

## Conclusion générale

En seulement quelques décennies, le solaire photovoltaïque a fait la moitié du chemin entre ses débuts modestes et sa débouché vers la production d'électricité, en complément des sources classiques (fossiles et nucléaires). Il franchit cette étape avec un dynamisme remarquable qu'il faut encourager. Actuellement, et même s'il apparaît plus limité quantitativement dans certains pays, il pourrait bien nous surprendre dans les années à venir, puisqu'il a joué et il jouera un rôle primordial dans l'avancée vers les sources d'énergies nouvelles.

En effet, l'électricité photovoltaïque représente une énergie inépuisable puisqu'elle est directement générée à partir du soleil. Son développement est une réponse nécessaire aux questions énergétiques actuelles.

Dans le tableau suivant, nous projetons les capacités installées et la production mondiale d'électricité photovoltaïque (TWh) sur la base d'une productivité solaire moyenne de 1250kWh/kWp.an et une croissance des ventes annuelles variables, de 30% jusqu'en 2000, puis 45% jusqu'en 2005, suivi d'une diminution graduelle de 2010 à 2050.

Année	Croissance	MW	MW	TWh / an	
		Installé par an	Cum instal	Product PV	PV / Elect
1980	20%	3	7	0,008	0,00%
1985	43%	19	70	0,088	0,00%
1990	19%	46	235	0,294	0,00%
1995	11%	78	551	0,688	0,01%
2000	29%	278	1 399	1,749	0,01%
2005	45%	1 808	6 185	7,732	0,05%
2010	30%	10 511	36 796	45,994	0,25%
2015	25%	37 527	158 868	198,585	0,99%
2020	15%	105 362	534 691	668,364	3,03%
2025	10%	202 708	1 342 431	1 678,038	6,90%
2030	5%	311 623	2 688 897	3 361,121	12,51%
2035	0%	378 780	4 477 969	5 597,462	18,87%
2040	-5%	359 841	6 352 931	7 941,164	24,25%
2045	-10%	263 784	7 884 933	9 856,166	27,26%
2050	-15%	147 108	8 848 477	11 060,597	27,71%

*Projection de la production mondiale d'électricité photovoltaïque  
(source : A. Ricaud, Cythelia, 2009)*

Le résultat est surprenant : bien que non mesurable aujourd'hui, la contribution du photovoltaïque devient significative à partir de 2025 où et pourrait atteindre 28% en 2050.

Il est évident que ces projections ne pourront voir le jour qu'avec une forte contribution à la réduction des prix de production de l'électricité d'origine photovoltaïque. Les thèmes de recherche dans ce domaine s'orientent donc, dans deux directions complémentaires : l'augmentation du rendement de conversion et la diminution des coûts de production.

Dans ce mémoire, il a été question de pointer au doigt la formation de l'émetteur dans le processus de fabrication des cellules solaires photovoltaïque, étape primordiale dans ce processus et dont le rendement de la cellule est directement lié, puisque, c'est à partir de là que se fait la collecte des porteurs de charges.

Dans ce contexte, cette étape est elle aussi, liée à la formation de l'émetteur par diffusion de phosphore. C'est aujourd'hui le principal dopant, ses mécanismes de diffusion sont bien connus mais pas complètement maîtrisés.

En ce qui concerne l'étude de la diffusion, en général, ses mécanismes élémentaires sont traduits à partir des lois de Fick. Leurs résolutions permettent de déterminer la distribution des impuretés en fonction du temps. Ceci nous a permis de tracer un profil de diffusion du phosphore au sein du silicium cristallin. Ce profil caractérise la distribution du dopant dans l'émetteur. Cette distribution est décrite mathématiquement par une fonction erreur complémentaire dans une première étape et par une redistribution gaussienne dans une seconde étape. Cette analyse est déduite à partir de la résolution des équations de Fick, et en prenant en considération certaines conditions expérimentales.

Afin de tester l'affinité de cette résolution, on a procédé par modélisation du phénomène de diffusion du phosphore dans le silicium cristallin, en utilisant en premier lieu Matlab pour la résolution des équations de diffusion et pouvoir tracer ainsi un profil de distribution des impuretés.

La démarche est mieux conçue en utilisant d'autres moyens d'analyse numérique et de simulation. Pour cela, les logiciels de simulation des procédés de fabrication doivent combiner à la fois la connaissance des phénomènes physiques intervenant dans les étapes technologiques, les algorithmes avancés de maillage et les solveurs performants indispensables pour ce type d'outils. L'élaboration de modèles physiques dans le domaine de la fabrication photovoltaïque est devenue la clé du développement et de cette filière ceci avec l'amélioration des outils de simulation technologique. Ces modèles doivent décrire l'ensemble des étapes de fabrication des composants.

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés à la simulation de la diffusion du phosphore par le simulateur Silvaco. La modélisation du profil de dopant consiste donc à prédire la distribution du dopant phosphore dans l'émetteur de la cellule solaire.

Cependant, le phosphore comme dopants usuel dans le silicium, qui est stable lorsqu'il se trouve en position substitutionnelle, ne diffuse pas en tant qu'espèce isolée. Pour se déplacer, il requiert l'assistance des défauts ponctuels, avec lesquels il forme des paires dopants-défauts. En conséquence, le coefficient de diffusion du dopant sera fonction de la concentration locale de défauts ponctuels.

Les résultats acquis en simulation ont conduit à initier une réflexion sur l'influence des paramètres de la diffusion sur les caractéristiques électriques des cellules solaires, notamment le temps et la température de diffusion. Ceci est en relation directe avec la profondeur de la jonction formée.

Les profils obtenus par simulation nous ont permis de bien décrire l'évolution du phosphore dans le silicium. Il a été en outre démontré que la diffusion de ce dopant dans l'émetteur est bien régie par une fonction erreur complémentaire pendant l'étape de pré-dépôt, et une gaussienne pendant l'étape de redistribution des impuretés « drive-in ». L'aspect quantitatif des résultats de la simulation par Silvaco, nous a permis d'autre part, de valider le caractère prédictif de l'effet des changements des paramètres de la diffusion sur les caractéristiques électriques de la cellule solaire.

En perspective, de cette étude reste bien évidemment la confrontation avec des résultats issus de l'expérimentation, pour valider la rugosité des résultats obtenus par simulation. En effet, le contrôle de la diffusion du phosphore par la variation des paramètres est un bon moyen pour améliorer la qualité des émetteurs. Ceci permet, entre autre de voir de plus près l'influence du taux de l'oxygène injecté pendant l'étape de diffusion du  $\text{POCl}_3$ , ce qui conduit à la formation d'une couche de  $\text{SiO}_2$  sur l'émetteur, et une variation du rendement de la cellule solaire de 2.8% en absolu.