

## Présentation d'un modèle simplifié de simulation du système électrique publié sur Internet

Le modèle simplifié de simulation du système électrique présenté ici est publié sur internet. Appelons-le Simelec-SP. Après l'avoir présenté avec ses spécificités, je montrerai qu'il permet de bien répliquer un jeu d'hypothèses « 50 % nucléaire », le scénario Ampère du RTE, et un jeu d'hypothèse « 100 % renouvelable » étudié par une équipe du CIRED.

Il est donc possible de l'utiliser pour compléter les informations données par les organismes officiels, pour les interroger, pour évaluer la sensibilité des résultats à différents facteurs, et pour étudier d'autres jeux d'hypothèses que ceux qui sont publiés, en particulier sur le niveau de consommation et la place du nucléaire.

Depuis mai 2017, est publié à l'adresse [www.hprevot.fr](http://www.hprevot.fr) un modèle de simulation du système électrique qui équilibre heure par heure la consommation d'électricité et la fourniture, elle-même provenant directement de la production ou du déstockage.

Je pouvais alors écrire que c'était le seul modèle de simulation qui soit publié. Depuis, l'ADEME a publiquement reconnu qu'elle ne peut pas publier celui dont elle se sert car elle n'en a pas la propriété intellectuelle. Les entreprises de production d'électricité, des entreprises de service et des associations ont leurs propres modèles qu'ils ne publient pas.

RTE a récemment publié son modèle Antares. C'est un modèle qui représente les système électrique français au sein du système européen. Je ne le connais pas mais j'ai noté que, pour l'utiliser, RTE propose une formation sur trois jours. D'autres ont élaboré leur propre modèle et peu le publient.

L'outil de simulation que je publie est simplifié et peut être utilisé par toute le monde car il a été construit avec Excel. De plus, chacun peut le compléter simplement. Comme il est très simple, la question se pose de savoir dans quelle mesure il est pertinent. Il réplique correctement les résultats d'autres modèles beaucoup plus complexes. De plus il prend en compte les besoins d'inertie du réseau électrique.

### **En quoi un outil de simulation du système électrique simplifié est utile**

Avec le développement des éoliennes et du photovoltaïque, il devient plus difficile d'ajuster à chaque instant la fourniture d'électricité à la consommation, et les moyens pour y parvenir sont très variés : choix de la capacité des différents modes de production, déplacements de consommation, effacement définitif de la consommation, recharge et décharge de moyens de stockage d'électricité, batteries ou Steps, production de gaz de synthèse pour produire, plus tard, de l'électricité, importations et exportations, abandon d'une partie des possibilités de production.

Ce que RTE appelle « déversement » lorsqu'il s'agit d'éolien et de photovoltaïque, est appelé « suivi de charge » lorsqu'il s'agit de nucléaire. A noter que l'on se félicite des possibilités de « suivi de charge » et que l'on dénonce les « déversements » en y voyant un gaspillage alors que l'un et l'autre sont de même nature.

Pour ajuster consommation et fourniture de courants, le choix entre une grande diversité de solutions sera fait selon différents critères parmi lesquels les dépenses, les émissions de CO<sub>2</sub>, les effets sur l'environnement, l'indépendance énergétique, la sécurité d'approvisionnement et d'autres.

Un outil de simulation permet de comparer plusieurs jeux d'hypothèses : non seulement la consistance du parc de production et de stockage mais aussi, autant que possible, les effets indirects de ce parc de production.

La comparaison est délicate du fait d'incertitudes de grande ampleur non seulement sur les fluctuations de l'intensité du vent ou de l'éclairement solaire, mais aussi sur les aléas techniques et sur la politique des pays voisins puisque le réseau français fait partie d'un vaste réseau européen. Les

moyens de simulation peuvent rendre compte de cette incertitude en simulant un très grand nombre de situations de façon à calculer la distribution des résultats et à quantifier des moyennes et les résultats extrêmes. Ils doivent alors trouver automatiquement dans chaque simulation une combinaison de moyens optimale. Ils sont donc complexes et difficiles d'usage, donc peu disponibles.

## **A- Une présentation du logiciel simplifié et publié Simel-SP**

L'outil de simulation présenté ici tient sur une feuille excel où se trouvent les 8760 lignes sur lesquelles est calculé heure par heure l'équilibre entre fourniture et consommation d'électricité. Il peut être chargé sur un ordinateur domestique en deux minutes.

Les combinaisons optimales de moyens de production et de stockage se trouvent par tâtonnement, ce qui n'est pas gênant car les réponses sont immédiates et il n'est pas nécessaire de trouver la solution exactement optimale vu que les optimums sont assez plats.

La version publiée de Simel-SP se base sur les chroniques horaires d'une seule année, l'année 2013.

Une autre version permet de se baser sur les chroniques horaires de consommation et d'activité éolienne de chacune des six années de 2012 à 2017, ce qui permet d'avoir une idée de la dispersion des résultats. Il est possible aussi d'introduire la chronique de consommation imaginée par l'ADEME dans des scénarios sans nucléaire.

Pour une présentation plus complète on peut se référer à la notice technique publiée sur mon site.

### **A-1 La consommation**

#### **La consommation annuelle et le profil de consommation**

La consommation est calculée heure par heure en s'appuyant sur la chronique de consommation de l'année 2013. Deux options sont proposées. Ou bien on introduit seulement la consommation annuelle ; Simel-SP calcule alors à chaque heure une consommation proportionnelle à ce qu'elle fut en 2013. Ou bien on introduit un coefficient multiplicateur pour six mois chauds et un autre pour six mois frais.

#### **Le déplacement de consommation**

Sur la base de ce profil de consommation, Simel-SP peut représenter les déplacements de consommation : consommation anticipée par exemple pour chauffer l'eau sanitaire ; ou retardée. Ces déplacements de consommation sont limités en nombre de GWh et en puissance. Un million de foyers reportant une consommation de 1 kW pendant une heure, la quantité de déplacement est de 1 GWh ; elle ne dépend pas du temps de déplacement ; la puissance déplacée est de 1 GW. Si un tel déplacement intervient une fois par jour, cela fait une consommation déplacée dans l'année de 365 GWh. On introduit dans Simel-SP, en GWh, le maximum de déplacement de consommation avant qu'il soit compensé.

#### **L'effacement définitif**

Avec le simulateur Simelec-SP, une partie de la consommation peut être effacée définitivement. C'est notamment le cas de celle des véhicules hybrides rechargeables et du chauffage hybride qui combinent l'électricité et, en cas de besoin, une autre source d'énergie. L'effacement définitif intervient pour remplacer une production d'électricité qui serait faite avec un moyen peu efficace, TAC ou groupes électrogènes. La consommation effacée est inférieure à un maximum exprimé en GW mais cela ne suffit pas car *une consommation effaçable ne peut être effacée que dans la mesure où elle n'est pas nulle*. Pour représenter cela, Simel-SP suppose que les consommateurs dont une partie de la consommation peut être effacée ont à chaque moment, avant effacement, une consommation proportionnelle à la consommation totale à ce moment-là, dans le même rapport que celui de la puissance effaçable au maximum horaire de la consommation.

On introduit donc dans Simel-SP une puissance maximum d'effacement définitif ; celle-ci peut être différente pendant un semestre frais et pendant un semestre chaud.

## **A-2 Les moyens de production**

Dans Simelec-SP, les moyens de production sont le nucléaire, l'hydraulique de fleuve, les barrages de lacs, une production à partir de biomasse ou de biogaz, une production à partir de gaz, gaz d'origine fossile ou gaz de synthèse, en différenciant CCG et moyens de pointe (TAC et groupes électrogènes).

Pour ce qui est du nucléaire, on introduit la capacité, le coefficient de disponibilité, qui peut être modulé dans l'année, les limites de la flexibilité, une production minimale proportionnelle à la capacité nominale (dans un rapport de 20 % pouvant être aisément modifié par l'utilisateur).

Pour l'éolien et le photovoltaïque, on introduit la capacité sur terre et en mer, sur toiture et sur sol et les facteurs de charge. Les profils d'activité éolienne et solaire sont ceux de l'année 2013.

Pour les lacs et les fleuves, on introduit la quantité d'électricité produite dans l'année. Le profil horaire de production est le même qu'en 2013

Une version non publiée de Simel-SP différencie le profil éolien sur terre et en mer et permet de calculer la production des lacs à partir du flux de leur alimentation et de la capacité maximum.

Pour le biogaz et la biomasse on indique la production totale et la part pilotable. On introduit également une production à partir de gaz fossile non pilotable, telle que la cogénération.

Pour le biogaz et la biomasse, Simel-SP calcule la puissance en tenant compte de la part pilotable ; mais le calcul ne peut pas être exact ; c'est pourquoi une autre option permet d'ajuster la puissance de façon que la production pilotable, qui est calculée par Simel-SP, soit égale à celle qui a été introduite.

Simel-SP suppose que la possibilité de production hydraulique et la possibilité de production de base à partir de biomasse, de biogaz et de gaz sont employées en priorité ; puis l'éolien et le photovoltaïque *sous la réserve de la stabilité du réseau* et des limites de flexibilité du nucléaire puis le nucléaire.

### **Pour préserver la stabilité du réseau électrique,**

La possibilité de production éolienne et solaire est utilisée dans la mesure où la production par des machines tournantes est supérieure à une certaine limite. Pour cette limite minimale, Simel-SP indique une valeur proportionnelle à la pointe de puissance appelée par la demande et celle-ci peut être diminuée par l'utilisateur. Dans les hypothèses avec peu de nucléaire, ce paramètre, à savoir de combien peut être diminuée la limite minimum de production par des machines tournantes, a un effet considérable sur le parc de production et les dépenses. Même avec 50 % nucléaire, il fait sentir ses effets puisqu'il oblige fréquemment à refuser sur le réseau des possibilités de production éolienne et photovoltaïque, ce qui laisse plus de place au nucléaire. Simel-SP calcule tout cela.

Préserver un minimum d'énergie cinétique de rotation coupée au réseau est une condition nécessaire à la stabilité du réseau. Mais il est probable qu'elle n'est pas suffisante dans l'hypothèse où la production par les machines tournantes est faible, voire nulle. Les autres conditions à réunir ne sont pas représentées par Simel-SP.

## **A-3 Equilibrer la fourniture de courant et la demande**

### **Stockage et déstockage ; production de méthane de synthèse**

Heure par heure, Simel-SP calcule ce que l'on appellera ici une possibilité de production de base PPB : c'est la possibilité de production du nucléaire, de l'éolien, des fleuves et des lacs, à quoi s'ajoutent la part non pilotable de production à partir de biogaz ou biomasse et à partir de gaz fossile.

Selon les heures, la PPB dépasse le besoin de la consommation (avant déplacement et effacement) ou elle lui est inférieure.

Lorsque la possibilité de production PPB dépasse le besoin, la différence est mise en stock (Step ou batterie) et une partie de la consommation est anticipée dans la mesure des possibilités ; la partie de PPB qui reste excédentaire est consommée par un électrolyseur pour produire de l'hydrogène qui sert à produire du méthane qui lui-même, le moment venu servira à produire de l'électricité – procédé P2P pour *power to power*. Les possibilités du stockage et de consommation anticipée sont limitées par la puissance maximum de charge et de décharge et par le contenu maximum ; la possibilité d'électrolyse est limitée par la puissance maximum pouvant être consommée. Les excédents sont exportés ou utilisés à autre chose dans la limite d'une puissance maximum. Le reste doit être abandonné.

Lorsque la partie des possibilités de production de base pouvant entrer sur le réseau est insuffisante pour répondre à la demande, Simel-SP sollicite d'abord les reports de consommation et le déstockage puis la partie pilotable de la biomasse puis une production à partir de gaz (sans faire la différence entre du gaz fossile ou de synthèse) par des CCG, puis l'effacement définitif, puis les TAC et les groupes électrogènes.

L'utilisation du déstockage est limitée de façon à respecter la limite minimum de production des machines tournantes.

### **Capacité des moyens de production à partir de gaz (et éventuellement de fioul)**

Il faut une capacité de production à partir de gaz pour équilibrer à tout instant la fourniture et la consommation d'électricité. Simel-SP ne dit pas si cette capacité est en France ou à l'étranger.

Simel-SP indique la capacité demandée heure par heure aux moyens pilotables hors nucléaire. Ce sont les productions pilotables à partir de gaz et de biomasse et le déstockage. L'examen de la chronique horaire permet de voir la puissance pouvant être garantie par les moyens de stockage, compte tenu de leur capacité en GWh. On donnera un exemple plus loin. Simel-SP ne calcule pas lui-même cette capacité. Il faut donc l'introduire. Simel-SP calcule alors la puissance demandée aux moyens de production pilotables à partir de gaz (et éventuellement de fioul).

Simel-SP calcule aussi une puissance garantie à partir de la consommation de pointe et des capacités garanties par le déstockage, les fleuves, les lacs, la production à partir de biomasse ; pour l'éolien il compte 1 % de la capacité installée. En retranchant la capacité effaçable définitivement et en ajoutant ou retranchant un facteur correctif, simel-SP calcule la capacité de production à partir de gaz.

L'utilisateur de Simel-SP choisit le facteur correctif en tenant compte de la pointe de la demande et des capacités garanties d'une part, du maximum demandé aux moyens pilotables d'autre part.

### **A-4 Les résultats annuels**

Simel-SP calcule les totaux annuels des productions éolienne et photovoltaïque directement consommées ou mises en stocks, ou consommées par l'électrolyseur ou exportées, ou abandonnées.

La production d'électricité à partir de gaz de synthèse est calculée à partir de la consommation d'électricité par l'électrolyseur et du rendement du procédé P2P.

Le rendement du procédé P2P dépend de la façon dont l'électricité est produite à partir du gaz de synthèse. Simel-SP calcule la capacité de CCG et celle des moyens de pointe. Mais une autre option permet à l'utilisateur de les introduire de façon à minimiser les dépenses.

Simel-SP calcule la production pilotable à partir de gaz (et fioul dans les groupes électrogènes) ; en en déduisant la production à partir de gaz de synthèse il calcule la production d'électricité à partir de gaz (et fioul).

Il calcule la production à partir de CCG et à partir de TAC, les possibilités d'exportation selon la capacité des lignes d'interconnexion. Il distingue l'origine, nucléaire ou EnR, de l'électricité consommée par l'électrolyseur, ou exportée ; de même pour les possibilités de production abandonnées (« déversement » ou « suivi de charge »).

Simel-SP indique également le nombre d'éoliennes, les surfaces occupées par les panneaux photovoltaïques.

#### **A-5 Une variante de Simel-SP utilisant d'autres chroniques de consommation et d'activité éolienne**

Une variante de **Simel-SP** non publiée utilise les chroniques horaires de consommation et d'activité éolienne de chacune des années de 2012 à 2017.

En général les résultats sont dans des fourchettes assez étroites, sauf la capacité demandée aux moyens de production à partir de gaz.

Cette variante permet aussi de simuler le cas où les excédents de possibilité de production seraient utilisés par l'électrolyseur avant de recharger les capacités de stockage et non après. Sauf dans les cas extrêmes de capacité ou de coût, il est préférable de recharger les capacités de stockage avant d'alimenter l'électrolyseur.

Cet outil Simel-SP est très maniable : toutes les hypothèses et les principaux résultats sont visibles sur une page 21x27. Il répond immédiatement et le détail des calculs est immédiatement accessible.

### **B- Les limites et la pertinence de ce modèle de simulation**

#### **B-1 Les limites du modèle**

##### **Il ne rend pas compte de la diversité des aléas**

Il est possible de rendre compte de la diversité des aléas en simulant un très grand nombre de situations. Le modèle publié s'appuie sur un seul jeu d'hypothèses. Comme dit plus haut, une autre version s'appuie sur l'une ou l'autre des chroniques des années 2012 à 2017.

##### **Le calcul de la capacité de production à partir de gaz**

Simel-SP ne calcule pas la capacité de production à partir de gaz mais donne les moyens de la calculer, du moins approximativement. Cf. plus loin avec la réplique de Ampère. Simel-SP suppose qu'il existe une capacité de production qui sert exclusivement à répondre à la demande française. Il préserve ainsi la sécurité d'approvisionnement. Or en réalité, les besoins de pointe apparaissant en France peuvent être satisfaits par des moyens qui servent aussi, à d'autres moments, à répondre aux besoins d'autres pays.

##### **L'utilisation des moyens de stockage**

Simel-SP suppose que les moyens de stockage ne sont rechargés que par de l'électricité produite par du nucléaire, de l'hydraulique, du vent, du soleil et de la biomasse, ce qui permet de réduire les émissions de CO<sub>2</sub>. En réalité, pour pouvoir diminuer la capacité des CCG et TAC, les moyens de stockage sont rechargés même si une partie de l'électricité est produite avec du gaz. Du fait des pertes de charge et décharge, la production à partir d'énergie fossile est donc en réalité un peu supérieure à ce que calcule Simel-SP.

##### **Importations et exportations**

En réalité, vu les prix sur le marché européen, il arrive que l'on voie à la fois des exportations et une production pilotable à partir de gaz. Avec Simel-SP, cela ne peut pas se produire.

## **Le calcul des optimums**

Simel-SP ne calcule pas les optimums ; mais les combinaisons optimales se trouvent par tâtonnement et l'on s'aperçoit assez vite que les optimums sont généralement plats ce qui rend inutile la recherche de la solution exactement la moins coûteuse.

\*\*\*

Comme Simel-SP est un outil simplifié, il faut vérifier s'il réplique correctement des scénarios bâtis avec des outils plus lourds.

Nous avons comparé le scénario Ampère de RTE (50 % nucléaire) et un scénario sans nucléaire élaboré par une équipe du CIRED avec deux répliques données par Simel-SP.

## **B-2 La pertinence de simulation Simel SP : répliquer Ampère de RTE, « 50 % de nucléaire »**

J'ai introduit dans Simel-SP les hypothèses connues du **scénario Ampère de RTE** sur la consommation et les moyens de production autres qu'à partir de gaz. La réplique retrouve la consommation à partir de gaz. Elle présente surtout l'intérêt de susciter des questions sur *la capacité* de production à partir de gaz et sur la gestion du réseau de façon à préserver *sa stabilité*.

Une comparaison systématique d'Ampère et de la réplique est en annexe.

### **Les moyens de production**

Capacité nucléaire : 48,5 GW ; coefficient de disponibilité Kd de 77 % (selon une information donnée par RTE). Dans la réplique le Kd est modulé et maximum en hiver à 85 %.

Eolien : 67,3 GW dont 15 GW en mer ; production 161,7 TWh

Photovoltaïque : 48,5 GW ; production de 58,1 TWh

A partir de fleuves, lacs et bioénergie : 87 TWh

J'ai supposé que la production à partir de bioénergie est en base.

La capacité d'interconnexion est de 30 GW.

### **La consommation**

Selon Ampère, la consommation annuelle est égale à 483 TWh y compris les pertes en ligne soit 451,5 TWh après les pertes en ligne. C'est très proche de la consommation de l'année 2013 qui sert de référence à Simel-SP. Pour répliquer Ampère, j'ai fait deux hypothèses. Ou bien la consommation est en toute heure inférieure de 2 % à celle de l'année 2013 (simulation A), ou bien, ce qui est plus vraisemblable, elle est légèrement supérieure pendant six mois frais et légèrement inférieure durant l'autre semestre (simulation B). Pour retrouver l'hypothèse de consommation de Ampère, la baisse de consommation pendant six mois chauds est ici de 13 % et la hausse de consommation pendant six mois frais est de 5 %.

### **Les deux répliques retrouvent les résultats de Ampère :**

La production à partir d'énergie fossile est calculée par les répliques en équilibrant heure par heure fourniture et consommation. Elle est ainsi la différence entre deux valeurs de quelques centaines de TWh. Or elle n'est différente de ce qu'indique Ampère que de 11 TWh avec la simulation A ou de 5 TWh avec la simulation B.

Le seul poste qui marque une différence sensible est celui du stockage déstockage pour les raisons indiquées plus haut (la simulation ne suppose pas que la gestion des stocks sert à diminuer la capacité de production à partir de gaz).

## **D'autres informations**

La simulation donne des informations que ne donne pas RTE telles que l'origine de l'électricité exportée ou mise en stock, la possibilité de production nucléaire non employée ou les possibilités de production éolienne et PV dont l'accès au réseau est refusé au nom de la stabilité du réseau : il s'agit ici de 20 TWh par an.

La simulation montre aussi les heures pendant lesquelles il y a de quoi exporter. De plus, en faisant varier la capacité des lignes d'exportation ou d'autres moyens d'utiliser les excédents, il est facile de calculer les consommations supplémentaires en fonction de l'augmentation des capacités. Par ailleurs, Simel-SP donne l'origine de l'électricité ainsi consommée, information utile pour savoir s'il vaut mieux produire pour exporter ou réduire la production nucléaire.

## **Une question sur la capacité de production à partir de gaz**

Simel-SP montre heure par heure ce qui est demandé à l'ensemble des moyens pilotables autres que le nucléaire, c'est-à-dire les Steps, les batteries, les reports de consommation et la production pilotable à partir de biomasse ou de gaz. Le maximum demandé à cet ensemble est de 28 GW. Il est atteint le 17 janvier à 19 heures.

En l'absence de batteries, la capacité des moyens de production pilotables à partir de gaz est au minimum la différence entre le maximum demandé aux moyens pilotables soit 28 GW et la capacité que peuvent garantir les Steps, soit 5 GW. Elle doit être de **23 GW**.

Or le scénario Ampère comporte **8,2 GW** de CCG et turbines à combustion. Pour passer ce moment de tension, **il manque donc 15 GW** en l'absence de batteries – sur l'utilité de batteries, voir *infra* ; une puissance qu'il faudra trouver auprès de pays voisins.

C'est une valeur minimum. Pour mesurer réellement la capacité nécessaire, il faut considérer un grand nombre de situations. Selon les simulations faites en se basant sur les chroniques horaires de consommation et d'activité éolienne des six années de 2012 à 2017, la capacité demandée aux moyens pilotables est à trois reprises située entre 30 à 32 GW. La capacité demandée à une production à partir de gaz pourrait donc atteindre 27 GW. Il manquerait donc 19 GW.

On peut également faire la différence entre la demande de pointe et les capacités garanties. Ici, sur la base de l'année 2013, Simel-SP calcule 35 GW.

*J'ai fait cette remarque à RTE. Il m'a été répondu qu'en effet le scénario Ampère laisse ouverte la possibilité de devoir recourir à plus de 20 GW d'importation.*

## **Sur l'utilité des batteries**

Les Steps ont une capacité de 90 GWh et peuvent fournir 5 GW. Or, pour garantir 5 GW, il suffit ici de 20 GWh. Avec 90 GWh, elles pourraient garantir 9 GW si elles pouvaient les fournir. Il serait donc possible de mieux tirer parti de leur capacité, en GWh, si elles pouvaient fournir 9 GW. Faute de pouvoir augmenter leur capacité, il serait utile d'ajouter des batteries pouvant fournir 4 GW. Elles devraient avoir une capacité de 13 GWh. Mais ce rapport de 4 GW pour 13 GWh est trop faible pour que les batteries coûtent moins cher qu'une capacité de production à partir de gaz. Il vaudra mieux seulement 4 GWh qui éviteront 2 GW de capacité de moyens de pointe.

## **La stabilité du réseau**

Simel-SP permet de visualiser les refus d'accès au réseau opposés à la production éolienne et photovoltaïque. Dans le cas d'Ampère, ce serait au total 22 TWh, et cela arriverait 4500 heures, c'est à dire la moitié du temps. Ces possibilités de production devront donc être traitées spécialement. Elles perdront de la valeur.

Il serait possible de diminuer la limite minimale de production des machines tournantes. Si elle était diminuée de 4 GW, les quantités empêchées seraient de 14 TWh. Cela diminuerait de 17 TWh la production nucléaire servant à la consommation ; les exportations nucléaires seraient supérieures de 14 TWh.

### **La flexibilité du nucléaire face aux éoliennes et photovoltaïque**

Supposons que la limite minimum de production des machines tournantes est diminuée de 4 GW. Si la production nucléaire peut varier en une heure de 20 % de la capacité nominale, elle pourra accompagner sans difficulté les fluctuations de la demande et de la production éolienne. Si la flexibilité est seulement de 10 %, le nucléaire « refoulera » 2 TWh par an ; si elle était de 5 %, il refoulerait 9 TWh. C'est peu. Le nucléaire n'est pas un obstacle aux éoliennes ni au photovoltaïque.

### **Les possibilités d'exportation et autres utilisations des excédents**

Selon la simulation par Sime-SP, si la capacité des interconnexions ou une autre capacité d'utilisation de l'électricité est de 30 GW, les possibilités d'exportation sont de 147 TWh, dont 62 TWh produits par éolien ou photovoltaïque et 85 TWh produits par le nucléaire. Si la capacité des interconnexions est de 25 GW, les possibilités d'exportation sont de 134 TWh. Pour Ampère, elles sont de 134 TWh.

Une capacité totale de 35 GW pourrait consommer 157 TWh. Ce qui montre que les 5 GW supplémentaires pourraient consommer 10 TWh, avec un facteur de charge serait de 2000 h par an seulement.

Ces ordres de grandeur sont nécessaires pour prévoir l'utilisation et la valorisation des excédents des possibilités de production excédentaires.

### **B-3 La pertinence de simulation Simel-SP : répliquer un scénario « 100 % renouvelable »**

Une équipe du CIRED a étudié des scénarios sans nucléaire et a publié ses données. Il a été possible de répliquer un de ces scénarios avec Simel-SP après avoir apporté quelques modifications à la version publiée : le profil de l'activité éolienne est différent en mer et sur terre et la gestion de l'eau des lacs est différente avec une forte proportion d'éolien et de photovoltaïque de ce qu'elle a été durant l'année de référence de Simel-SP (l'année 2013). D'autre part, on a introduit dans Simelc-SP le profil horaire de la consommation retenu par l'ADEME pour l'adapter autant que possible aux variations de production éolienne et photovoltaïque

Une fois que ces modifications ont été apportées à la première version du logiciel, celui-ci retrouve le scénario qu'il réplique.

Les alinéas qui suivent *ne préjugent en rien de la pertinence des hypothèses – qui sont invraisemblables*. Ils montrent que Eoles et Simel-SP, à partir des mêmes hypothèses, arrivent à des résultats très proches.

#### **Le scénario répliqué**

Dans le scénario répliqué, la consommation est celle que l'ADEME avait imaginée pour sa première étude « électricité 100 % renouvelable » ; elle est de 422 TWh avant les pertes en ligne, sensiblement moins que pendant l'année 2013

La capacité éolienne est 82 GW sur terre avec un facteur de charge de 2700 heures par an et 20 GW en mer avec un facteur de charge de 4700 heures. La capacité photovoltaïque est de 105 GW avec un facteur de charge de 1400 heures par an. Eoles suppose que la capacité des Steps peut être doublée et ajoute une capacité équivalente de batteries. La production hydraulique est de 45 TWh par an. Une capacité d'électrolyse de 12 GW permet de produire assez de gaz de synthèse pour produire 10 TWh d'électricité. La stabilité du réseau est assurée par les batteries – *hypothèse irréaliste* mais il s'agit ici de vérifier que Simelc-SP peut répliquer les résultats obtenus par d'autres modèles de simulation..



Eoles équilibre offre et demande avec une production d'électricité à partir de biogaz de 15 TWh par an.

## **La réplique**

### **En utilisant la version de base de Simel-SP**

Pour répliquer ce scénario, j'ai introduit dans la version publiée de Simel-SP les mêmes valeurs sauf la production à partir de biogaz. La consommation annuelle est la même que pour Eoles et son profil horaire est le même que pendant l'année 2013. Simel-SP calcule alors que la production à partir de biogaz devrait être de 41 TWh par an. Cette différence de 26 TWh est seulement 6 % de la consommation ou de la production. Quelques modifications apportées à la version publiée de Simel-SP la réduit à très peu.

### **Les modifications apportées à la version de base de Simel-SP**

La chronique horaire de consommation a été remplacée par celle qu'a construite l'ADEME. Alors, la production à partir de biogaz qui permet d'équilibrer heure par heure fourniture et consommation est de 32 TWh par an. Cela donne une idée de l'effet des déplacements de consommation assez vigoureux supposés par l'ADEME.

Ils permettraient de consommer 9 TWh de plus d'éolien et de photovoltaïque, soit 27 GWh par jour en moyenne mais cette moyenne ne signifie pas grand-chose ; il serait possible de mesurer l'écart jour par jour.

Puis, pour mesurer l'effet de la variabilité du vent d'une année à l'autre, j'ai introduit les chroniques horaires de l'activité éolienne des années 2012 à 2017. La production à partir de biogaz se trouve dans une fourchette de 28 à 43 TWh par an.

Quant aux lacs de montagne (autres que les Steps), la version publiée de Simel-SP suppose que la production est, heure par heure, la même qu'en 2013. Cette approximation se justifie lorsque les parcs de production ne sont pas trop différents du parc actuel. Une variante calcule heure par heure la production à partir des lacs selon les besoins et en la faisant passer avant le déstockage et la production à partir de gaz, et en tenant compte de la recharge des lacs. Alors la production à partir de biogaz est dans une fourchette de 22 à 38 TWh, là où Eoles indique 15 TWh.

L'activité éolienne en mer est beaucoup plus régulière que sur terre. J'ai donc introduit dans la simulation un profil horaire de production en mer parmi ceux qui ont été utilisés par l'étude Eoles, celui de l'année 2017. Selon le profil de vent *sur terre* des années 2012 à 2017, la production à partir de biogaz est alors de 11 à 22 TWh par an. Pour l'année 2013, qui sert de référence principale à Simel-SP, le résultat est en haut de la fourchette. La moyenne est 16,5 TWh, très proche des 15 TWh de Eoles.

Redisons qu'il ne s'agit pas ici de commenter les hypothèses de l'étude Eoles. L'objet de l'exercice était de vérifier si Simel-SP peut répliquer un scénario très différent de la situation actuelle. La version publiée donne un résultat approchant. Après des modifications sur la consommation, sur la production des éoliennes en mer et sur la production des lacs, la convergence, dans le cas étudié est très bonne.

Sur cette base, il est donc possible de commenter les jeux d'hypothèses supposant que la production d'électricité se fait sans nucléaire et d'autres jeux d'hypothèses avec plus ou moins de nucléaire.

Il apparaît donc que Simel-SP est pertinent dans sa version de base et, mieux, dans une version un peu modifiée.

Il est donc possible de l'utiliser pour compléter les informations données par les organismes officiels, pour les interroger, pour évaluer la sensibilité des résultats à différents facteurs et pour étudier d'autres

jeux d'hypothèses que ceux qui sont publiés, en particulier sur le niveau de consommation et la place du nucléaire.

Annexe à la présentation d'un modèle de simulation simplifié Simel-SP

Une réplique du scénario Ampère de RTE par Simelec-SP

	Ampère		Réplique de Ampère		
	TWh/an		profil de conso année 2013	conso hiver : année 2013+5% conso été : année 2013-13 %	
consommation		<b>483,1</b>	<b>483,1</b>	<b>482,8</b>	
Production					
directement consommée					
lacs, fleuves, mer, bioénergie		<b>87,0</b>	<b>87</b>	<b>87</b>	
éolien et PV			163	153,5	
nucléaire			214	217	
déstockage : production des steps		7,5	2,5	2,7	
production ex fossile		<b>27,6</b>	<b>16,2</b>	<b>22,7</b>	
<b>Ce qui est fourni à la consommation</b>			<b>482,7</b>	<b>482,9</b>	
stockage consommé par les Steps		9,4	3,6	3,9	
dont produits par le nucléaire				3,4	3,4
déversé : éolien et PV		<b>8,7</b>	<b>3,2</b>	<b>4</b>	
exporté					
capacité des interconnexions				30	30
exporté		<b>134,3</b>	<b>144</b>	<b>147</b>	
dont nucléaire				91	85
dont éolien et PV				53	62
<b>Demande totale</b>		635,5	633,9	637,7	
<b>Production</b>					
<b>Nucléaire</b>					Kd : 77% max : 85 %
possibilités de production			327	327	
production pour conso directe			214	217,3	
production pour stockage		9,4	3,4	3,7	
production pour exportation			90,8	85	
production totale nucléaire		<b>293,8</b>	<b>308,2</b>	<b>306</b>	
possibilités de production non employée			18,8	21,3	
<b>Eolien et PV</b>					
possibilités de production		<b>219,8</b>	<b>219,6</b>	<b>219,6</b>	
production pour conso directe			163	153,5	
production pour stockage			0,2	0,2	
production pour exportation			53,1	62,1	
production totale éolien et PV			216,3	215,8	
Déversées		<b>8,7</b>	<b>3,3</b>	<b>4</b>	
<b>Offre totale</b>		635,7	633,5	638,0	

