCAPS :

On clique sur l'icône ci-dessus sur le bureau, ou bien double-clique sur le fichier SCAPS3200.EXE dans le gestionnaire de fichiers (ou dans n'importe quelle autre version de SCAPS). SCAPS s'ouvre avec le panneau d'action

III.2.2 Définir le point de fonctionnement.

Le point de fonctionnement spécifie les paramètres qui ne sont pas variables dans les mesures de la simulation, et qui sont relatifs à l'opération de mesure. Ceci implique :

-La température T : Importante pour toutes les mesures. Note : dans SCAPS, seulement les vitesses thermiques, la température de la cellule, ou bien le dispositif photovoltaïque peut être changé manuellement en l'augmentant ou la diminuant jusqu'à la température souhaité.

-Le voltage V : il ne concerne pas les simulations $I-V$ et $C-V$. C'est le voltage de la polarisation DC dans une simulation $C-f$ et SCAPS commence toujours à 0 V, et

s'exécute au voltage du point de fonctionnement par un nombre d'étapes qu'on doit aussi spécifier.

-**La fréquence f** : elle ne concerne pas les simulations $I-V$, et $C-f$. C'est la fréquence dans laquelle la caractéristique $C-V$ est simulée.

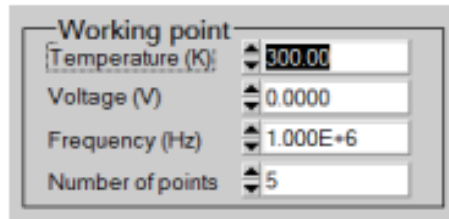


Fig 3.2 Le point de fonctionnement

-**Nombre de point** : le nombre de point utilisé pour tracer les courbes

III.2.3- Résistance série et résistance shunt (parallèle) :

Il suffit de pousser le bouton vers la case "yes" pour activer la résistance série et la résistance shunt. Ils peuvent être augmenté et diminuer manuellement. Ces deux paramètres influent sur la caractéristique $I-V$.

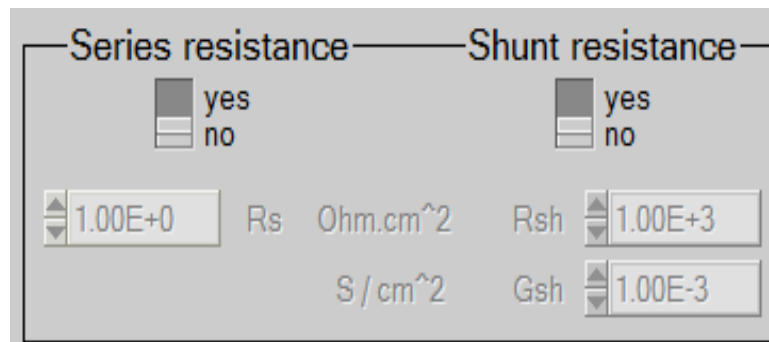


Fig 3.3: bloc de la résistance série et shunt

III.3.4- Light source :

Il suffit de pousser le bouton vers "light" pour activer la source lumineuse

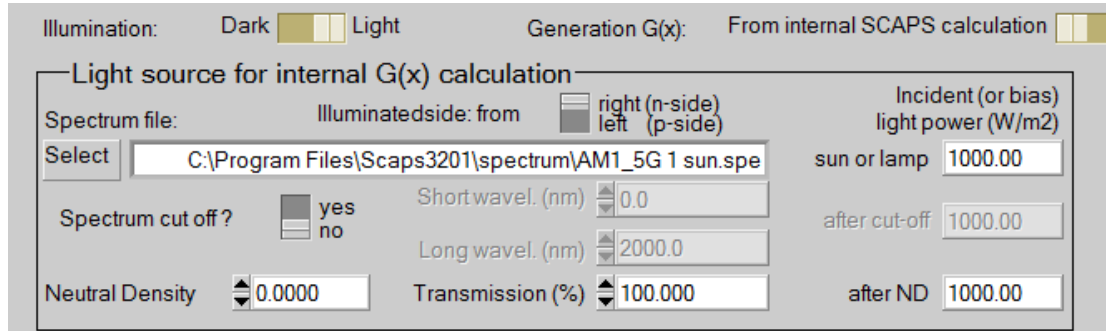


Fig3.4 : Bloc de l'illumination

Ce bloc sert à contrôler les paramètres de l'illumination à travers des champs spécifique à savoir: activation de la source lumineuse, le spectre monochromatique ou polychromatique et les longueurs d'onde y compris solaire etc....

III.2.5-L'illumination:

elle est utilisée dans toutes les mesures. Pour l'illumination : elle est utilisée dans toutes les mesures. Elle détermine les conditions de polarisation de la lumière. Les paramètres de base sont : l'obscurité ou la lumière, le choix du côté illuminé, le choix du spectre. Le spectre d'illumination one Sun (= 1000 w/) avec la masse d'air 1.5 global est le spectre par défaut, mais il existe aussi une large gamme de lumières monochromatiques et de spectres pour plus de simulations personnalisées. S'il y a un simulateur optique, on peut immédiatement charger un profil de génération au lieu d'utiliser un spectre.

III.2.6-Action.

A partir de ce bloc nous pouvons définir les grandeurs afin de les simuler et pour cela il faut cocher devant la grandeur à simuler, car on peut obtenir la caractéristique *IV* (tension du courant), capacitance-tension, capacitance-fréquence et réponse du spectre.

Action	-Pause at each step		number of points		
<input type="checkbox"/> I-V	V1 (V) 0.0000	V2 (V) 0.8000	41	0.0200	increment (V)
<input type="checkbox"/> C-V	V1 (V) -0.8000	V2 (V) 0.8000	81	0.0200	increment (V)
<input type="checkbox"/> C-f	f1 (Hz) 1.000E+2	f2 (Hz) 1.000E+6	21	5	points per decade
<input type="checkbox"/> QE (PCE)	WL1 (nm) 300.00	WL2 (nm) 900.00	61	10.00	increment (nm)

Fig 3.5: Bloc « Action ».

III.2.7-Définir le problème:



On clique sur le bouton SET PROBLEM dans le panneau d'action, et on choisit LOAD dans le coin droit en bas du panneau qui s'ouvre par la suite. On sélectionne et on ouvre (par exemple NUMOS CIGS Baseline.def. Ceci est un fichier exemple d'une cellule solaire à base de CIGS. Par la suite, il est possible de modifier toutes les propriétés de la cellule en cliquant sur 'SET PROBLEM' dans le panneau d'action

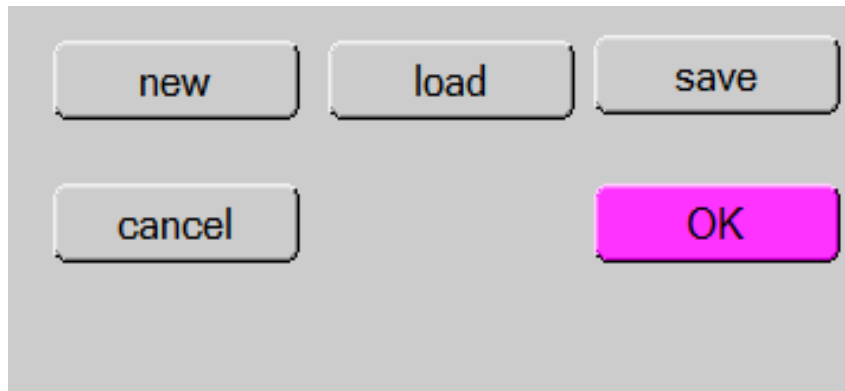


Fig3.6: Set problem

III.2.8-Sélection des caractéristiques à simuler.

Dans la partie Action du panneau action, on peut choisir un ou plusieurs mesures à simuler: *IV*, *C-V*, *C-f* On peut ajuster également, les valeurs initiales et finales de l'argument, ainsi que le nombre des étape

III.2.9-Panneau de définition de la cellule solaire.

On appuyant sur le bouton « set problem » situé dans le panneau d'action, on obtiendra la fenêtre représentée sur la figure IV-13 : nommée panneau de définition d'une cellule solaire ou bien Solar Cell Definition Panel.

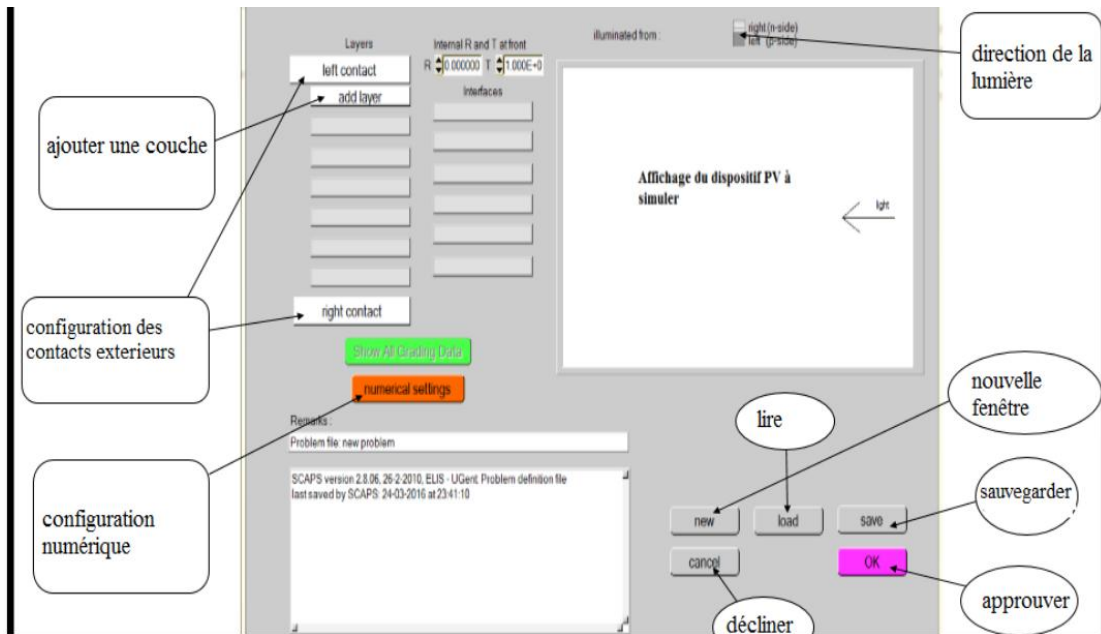


Fig3.6 :

Fig 3.7: Panneau de définition d'une cellule solaire.

- a- **New** : afin crée un nouveau dispositifn photovoltaïque.
- b- **Add a layer** : une fenêtre s'ouvre qui contient des cases à remplir avec des paramètres qui caractérise la couche à étudier, à savoir : le nom de la couche, l'épaisseur, l'énergie de la bande interdite, affinité électronique, permittivité électrique, mobilité, type de dopage, Pour finir on clique sur « Add ».

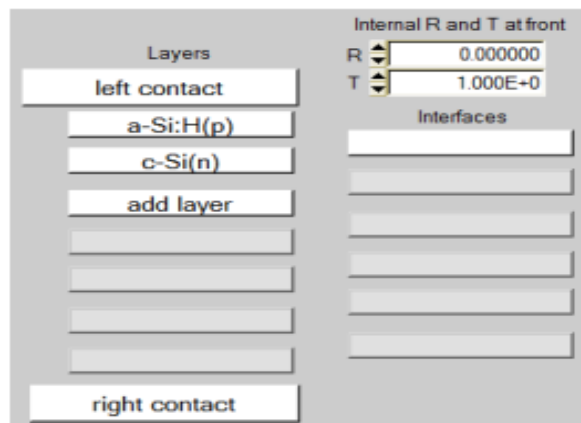


Fig3.8 Définition de la structure d'une cellule solaire

III.2.10-Contacts

Les propriétés des contacts peuvent être introduites soit en cliquant sur le bouton du contact avant ou celui du contact arrière sur le panneau de définition de la cellule. Un panneau des propriétés de contact ‘CONTACT PROPERTIES PANEL’ s’ouvre, comme le montre la fig3.9

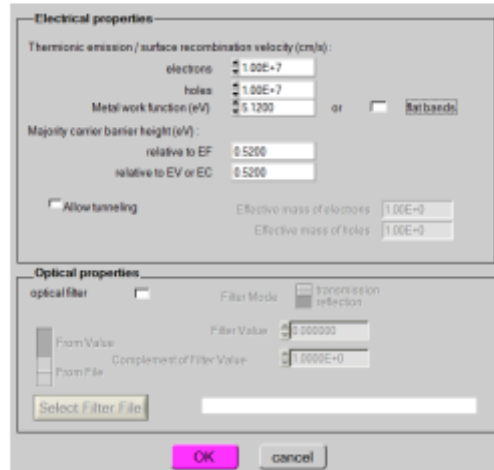


Fig3.9 Panneau des propriétés des contacts.

Les propriétés des contacts, se divisent en propriétés électriques et optiques. Dans les propriétés électriques, on définit :

- Les vitesses de recombinaison surfaciques des électrons et des trous libres. Si le contact a un travail de sortie, ou il est idéal (régime de bande plates).
- La barrière des porteurs majoritaires.
- L’effet tunnel (si on veut en tenir compte).
- Pour les propriétés optiques, on peut définir la transmission ou la réflexion, par une valeur ou un fichier de données.

III.2.11-Définition des couches

En cliquant sur le bouton « add layer », une fenêtre (Fig3.11) s’ouvre qui contient les différents paramètres du matériau à introduire. Ces paramètres peuvent avoir des distributions uniformes ou non uniformes, selon la physique du matériau

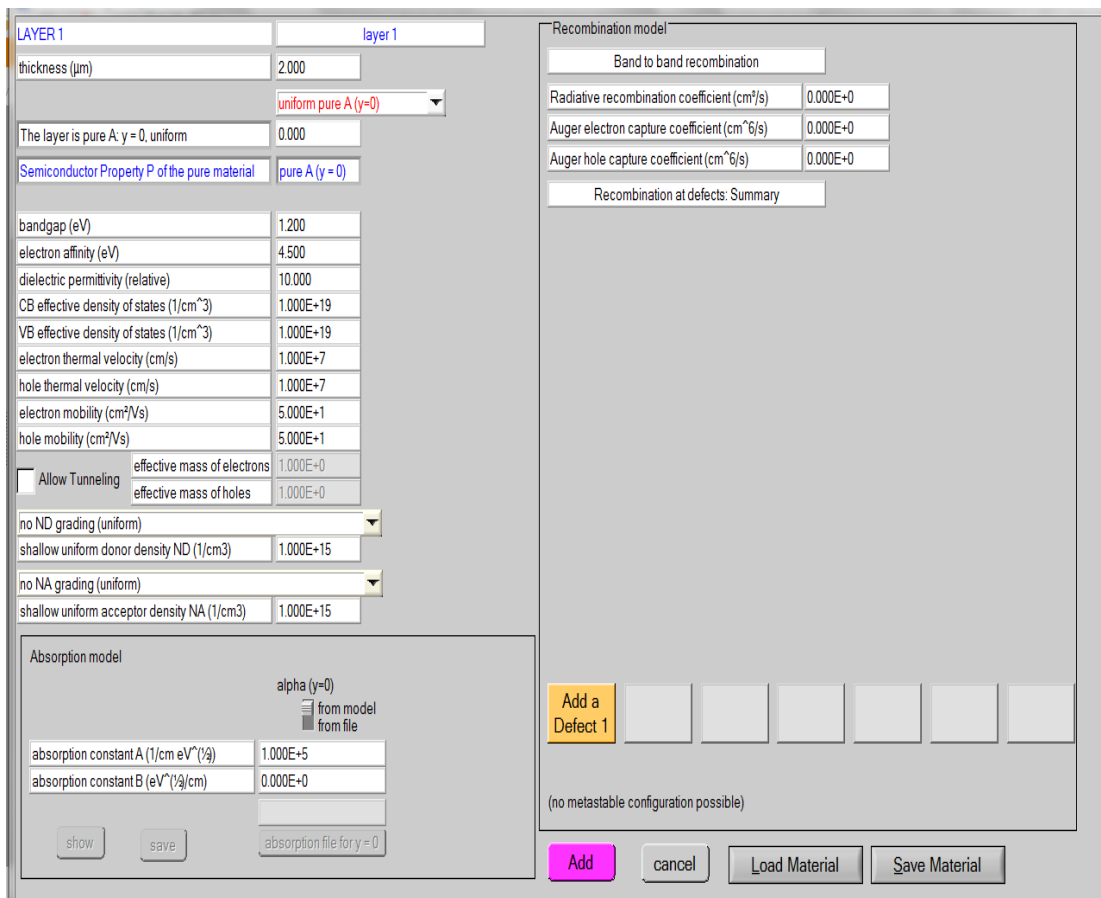


Fig3.9.

Propriétés de la couche ajoutée.

- c- **Right and left contact:** afin de modifier les paramètres des surfaces extérieures gauche et droite de la cellule.
- d- **Save :** afin de sauvegarder la cellule à étudier.
- e- **Load :** afin de sélectionner une cellule déjà sauvegarder.
- f- **Ok:** approuver la cellule construite et revenir au panneau d'action pour finir le travail.
- g- **Cancel:** décliner le panneau de définition et revenir au panneau d'action.

III.2.12- Panneau des bandes d'énergies : (résultats)

Après avoir appuyé sur le bouton « calculate », SCAPS va lancer le calcul et de là apparaîtra le panneau des bandes d'énergies représenté sur la figure IV-15.

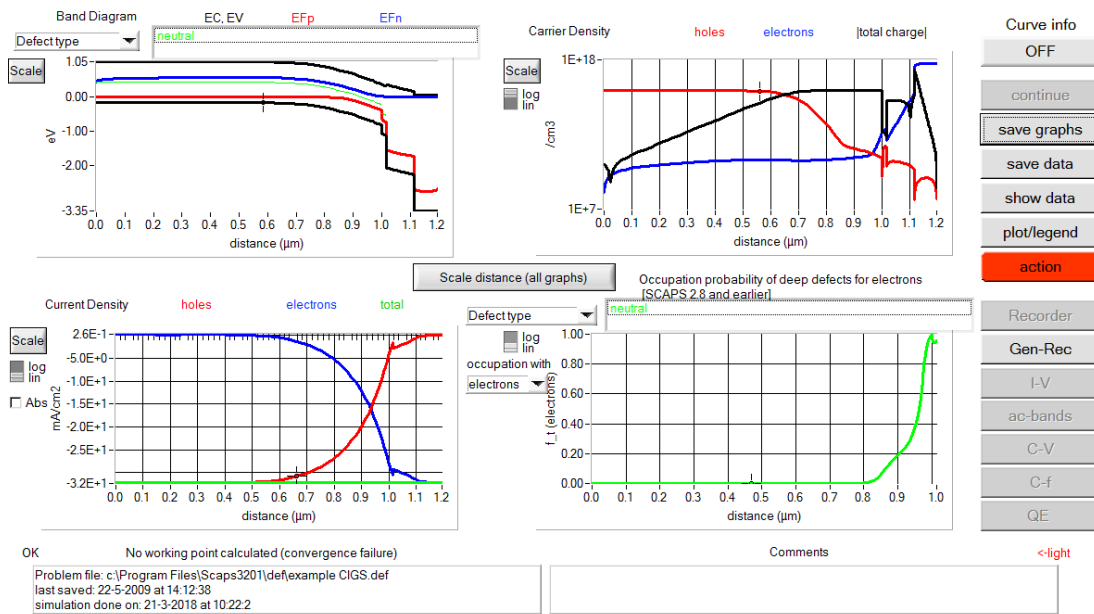


Fig3.11: Panneau des bandes d'énergie.

A partir de ce panneau on peut simuler :

- Caractéristique I - V .
- C - V (capacitance-tension).
- C - f (capacitance-fréquence).
- QE (rendement quantique).

La simulation d'une cellule solaire à l'aide du logiciel SCAPS se résume à :

- Lancer le programme, ouvrir le panneau « action » et régler les paramètres tels que la température.
- Entrer les paramètres des couches de la cellule à simuler dans le panneau de définition.
- Exécuter la simulation et noter les résultats de la simulation.

- Présentation de la cellule ZnO/CdS/CdTe :

La figure III.11: représente la structure obtenue de la cellule à l'aide du logiciel SCAPS-1D. La cellule est composée de l'hétérojonction suivante ZnO/CdS/CdTe.

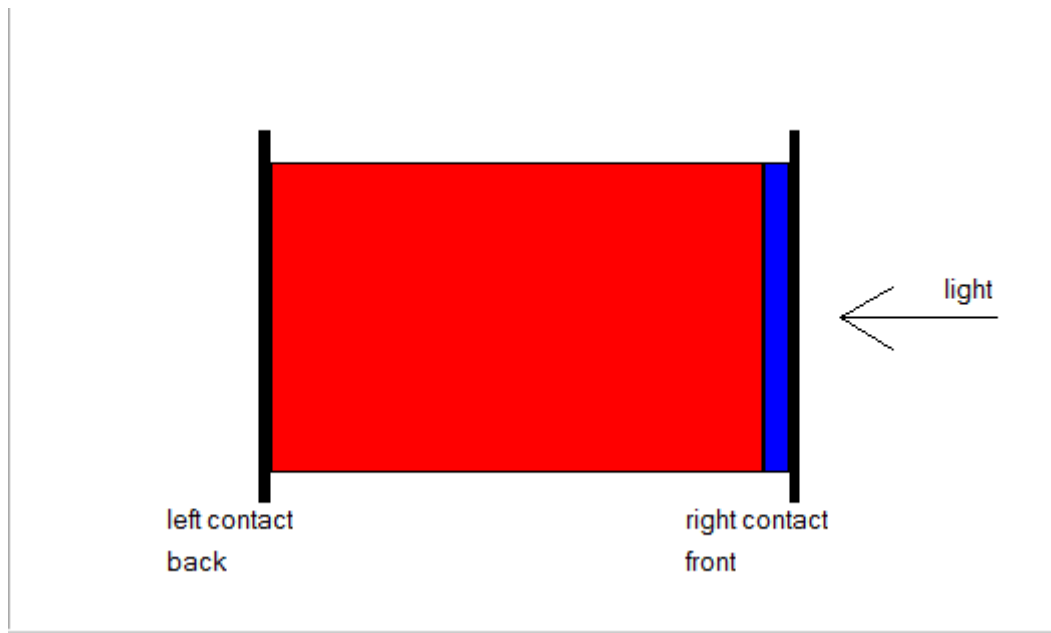


Fig3.12: Schéma de la cellule solaire à simuler.

Lancer le calcul :

Calculate: single shot

III.2.13-Afficher les courbes simulées

Après les calculs, SCAPS passe au panneau de bande d'énergie, présenté dans la fig3.12. Dans ce panneau, on peut voir les diagrammes de bandes, les densités des porteurs libres, la densité du courant ; au dernier point de polarisation. Si on veut afficher les résultats pour des tensions intermédiaires, on utilise le bouton pause dans le panneau d'action. On peut faire apparaître les résultats par les commandes PRINT, SAVE GRAPHS, SHOW, et les valeurs s'affichent par la suite à l'écran. Il est possible de faire du Couper & Coller vers, par ex., Excel, ou sauvegarder les valeurs dans un fichier de données. Vous pouvez basculer vers un de vos panneaux personnalisés (si vous avez toutefois simulé au moins une seule opération de mesure).

Les courbes I-V :

La figure II.5 montre le panneau d'affichage des courbes I-V à l'obscurité et sous éclairage. La couleur de la dernière courbe calculée est indiquée (lorsque le graphe est trop encombré, on clique CLEAR ALL GRAPHS dans le panneau d'action). Les courbes des taux

de recombinaison sont affichées seulement pour la dernière simulation. La couleur de la légende correspond à la couleur de la courbe.

Si CURVE INFO est sur ON et si on clique sur une courbe du graphe, un panneau pop-up apparaîtra, avec des informations concernant le graphe, la courbe ainsi que le point cliqué

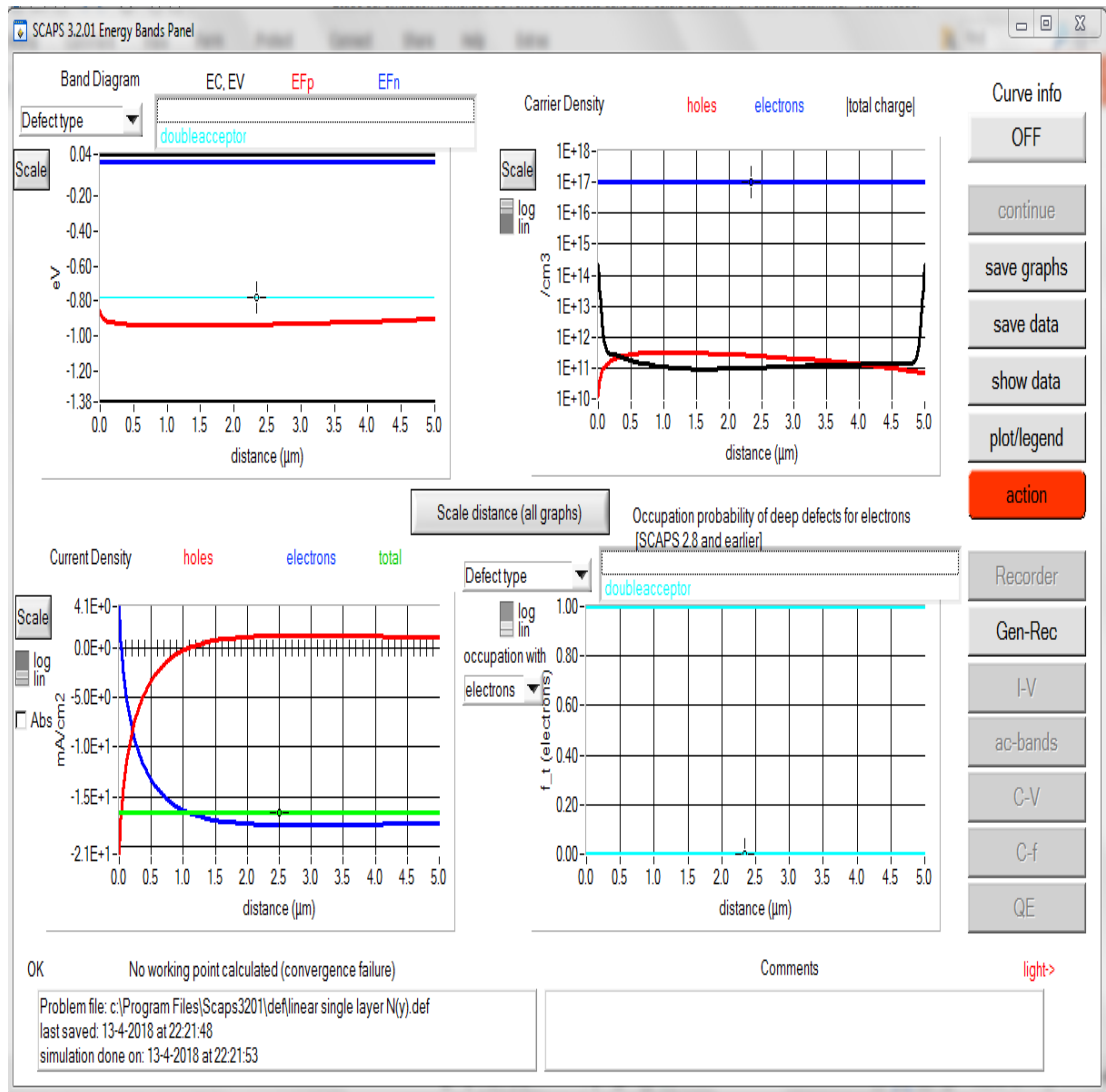


Fig3.13: panneau de bande d'énergie

Le bouton SCALE aide a changer la gamme et l'échelle des axes. Si on appuie sur le bouton CTRL et on sélectionne une aire rectangulaire dans un graphe, celui-ci fera un zoom intérieur (agrandissant) dans la zone sélectionnée. L'appui sur le bouton CTRL accompagné d'un clic donnera un zoom extérieur (Zoom out).

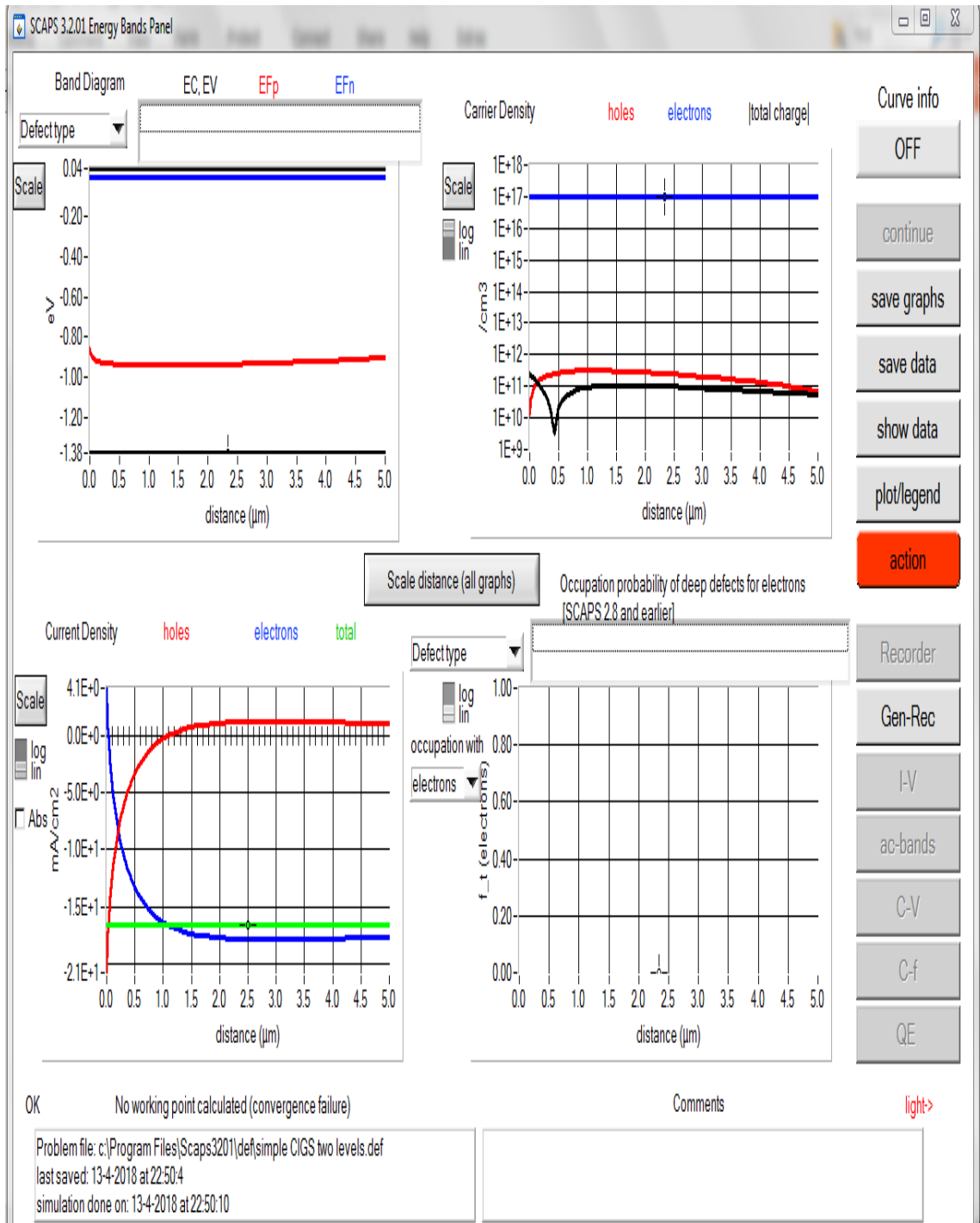


Fig3.14: les courbes I-V

Le bouton SCALE aide a changer la gamme et l'échelle des axes. Si on appuie sur le bouton CTRL et on sélectionne une aire rectangulaire dans un graphe, celui-ci fera un zoom intérieur (agrandissant) dans la zone sélectionnée. L'appui sur le bouton CTRL accompagné d'un clic donnera un zoom extérieur (Zoom out).

III. Analyses de l'effet des défauts sur les propriétés des cellules

Dans cette section nous présentons les résultats relatifs aux simulations de l'effet des défauts cristallographiques sur le comportement de trois types de cellules solaires. Les cellules étudiées sont : cellule en silicium amorphe, CIGS et cellule de type CdTe. On note qu'ils existent plusieurs types de défauts dans la base de données du logiciel SCAPS-1D dont nous avons simulé quelques un (voir sections suivantes). Aussi, le logiciel SCAPS-1D nous offre la possibilité d'y intégrer sept défauts différents à la fois.

III.1 Effet de présence sans défaut

A-Cellule de type a-si(h)

Voc (V)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	eta (%)
1.5521	17.366312	43.04	11.60

B-Cellule en couches minces CIGS

Voc (V)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	eta (%)
0.7404	35.945328	79.69	21.21

C-Cellule en couche minces CdTe

Voc (V)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	eta (%)
1.0455	28.704591	70.01	21.01

III.2 Effet de présence d'un seul défaut

Nous commençons par analyser l'effet d'un seul défaut sur les caractéristiques électriques des trois cellules.

A-Cellule de type a-si(h)

La structure de la cellule simulée est donnée ci-dessous. Nous avons adopté une distribution d'énergie uniforme pour les deux types de défauts étudiés. Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau ci-dessous

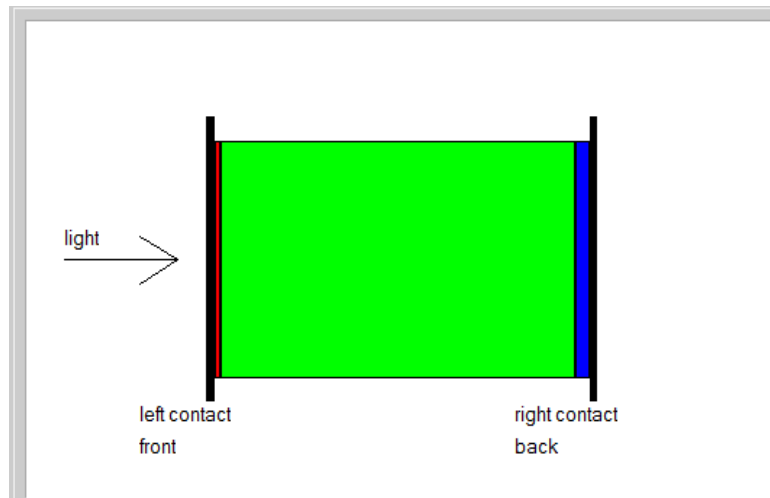


Fig3.15: la structure de la cellule a-si(h)

Cette tableau, représenter l'effet défauts avant de simuler

Voc (V)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	eta (%)
1.5521	17.366376	43.04	11.60

Tab.3.1. Représente les valeurs du Vco, Jsc, FF et du rendement (en absence des défauts)

Face	Type de défaut	Jsc		η (%)	
		Voc (V)	(mA/cm ²)		FF (%)
Face avant	Amphoétrique	1.552	17.366	43.04	11.60
	Donneur	1.552	17.366	43.04	11.60
Face arrière	Amphoétrique	1.356	8.607	41.02	4.86
	Donneur	1.357	8.601	41.03	4.86

Tab.3.2 Effet d'un seul défaut, uniformément distribué, sur la caractéristique de la cellule a-si

(h)

D'après les résultats obtenus, le rendement de la cellule est fortement affecté par les défauts dans la face arrière en comparaison avec les défauts de la face avant. Nous constatons aussi une forte dégradation de tous les paramètres de la cellule en fonction de la répartition des défauts. Ceci peut être expliqué par la forte recombinaison des porteurs de charge avec les centres de défaut dans la face arrière.

En changeant maintenant la distribution de l'énergie du défaut donneur à une distribution gaussienne (près de la bande de conduction) nous obtenons les résultats mentionnés dans le tableau (**Tab.3.3**). Le changement de la distribution de l'énergie du défaut à causer un effet positif par une petite augmentation au niveau de la tension de circuit ouvert ainsi que le rendement de la cellule.

Voc (V)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
1.557	17.367	42.93	11.61

Tab.3.3. Effet d'un seul défaut, avec une distribution gaussienne de l'énergie, sur les caractéristiques de la cellule a-si(h)

B-Cellule en couches minces CIGS

Nous faisons le même travail avec la cellule solaire en couches minces de type CIGS

(Voir figure : fig3.2)

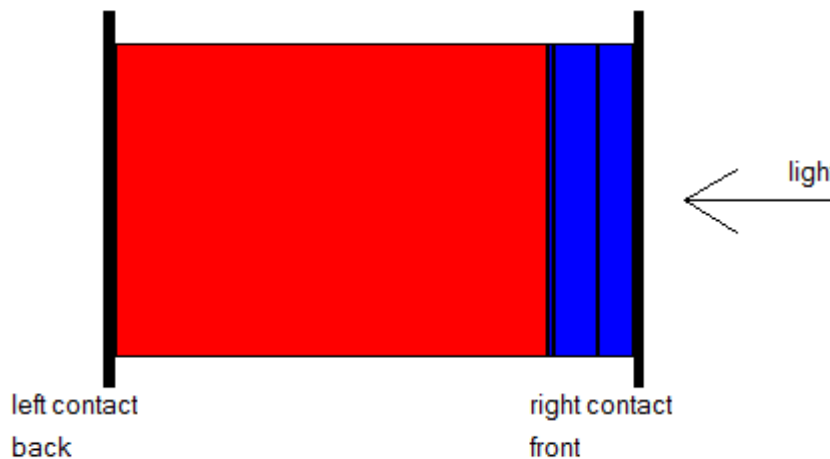


Fig3.16: la structure de la cellule CIGS

Cette tableau, représenter l'effet défauts avant de simuler

Voc (V)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	eta (%)
0.5586	31.654927	61.42	10.86

Tab.3.4. Représente les valeurs du Vco, Jsc, FF et du rendement (en absence des défauts)

Face	Type de défaut	Jsc		η (%)	
		Voc (V)	(mA/cm ²)	FF (%)	
avant	Amphoétrique	0.6197	27.9221	58.31	10.09
	Donneur	0.5368	22.8112	63.43	7.77
arrière	Amphoétrique	0.3193	377.378e-3	48.63	0.06
	Donneur	0.3283	307.08 e-3	55.35	0.06

Tab.3.5. Effet d'un seul défaut, uniformément distribué, sur la caractéristique de la cellule CIGS

Suite aux résultats enregistrés, en comparaison avec la cellule précédente, nous constatons une forte dégradation de tous les paramètres de la cellule du côté face arrière. Cette dégradation devient plus importante lorsque l'énergie des défauts suit une distribution gaussienne. Ceci signifie que les recombinaisons deviennent plus importantes pour ce type de cellule.

Voc (V)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
---------	---------------------------	--------	-------

0.4456	505.75 e-3	56.19	0.15
---------------	-------------------	--------------	-------------

Tab.3.6. Effet d'un seul défaut, avec une distribution gaussienne de l'énergie, sur les caractéristiques de la cellule CIGS

C-Cellule en couche minces CdTe

La cellule simulée est donnée dans la figure (fig3.3). Dans ce cas la dégradation du rendement était importante du côté face avant que la face arrière. Aussi la diminution causée par le défaut donneur est majeure que celle causer par le défaut amphotérique. Pour le cas de la distribution gaussienne de l'énergie, l'effet du défaut donneur reste limité

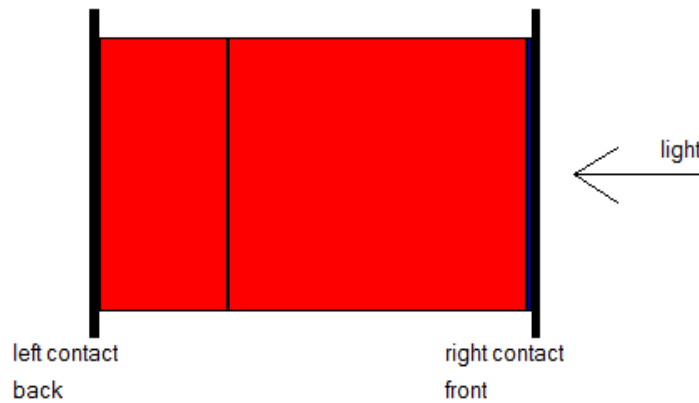


Fig3.17 : la structure de la cellule CdTe

Cette tableau, représenter l'effet défauts avant de simuler

Voc (V) 0.7537	Jsc (mA/cm2) 21.641502	FF (%) 45.01	eta (%) 7.34
--------------------------	----------------------------------	------------------------	------------------------

Tab.3.7. Représente les valeurs du Vco, Jsc, FF et du rendement (en absence des défauts)

Face avant	Type de défaut	Voc (V)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
	Amphoétrique	0.7137	1.294148	34.80	0.40

	Donneur	0.7200	751.23 e-3	46.79	0.25
Face arrière	Amphoétrique	0.9975	24.126102	66.27	15.95
	Donneur	1.0813	23.916325	64.13	16.58

Tab.3.8. Effet d'un seul défaut, uniformément distribué, sur la caractéristique de la cellule CdTe

Voc (V)	Jsc (mA/cm²)	FF (%)	η (%)
1.0813	23.910346	64.13	16.58

Tab.3.9. Effet d'un seul défaut, avec une distribution gaussienne de l'énergie, sur les caractéristiques de la cellule CdTe

III.3 L'effet de deux défauts

Comme pour le cas de d'un seul défaut, nous analysons maintenant l'effet de deux défauts distincts sur les paramètres des trois types de cellules. Les défauts étudiés sont : défaut donneur, accepteur, neutre et amphoétrique avec deux cas différents de leur distribution énergétique.

A-Cellule en couche minces CdTe

Les résultats du tableau ci-dessous montrent que l'influence des défauts donneurs et accepteurs était remarquable sur la face éclairée (face avant) où l'absorption est maximale favorisant par la suite plus de recombinaison à cette interface.

Face avant	2 Type de défauts		Voc (V)	Jsc (mA/cm²)	FF (%)	η (%)
	Donneur	Accepteur	0.7758	2.445872	40.75	0.77
neutre	Amphoétrique	0.7759	2.131152	45.38	0.75	

Face arrière						
	Donneur	Accepteur	1.0055	24.288413	71.75	17.52
	neutre	Amphoétrique	1.0055	24.288412	71.75	17.52

Tab.3.10. Effet d'un 2 défauts, uniformément distribué, sur la caractéristique de la cellule CdTe

B-Cellule en couche mince CIGS

Nous gardons les mêmes dimensions géométriques de la cellule, nous avons obtenus les résultats ci-dessous. Nous constatons que la combinaison des défauts neutres et amphoétrique (uniformément distribués) à beaucoup affecter les paramètres de la cellule (dans la face avant et arrière) en comparaison avec les deux autres types. Avec une distribution gaussienne, dans la face arrière, le rendement et la tension en circuit ouvert ont légèrement changés par rapport à la distribution uniforme.

Face avant	2 Type de défauts		Voc (V)	Jsc (mA/cm²)	FF (%)	η (%)
		Donneur	Accepteur	0.5367	22.800907	63.36
	neutre	Amphoétrique	0.3815	1.182489	44.59	0.20
Face arrière						
	Donneur	Accepteur	0.6192	27.920575	58.30	10.08
	neutre	Amphoétrique	0.5578	31.663057	61.46	10.86

Tab.3.11. Effet d'un 2 défaut, uniformément distribué, sur la caractéristique de la cellule CIGS

Voc (V)	Jsc (mA/cm²)	FF (%)	η (%)
0.6193	27.913081	58.32	10.08

Tab.3.12. Effet d'un 2 défaut, avec une distribution gaussienne de l'énergie, sur les caractéristiques de la cellule CIGS

C-Cellule amorphe a-si(h)

Pour cette cellule, et pour les deux cas de la distribution d'énergie, l'influence des défauts reste toujours importante dans la face arrière.

Face avant	2 Type de défauts		Voc (V)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
		Donneur	Accepteur	1.5521	17.366819	43.04
	Neutre	Amphoétrique	1.5566	17.368234	42.95	11.61
Face arrière	Donneur	Accepteur	1.3575	8.606762	41.62	4.86
	Neutre	Amphoétrique	1.3575	8.606615	41.62	4.86

Tab.3.13. Effet d'un 2 défaut, uniformément distribué, sur la caractéristique de la cellule a-si(h)

III.4 Effet de la présence de trois défauts

Dans cette partie, nous analysons deux cas différents de la présence de trois défauts à la fois. Ces défauts sont neutres, accepteurs, double accepteurs, donneurs, double donneurs et Amphoétrique.

A-Cellule en couches minces CIGS

D'après les résultats enregistrés, la présence des défauts : neutres, doubles donneurs et doubles accepteurs dans la face avant a beaucoup influencer le rendement de la cellule par rapport aux défauts donneur, accepteur et amphoétrique. Aussi lorsque ces défauts suivent une distribution gaussienne (tableau Tab3.14), leur effet reste plus au moins important.

Face avant	3 Type de défauts			Voc (V)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
		Donneur	Accepteur	Amphoétrique	0.5365	22.785995	63.28
	Neutre			0.3811	1.192557	44.66	0.20

Face arrière		2Donn eur	2Accep teur				
	Donneu r	Accep teur	Ampho étrique	0.6510	31.651111	47.96	9.88
	Neutre	2Donn eur	2Accep teur	0.6572	31.668721	61.48	10.95

Tab.3.14. Effet d'un 3 défauts, uniformément distribué, sur la caractéristique de la cellule CIGS

	Jsc		η (%)
Voc (V)	(mA/cm²)	FF (%)	
0.5571	31.669864	61.50	10.85

Tab.3.15. Effet d'un 3 défauts, avec une distribution gaussienne de l'énergie, sur les caractéristiques de la cellule CIGS

B-Cellule en couches minces CdTe

Par rapport à la cellule CIGS, la présence des défauts a causé une forte diminution du rendement de conversion surtout du côté face avant. De plus, lorsque les défauts neutres, doubles accepteurs et doubles donneurs ont une distribution d'énergie gaussienne, près de la bande conduction (Tab3.16)

Face avant	3 Type de défauts			Voc(V)	Jsc(mA/cm²)	FF (%)	η (%)
	Donneur	Accepte ur	Ampho étrique	0.5455	230.682e-3	26.07	0.03
	Neutre	2Donne ur	2Accep teur	0.5115	123.936e-3	39.94	0.03
Face arrière	Donneur	Accepte ur	Ampho étrique	0.4118	69.172e-3	38.79	0.01

	Neutre	2Donneur	2Accepteur	0.7159	9.695970	19.94	1.38
--	---------------	-----------------	-------------------	---------------	-----------------	--------------	-------------

Tab.3.16. Effet d'un 3 défauts, uniformément distribué, sur la caractéristique de la cellule CdTe

Voc (V)	Jsc (mA/cm²)	FF (%)	η (%)
0.7038	31.194790	38.04	8.35

Tab.3.17. Effet d'un 3 défauts, avec une distribution gaussienne de l'énergie, sur les caractéristiques de la cellule CdTe

C- Cellule amorphe a-si(h)

Par rapport aux cellules CdTe et CIGS, la simulation de l'effet de trois défauts sur les paramètres de la cellule amorphe été plus au moins réduit sur la face avant, soumise à l'éclairement, en comparaison avec la face arrière

Face avant	3 Type de défauts			Voc (V)	Jsc (mA/cm²)	FF (%)	η (%)
	Donneur	Accepteur	Amphoé trique	1.5521	17.365770	43.01	11.60
	Neutre	2Donneur	2Accepteur	1.5558	17.364561	41.97	11.61
Face arrière	Donneur	Accepteur	Amphoé trique	1.3579	8.613800	41.61	4.87
	Neutre	2Donneur	2Accepteur	1.3579	8.613651	41.61	4.87

Tab.3.18. Effet d'un 3 défauts, uniformément distribué, sur la caractéristique de la cellule a-si(h)

Voc (V)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
1.5558	17.368605	42.97	11.61

Tab.3.19. Effet d'un 3 défauts, avec une distribution gaussienne de l'énergie, sur les caractéristiques de la cellule a-si(h)

III.5 effet de quatre défauts

A- Cellule amorphe a-si(h)

L'analyse du comportement de la cellule, sous l'effet de la présence de quatre défauts est effectuée selon le tableau ci-dessous. Pour les deux faces de la cellule, nous avons constaté que leur effet sur les paramètres électriques était similaire que dans le cas de trois défauts. Aussi, le changement de la distribution d'énergie des quatre défauts, a causé un faible changement du de la densité de courant et du facteur de forme. Donc un effet limité.

	4 Type de défauts		Voc (V)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
	Face avant	Amphoétrique	Accepteur	1.5521	17.366376	43.03
Neutre		Donneur				
Face arrière	Amphoétrique	Accepteur	1.35521	8.607043	41.62	4.86
	Neutre	Donneur				

Tab.3.10. Effet d'un 4 défauts, uniformément distribué, sur la caractéristique de la cellule a-si(h)

Voc (V)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
1.5521	17.366940	43.40	11.60

Tab.3.20. Effet d'un 4 défauts, avec une distribution gaussienne de l'énergie, sur les caractéristiques de la cellule a-si(h)

B- Cellule en couches minces CdTe

Sous l'effet des quatre défauts une atténuation importante du rendement de conversion, a été enregistrée sur la face avant. Sur la face arrière, on a constaté une amélioration du rendement. Ceci peut être expliqué par un surplus de porteurs de charges générés par les niveaux donneurs et accepteurs.

	4 Type de défauts		Voc (V)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
	Face avant	Amphoétrique	Accepteur	0.7039	1.156819	68.40
Neutre		Donneur				
Face arrière	Amphoétrique	Accepteur	0.8542	21.733548	71.60	13.29
	Neutre	Donneur				

Tab.3.21. Effet d'un 4 défaut, uniformément distribué, sur la caractéristique de la cellule CdTe

Voc (V)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
0.8542	21.723560	71.63	13.29

Tab.3.22. Effet d'un 4 défauts, avec une distribution gaussienne de l'énergie, sur les caractéristiques de la cellule CdTe

3- Cellule en couches minces CIGS

De même pour que pour la cellule précédente, une atténuation totale des paramètres électrique est obtenu.

	4 Type de défauts		Voc (V)	Jsc (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)

Face avant	Amphoétrique	Accepteur	0.3811	1.193024	44.65	0.20
	Neutre	Donneur				
Face arrière	Amphoétrique	Accepteur	0.5571	31.669399	61.65	10.85
	Neutre	Donneur				

Tab.3.23. Effet d'un 4 défauts, uniformément distribué, sur la caractéristique de la cellule CIGS

Voc (V)	Jsc (mA/cm²)	FF (%)	η (%)
0.5571	31.694294	61.48	10.86

Tab.3.24. Effet d'un 4 défauts, avec une distribution gaussienne de l'énergie, sur les caractéristiques de la cellule CIGS