

Les variations dans le temps de la production éolienne et photovoltaïque sont un problème dans le sens où leur origine météorologique n'est pas maîtrisable et que pour être utile elles doivent être mises en face d'une consommation électrique qui n'est pas complètement maîtrisable non plus. On peut bien évidemment ajuster une production donnée par un niveau de vent pour l'éolien et par une irradiation solaire pour le photovoltaïque mais seulement à la baisse ce qui est utile mais limité.

Il est important tout de même de comprendre la différence de nature entre la variabilité de la production photovoltaïque et celle de la production éolienne. Pour le photovoltaïque c'est d'un côté la course du soleil parfaitement prédictible et la présence possible de nuage qui l'est moins qui sont à l'origine de variations de production. Pour l'éolien c'est d'abord la variation de vent qui est en cause. Mais c'est aussi la nature non linéaire de la courbe de puissance qui amplifie les variations du vent le plus souvent. En effet lorsque le vent passe de 5m/s à 10m/s la production peut être multipliée par presque 10 alors que pour des vents plus forts elle n'est presque pas modifiée. C'est ce qu'illustre ce graphique qui donne la courbe de puissance d'une éolienne de 2MW c'est-à-dire la relation entre la vitesse du vent à la hauteur de nacelle et la production de l'éolienne. Cette courbe est donnée par le constructeur et reflète dans le domaine non linéaire une production électrique donnée par la vitesse du vent au cube.

Du fait de cette nature météorologique, dans le cas de l'éolien comme dans le cas du photovoltaïque, ces variations ont deux propriétés fondamentales.

D'un côté elles sont en partie décorréées en deux points de l'espace, autrement dit une production basse sur un site peut être compensée par une production plus haute sur un autre site distant. Cette compensation des fluctuations à grande échelle est ce que l'on appelle le foisonnement. Cela implique que les niveaux de variations seront très différents si l'on considère la production d'un pays entier ou seulement la production d'une centrale.

De l'autre côté ces variations ont lieu à plusieurs échelles de temps différentes qu'il est nécessaire de savoir distinguer. Des échelles de temps très courtes de quelques secondes avec par exemple le passage de nuage sur une centrale photovoltaïque, des échelles de temps de quelques heures comme celles causées par l'arrivée d'une perturbation météorologique, des variations journalières comme celles dues à la course du soleil, des variations saisonnières amenant une différence de production notable par exemple entre l'hiver et l'été et les variations annuelles qui font que l'énergie produite ne sera pas la même d'une année à l'autre.

La production photovoltaïque est très sensible aux variations d'irradiation et en particulier de l'irradiation directe c'est-à-dire celle reçue des rayons directs du soleil. On peut voir sur ce graphique les variations de la production d'une centrale photovoltaïque de 40 kW crête une journée d'octobre à 2 échelles de temps différentes. La production est exprimée en kW avec une valeur toutes les 5 secondes.

Sur la partie gauche du graphique vous pouvez voir l'évolution de la production le long d'une journée. Du fait de la course du soleil le long de la journée, la courbe a une forme de cloche. Dans l'après midi des variations plus importantes sont causées par des passages nuageux.

Sur la partie droite du graphique vous pouvez voir l'évolution de la production dans une période de 10 minutes dans le milieu de l'après midi de la même journée. On peut voir sur ce graphique qu'en

moins d'une demi-minute la production de la centrale peut diminuer de moitié et ce de manière peu prédictible.

Ces variations intra-horaires de la production photovoltaïque sont un problème à l'échelle d'une centrale mais à l'échelle d'une région ou d'un pays ces variations disparaissent. En effet l'arrivée subite d'un nuage ne provoque pas une variation simultanément sur toutes les centrales d'une région. On parle du foisonnement de la production.

Sur ce graphique vous pouvez voir les variations de la production d'une centrale éolienne de 8 MW sur une semaine.

Les variations de cette production à une échelle de temps intra-horaire sont bien moins importantes que pour le photovoltaïque d'une part parce que les variations du vent sont moins violentes que celles du soleil mais aussi parce que l'éolienne agit comme un filtre mécanique vis-à-vis des variations du vent et atténue de ce fait ces variations.

Concernant l'éolien les phénomènes les plus préoccupants vis-à-vis du système électrique à l'échelle d'un pays sont :

Premièrement la variabilité importante de la production globale que l'on peut avoir à l'échelle de temps de quelques heures lors du changement de systèmes météorologiques. C'est alors la rapidité du changement qui doit être compensée à l'échelle du pays qui est un problème

Deuxièmement la succession de jours avec une production réduite à l'échelle du pays. En effet il peut exister dans des conditions météorologiques très particulières plusieurs journées consécutives pour lesquelles le vent ne souffle dans presque aucune région de France. Dans ces cas de figure même si la production éolienne du pays n'est jamais tout à fait nulle la consommation électrique ne peut pas être diminuée pendant quelques jours et il s'agit aussi de trouver des solutions alternatives de production.

Pour ces variations à des échelles de temps allant de quelques minutes à plusieurs jours il existe plusieurs solutions.

La première solution est la gestion de la demande électrique. Ses principales formes sont déjà pratiquées depuis longtemps. On peut ici en mentionner deux. D'une part la gestion de la demande industrielle qui peut prendre la forme du décalage dans le temps du démarrage d'un processus industriel ou de sa mise en veille. D'autre part le choix de la période d'utilisation des chauffe-eau électriques qui est aujourd'hui dirigé pour accommoder la consommation électrique à la production des centrales nucléaires. On peut aussi penser à adapter la charge de futurs véhicules électriques à la production.

La deuxième solution est le stockage de l'électricité. Il existe pour ce faire plusieurs solutions, nous n'en mentionnons que les principales. D'une part le stockage hydraulique avec les STEP dont nous avons déjà parlé, ensuite le stockage sous forme d'air comprimé dans des grandes cavités ou en mer et enfin le stockage électrochimique comme l'utilisation de batteries lithium ion dont le coût baisse aujourd'hui.

La troisième solution est la régulation de la production à la baisse. En effet si l'on ne peut jamais produire plus que ce que le vent et le soleil nous offrent on peut facilement choisir de produire moins en coupant une partie de la production. Pour les éoliennes par exemple il s'agit d'un bridage mécanique. Ce type de régulation peut être utile en permettant d'atténuer des variations de puissance mais aussi il permet d'atteindre des niveaux de pénétration élevés en évitant des surinvestissements dans des moyens de stockage coûteux.

Enfin la dernière famille de solution est la combinaison avec d'autres moyens de production. Il peut s'agir d'autres centrales du même type différemment localisées, c'est le foisonnement. Mais il peut s'agir aussi plus simplement de centrales conventionnelles. On peut aussi ici penser à la production de chaleur pour les réseaux de chaleur

Bien évidemment aucune de ces solutions ne doit être a priori considérée comme la seule ou la meilleure solution mais c'est une combinaison bien choisie de ces différentes solutions qui est requise.

Les phénomènes saisonniers sont assez faciles à caractériser et ne sont pas sans conséquences, ces deux graphiques montrent respectivement la production éolienne française et la production photovoltaïque. En gris sont donnés les niveaux de production horaires et en rose les moyennes mensuelles. Il faut alors faire deux constats :

Le premier est que la variation de la production photovoltaïque à l'échelle d'une année est beaucoup plus importante et préjudiciable que celle de la production éolienne. En effet la production d'un mois d'hiver est en moyenne 4 fois moins importante que la production d'un mois d'été.

La deuxième est que pour l'éolien ces variations sont moins grandes et en opposition de phase, la production étant un peu plus grande en hiver qu'en été même si ces variations sont moins régulières et moins prédictibles.

Nous allons maintenant décrire ces variations annuelles et les variations d'une année sur l'autre, dites inter-annuelles, de la production avec une approche plus quantitative. Nous commençons ici par la production photovoltaïque.

Nous avons utilisé des simulations météorologiques pour simuler la production de la France sur 7 années consécutives mois par mois. Ces simulations ont été calibrées sur des mesures réelles. A partir de cette simulation nous pouvons décomposer la production Française en trois parties qui sont données sur la formule ci-dessous et représentées sur le graphique en pourcentage de puissances installées au cours du temps.

La première partie de l'équation représentée par un trait rouge dans un cadre bleu sur le graphique correspond à la production moyenne annuelle. On peut voir que cette moyenne annuelle varie très peu d'une année sur l'autre et est d'environ 12 pourcents de la capacité installée.

La deuxième partie de l'équation représentée en gris sur le graphique est une partie périodique qui se répète à l'identique chaque année sous la forme d'une sinusoïde de période un an. On peut voir que l'amplitude de cette sinusoïde est de 8,5% et qu'elle a un minimum à la mi-décembre probablement autour du solstice d'hiver et un maximum mi-juin lors du solstice d'été.

La dernière partie de l'équation est une partie résiduelle qui est relativement aléatoire. Cette partie résiduelle est représentée sur le graphique du bas.

Nous appliquons maintenant la même décomposition pour la production éolienne Française sur une période plus longue de 30 ans.

De même que dans le transparent précédent, la première partie de l'équation représentée en rouge sur le graphique correspond à la production moyenne annuelle. On peut voir que cette moyenne annuelle varie un peu plus d'une année sur l'autre que dans le cas du photovoltaïque et est en moyenne deux fois plus élevée, autour de 24 pourcents de la capacité installée.

La deuxième partie de l'équation représentée en gris sur le graphique est une partie périodique qui se répète à l'identique chaque année sous la forme d'une sinusoïde de période un an. On peut voir que l'amplitude de cette sinusoïde est de 7,2% et qu'elle est à peu près en opposition de phase avec la partie périodique de la production photovoltaïque avec un minimum à la fin juin et un maximum fin décembre.

La dernière partie de l'équation est une partie résiduelle qui est relativement aléatoire. Cette partie résiduelle est représentée sur le graphique du bas.

Synthétisons maintenant les différences et les points communs de ces variations annuelles et interannuelles en comparant l'éolien et le photovoltaïque. Dans ce tableau nous avons rassemblé la moyenne et l'écart type des trois parties de la décomposition présentée dans les deux transparents précédents. Ce sont les 3 premiers indicateurs présentés dans le tableau. Puis nous donnons le rapport entre la production le mois de l'année où elle est la plus faible et le mois de l'année où elle est la plus forte en tenant compte ou pas de la partie résiduelle.

Nous pouvons tirer de ce tableau les conclusions suivantes :

Tout d'abord le facteur de charge et l'importance de la partie résiduelle de la production éolienne sont deux fois plus grands que pour la production PV. Ceci signifie que la part de la partie résiduelle est relativement la même dans les deux cas.

La variation inter-annuelle est elle aussi deux fois plus grande pour l'éolien que pour le PV.

Par contre l'amplitude de la partie périodique est la même pour le PV et pour l'éolien. Ce terme est même plus important pour le photovoltaïque.

Ces différents ordres de grandeur ont pour conséquence que le rapport entre le mois le plus productif de l'année et le mois le moins productif de l'année est deux fois plus grand pour le photovoltaïque que pour l'éolien.

Pour conclure sur cette partie quantitative il faut noter que ces valeurs sont propres à la France. Concernant la production photovoltaïque la différence est bien évidemment due à la saisonnalité de l'ensoleillement et dépend donc de la latitude. Plus proche de l'équateur celle-ci est moins importante.

Concernant ces variations saisonnières et interannuelles il existe plusieurs types de solutions qui ont quelques points communs dans leurs philosophies avec les solutions pour la gestion des variations à

court terme. Cependant ces solutions sont par nature assez différentes puisqu'il s'agit d'ajuster de très grande quantités d'énergie sur de longues périodes.

La première solution est encore l'adaptation de la consommation dans sa part saisonnière. Il s'agit surtout ici de réduire la thermosensibilité de la consommation pour éviter une surconsommation l'hiver qui ne serait pas en phase avec la production photovoltaïque.

Il n'existe pas à proprement parler de solutions de stockage permettant de stocker plusieurs TWh d'énergie pendant plusieurs mois. Cependant sur ce point les synergies possibles entre le réseau de gaz et le réseau électrique forment une deuxième solution intéressante. La technologie dite de power to gas en est un élément clés. Le power 2 gas est la conversion d'électricité en di-hydrogène qui peut être utilisé dans le transport, injecté dans le réseau de gaz en petite quantité ou lui-même transformé en méthane. A partir de ce méthane stocké sur le réseau de gaz ou dans des stockages souterrains on peut envisager de la cogénération d'électricité et de chaleur dans des grands réseaux ou avec la micro-cogénération dans des maisons individuelles. Avec la cogénération la production de chaleur pendant les périodes de froid s'accompagne de la génération d'électricité et donc contribue à diminuer la thermo-sensibilité. Enfin le méthane peut être utilisé pour produire de l'électricité à partir de turbines à gaz ou de centrales à cycles combinés.

La dernière famille de solutions est dans l'optimisation des centrales de production elles même et leur répartition au sein du mix électrique.

Il s'agit tout d'abord de combinaison adéquate entre la puissance installée de centrales PV et de centrales éoliennes puisqu'elles ont des variations saisonnières en opposition de phase.

Mais la variabilité peut aussi être réduite par une diversification adéquate de l'implantation des centrales et l'augmentation des capacités de transit entre différents pays. Enfin le design des centrales elles-mêmes peut-être un facteur de réduction des variations saisonnières.

Concernant les installations photovoltaïques une inclinaison des panneaux légèrement favorable à une production plus élevée l'hiver est possible même si elle amène une baisse du productible annuel.

Concernant les éoliennes de nouveaux dimensionnements d'éoliennes voient le jour aujourd'hui qui reposent sur un rapport plus élevé entre la surface des pales de l'éolienne et sa puissance. Ce nouveau type d'éolienne permet un fonctionnement nominal pour des vents plus faibles et a pour conséquence d'atténuer les variations interannuelles et en plus d'augmenter la production moyenne de l'éolienne à capacité installée fixée.