

Modélisation d'un mix électrique avec stockage d'énergie électrique, mais sans énergie fossile

Par Ilarion PAVEL

Conseil général de l'Économie (CGE)

Dans cet article, est présentée une modélisation mathématique d'un mix électrique avec stockage d'énergie électrique, mais sans production d'énergie fossile. Dans diverses hypothèses (maintien de la production nucléaire à 72 %, réduction à 50 % et arrêt complet de la production), on évalue la capacité de stockage, les puissances nécessaires d'énergies solaire et éolienne à installer, ainsi que les coûts associés.

L'objet de cette modélisation est d'évaluer la capacité de stockage et la puissance des installations d'énergies renouvelables éolienne et solaire qui seraient nécessaires pour remplacer complètement les combustibles fossiles dans la production d'énergie électrique en France. Nous allons utiliser les données recueillies par RTE pendant trois années consécutives (2015, 2016 et 2017), concernant la consommation et la production de l'énergie électrique⁽¹⁾.

Dans un premier temps, on consolide la consommation avec les échanges frontaliers, ainsi que la production hydraulique avec le pompage STEP pour obtenir l'équation

suivante :

$$\text{consommation} - \text{échanges} = \text{fioul} + \text{gaz} + \text{charbon} + \text{nucléaire} + \text{éolien} + \text{solaire} + \text{hydro (+ pompage)} + \text{bio.}$$

Le but est alors de remplacer dans l'équation précédente les sources fossiles par de l'énergie éolienne et solaire, ce qui demande, d'une part, l'augmentation de la puissance installée pour ces deux dernières sources d'énergie et, d'autre part, la mise en place de la capacité de stockage nécessaire pour faire face à la variabilité qui les caractérise.

Les variables du modèle sont donc la puissance installée éolienne et solaire (en GW) et la capacité de stockage (en TWh). Chaque demi-heure, on alimente la réserve de stockage avec de l'énergie produite (nucléaire + renouvelable) et, en même temps, on envoie en consommation l'énergie correspondante (voir la Figure 2 de la page suivante), en utilisant les données RTE (on garde pour l'instant constant le niveau de production du nucléaire, de l'hydraulique et de la bioénergie, et on augmente de manière proportionnelle celui de l'éolien et du solaire).

(1) Ces données se présentent sous la forme de relevés de puissances moyennées chaque demi-heure, pendant la durée de l'année : consommation électrique, production d'énergie à partir des sources fossiles (fioul, gaz, charbon), du nucléaire, du renouvelable (éolien, solaire, hydraulique, bioénergies), ainsi que les échanges frontaliers et le pompage par des STEP, soit pour une année : 11 x 17 520 entrées (17 568 sur 2016, qui est une année bissextile).

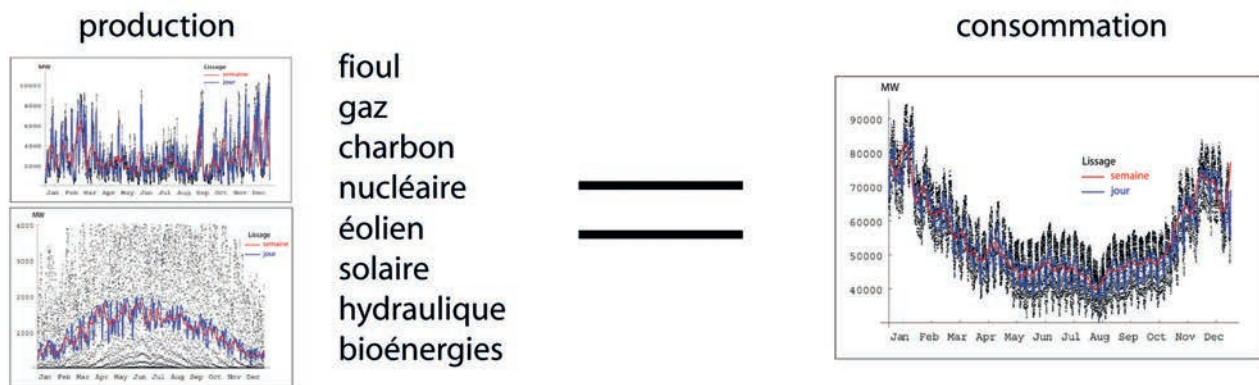


Figure 1.

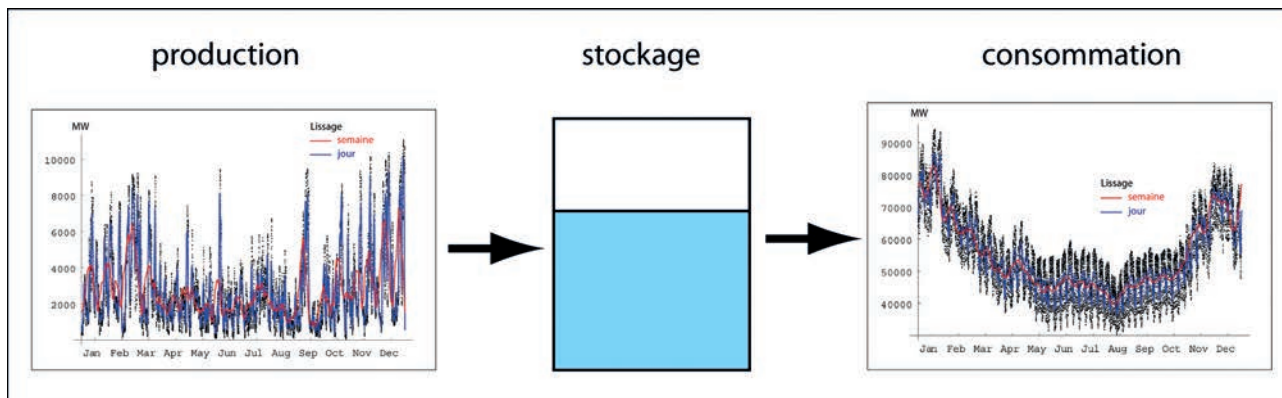


Figure 2.

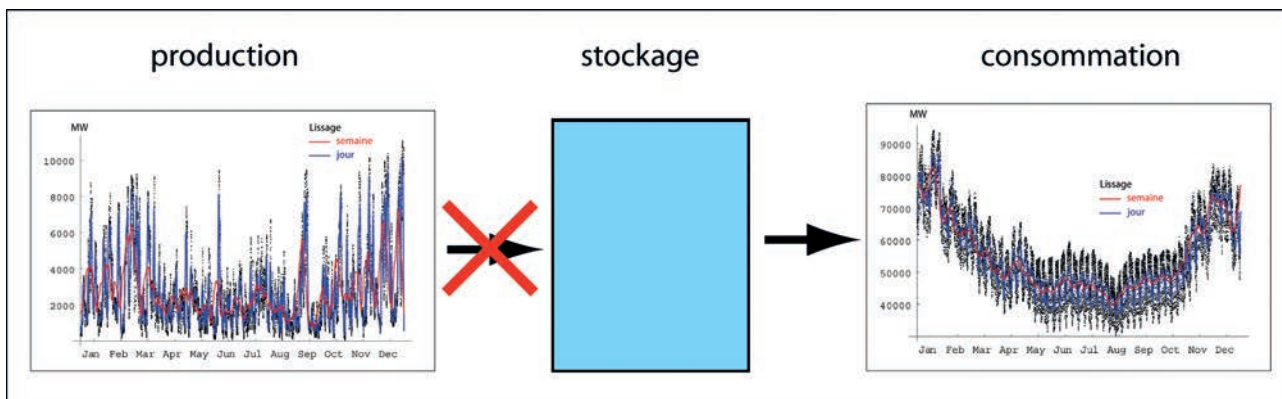


Figure 3.

Dans certains cas, la capacité de stockage est saturée et la production est supérieure à la consommation, on est alors obligé d'arrêter la production de l'éolien et du solaire (effacement de production) (voir la Figure 3 ci-dessus) :

De manière symétrique, la réserve en stockage peut se trouver vide : la consommation étant supérieure à la production, on est alors obligé d'arrêter la consommation (effacement de consommation) (voir la Figure 4 ci-après) :

Deux résultats importants découlent alors de ce modèle : le pourcentage d'effacement de consommation sur l'année, soit le nombre de demi-heures de consommation effacées / nombre de demi-heures de l'année (17 520), et le pourcentage d'effacement de production renouvelable (éolienne et solaire) sur l'année, soit le nombre de

demi-heures de production effacées / 17 520.

Un paramètre secondaire est la réserve initiale de stockage au 1^{er} janvier de l'année. On l'a choisie conventionnellement égale à 2 TWh, pour ne pas partir d'un stock égal à zéro pendant un mois d'hiver à forte consommation. En fait, les simulations ont montré que cette valeur a peu d'influence sur les résultats de la modélisation.

Le but de la simulation est alors de déterminer les valeurs de la capacité de stockage et de la puissance installée (éolienne + solaire) permettant d'obtenir des valeurs faibles d'effacement de la consommation (entre 1 et 10 %, par exemple), pour la simple raison qu'il est souhaitable de ne pas léser les consommateurs.

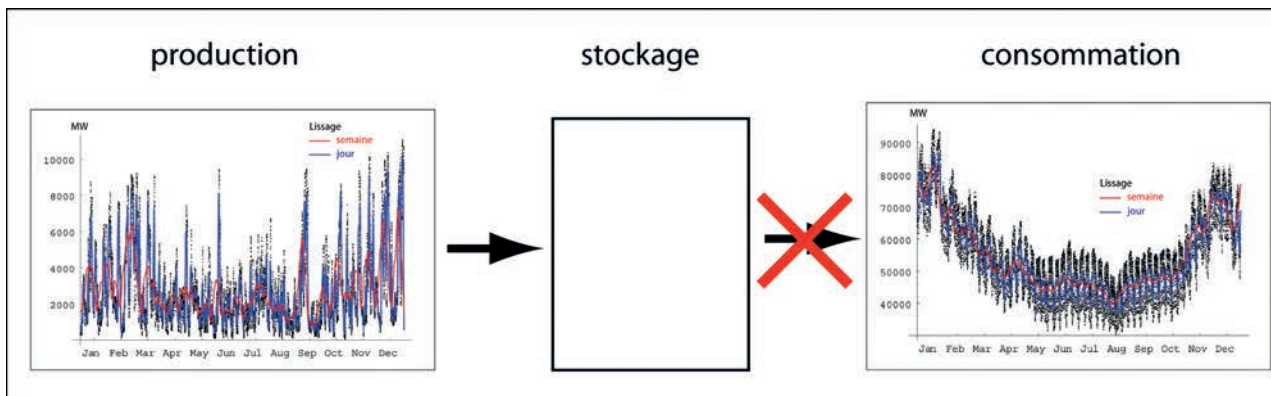


Figure 4.

Trois scénarios possibles

On va étudier trois scénarios, en fonction de la part du nucléaire dans le mix électrique :

- scénario nuc72 % (nucléaire à 72 %, c'est-à-dire que l'on garde l'intégralité de la capacité de production du nucléaire) ;
- scénario nuc50 % (nucléaire réduit à 50 %) ;
- scénario nuc0 % (on se prive complètement du nucléaire).

L'objectif est de s'affranchir totalement de la production d'électricité à partir des énergies fossiles en augmentant la production de l'éolien et du solaire, tout en maintenant constant le rapport des puissances installées éolien/solaire, calculées à partir des données RTE concernant les puissances installées⁽²⁾.

Premiers résultats

Prenons, par exemple, la situation du scénario nuc72 % (données 2017), qui conduit au graphique suivant, avec les courbes d'effacement constant de consommation à 10 %, 5 %, 3 %, 2 % et 1 %.

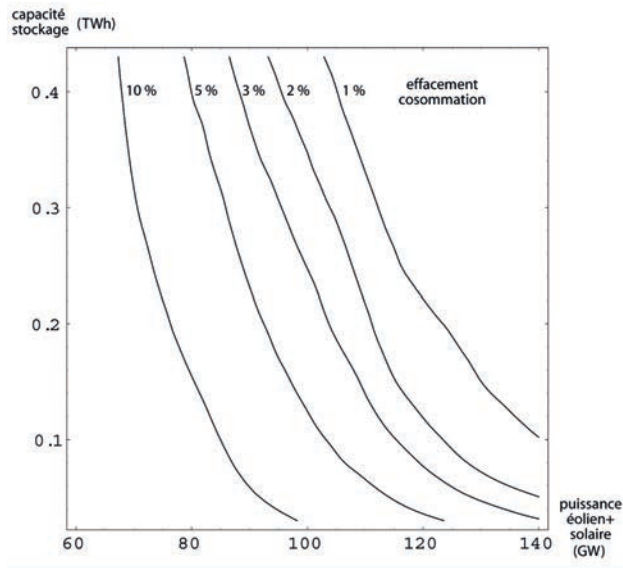


Figure 5.

Pour une courbe d'effacement constant, par exemple celle de 1 %, on pourrait alors se placer soit sur sa partie haute (forte capacité de stockage, mais une plus faible puissance installée), soit sur sa partie basse (forte puissance installée, mais une plus faible capacité de stockage).

Considérations économiques

Pour déterminer la position optimale sur cette courbe d'effacement constant, on doit faire appel à des considérations économiques. Il sera alors judicieux de minimiser les dépenses nécessaires à l'augmentation de la capacité de production et à la mise en place d'un système de

(2) Les puissances installées sont indiquées dans l'annexe en fin de cet article. On obtient alors les valeurs suivantes : 1,67 (en 2015), 1,723 (en 2016) et 1,770 (en 2017).

stockage.

On prend alors des hypothèses couramment observées pour ce type de dépenses : des investissements dans les capacités de production (éolien et solaire) de 1 M€/MW (soit 1 G€/GW) et, pour le système de stockage, de 100 €/kWh (soit 100 G€/TWh).

Le coût total est alors :

$$\text{Coût total (G€)} = \text{investissement production (GW)} + 100 * \text{capacité de stockage (TWh)}$$

Soit, en changeant les unités de mesure :

$$\text{Coût total (100 G€)} = \text{investissement production (100 GW)} + \text{capacité de stockage (TWh)}$$

Ce qui correspond à l'équation d'une droite de type : $x + y = \text{constante}$

Pour une courbe d'effacement constant, trouver le coût total minimal revient à trouver la distance minimale entre l'origine et une droite $x + y = \text{constante}$, tangente à cette courbe (voir la Figure 6 ci-dessous).

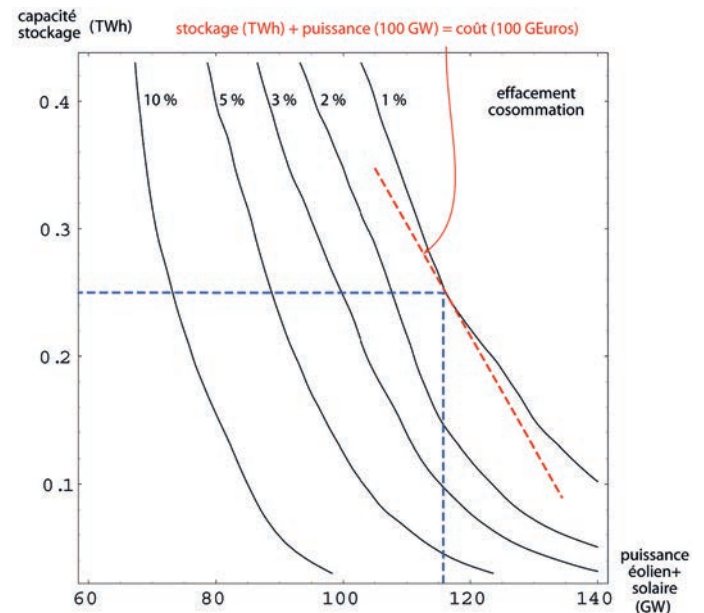


Figure 6.

Dans le cas d'une courbe d'effacement de consommation égal à 1 %, les résultats de la minimisation sont :

- capacité de stockage = 0,245 TWh ;
- puissance nominale = 116,8 GW (dont 74,6 GW éolien et 42,2 GW solaire) ;
- coût = 141,3 G€ (dont 24,5 G€ investissement production énergie).

Observations

1) Pour simplifier la minimisation, nous avons choisi la même valeur en termes de coût d'investissement pour les capacités de production éolien et les capacités de production solaire. En fait, lors de la construction des courbes d'effacement de consommation, nous pourrions traiter séparément la production d'énergie éolienne et

celle d'énergie solaire (plutôt que de garder leur rapport constant). Dans ce cas, nous n'aurions pas deux, mais trois variables (puissance éolienne, puissance solaire, et capacité de stockage), et nous obtiendrions alors des surfaces bidimensionnelles d'effacement constant plutôt que des courbes. La minimisation du coût total ferait alors intervenir deux valeurs différentes : une pour le coût d'investissement des capacités de production éolienne et une autre pour celui des capacités de production solaire. Pour une surface d'effacement constant, trouver le coût total minimal revient à trouver la distance minimale entre l'origine et le plan tangent à cette surface.

2) Nous avons fait le choix de ne prendre en compte que les coûts d'investissement. Mais il faudrait également introduire le coût d'exploitation des installations. Effectivement, dans un premier temps, l'on peut se contenter pour procéder à l'analyse des coûts d'investissement ; une analyse plus fine pourra être faite lors de travaux ultérieurs afin de prendre également en compte les coûts d'exploitation.

3) Une hypothèse forte du modèle est le fait de considérer que le pilotage fourni par l'hydraulique (pour faire face aux fluctuations de consommation et à la variabilité des productions éolienne et solaire) reste le même quand on arrête la production à partir d'énergies fossiles. Se pose également la question de l'utilisation du nucléaire, au moins partiellement, pour effectuer ce pilotage.

Bref, si l'on arrête la production fossile, la stratégie de pi-

lotage nucléaire + hydraulique serait probablement différente par rapport à la stratégie actuelle, celle retenue dans la modélisation. Dans quelle mesure cela permettrait-il de baisser les capacités de stockage et les puissances installées éolien et solaire ? Cette question pourra être abordée dans le cadre d'une analyse ultérieure.

4) Un problème d'ordre technique du modèle est l'utilisation de variables discrètes concernant l'effacement de consommation (nombre demi-heures d'effacement / 17 520). Cela pourrait impliquer une convexité moins marquée des courbes d'effacement de production, avec un effet négatif sur la minimisation des coûts, surtout pour les courbes de faible valeur d'effacement de consommation (1 %).

Comme nous le verrons par la suite, la minimisation du coût total sur trois années consécutives aboutit à des valeurs très proches. En revanche, il existe une certaine dispersion entre les valeurs de la capacité de production et celle de stockage. Nous avons observé que, successivement, sur les trois années, une plus faible valeur de l'une est compensée par une plus forte valeur de l'autre, pour aboutir finalement à un coût total pratiquement constant, ce qui est visiblement le signe d'une faible convexité.

Il serait alors intéressant de refaire cette simulation en remplaçant les variables discrètes de l'effacement de consommation par des variables continues : par exemple, le « déficit d'énergie » = énergie consommée - énergie produite - stockage.

Résultats

Année 2015

1) Scénario nuc72 %

On garde un même niveau de production de nucléaire, d'hydraulique et de bioénergie. On enlève les énergies fossiles (fioul, gaz, charbon) que l'on remplace par de l'éolien et du solaire (on garde le rapport éolien/solaire = 1,67).

| Effacement consommation (%) | Capacité stockage (TWh) | Puissance totale (GW) | dont éolien (GW) | dont solaire (GW) | Coût (G€) | dont investissement | Effacement production (%) |
|-----------------------------|-------------------------|-----------------------|------------------|-------------------|-----------|---------------------|---------------------------|
| 1 | 0,331 | 68,7 | 43,0 | 25,7 | 101,9 | 33,1 | 73,6 |
| 2 | 0,254 | 65,9 | 41,2 | 24,7 | 91,2 | 25,4 | 71,7 |
| 3 | 0,172 | 66,0 | 41,3 | 24,7 | 83,2 | 17,2 | 72,4 |
| 5 | 0,107 | 65,0 | 40,7 | 24,4 | 75,8 | 10,7 | 72,8 |
| 10 | 0,070 | 56,8 | 35,5 | 21,3 | 63,8 | 7,0 | 67,2 |

2) Scénario nuc50 %

On réduit la part du nucléaire à 50 % ; on garde au même niveau l'hydraulique et la bioénergie. On enlève le fossile (fioul, gaz, charbon) et on le remplace par de l'éolien et du solaire (on garde le rapport éolien/solaire = 1,67).

| Effacement consommation (%) | Capacité stockage (TWh) | Puissance totale (GW) | dont éolien (GW) | dont solaire (GW) | Coût (G€) | dont investissement | Effacement production (%) |
|-----------------------------|-------------------------|-----------------------|------------------|-------------------|-----------|---------------------|---------------------------|
| 1 | 1,062 | 213,3 | 133,4 | 79,9 | 319,5 | 106,2 | 60,6 |
| 2 | 0,669 | 216,1 | 135,2 | 80,9 | 283,1 | 66,9 | 61,9 |
| 3 | 0,455 | 215,7 | 134,9 | 80,8 | 261,3 | 45,5 | 62,2 |
| 5 | 0,441 | 188,3 | 117,8 | 70,5 | 232,4 | 44,1 | 53,3 |
| 10 | 0,231 | 170,7 | 106,8 | 69,9 | 193,8 | 23,1 | 47,4 |

3) Scénario nuc0%

On se passe complètement du nucléaire ; on garde au même niveau l'hydraulique et la bioénergie. On enlève le fossile (fioul, gaz, charbon) et on le remplace par de l'éolien et du solaire (on garde le rapport éolien/solaire = 1,67).

| Effacement consommation (%) | Capacité stockage (TWh) | Puissance totale (GW) | dont éolien (GW) | dont solaire (GW) | Coût (G€) | dont investissement | Effacement production (%) |
|-----------------------------|-------------------------|-----------------------|------------------|-------------------|-----------|---------------------|---------------------------|
| 1 | 2,431 | 489,1 | 305,9 | 183,2 | 732,3 | 243,1 | 58,0 |
| 2 | 1,557 | 480,0 | 300,2 | 179,8 | 635,7 | 155,7 | 57,4 |
| 3 | 1,043 | 481,9 | 301,4 | 180,5 | 586,1 | 104,3 | 58,0 |
| 5 | 0,605 | 464,6 | 290,6 | 174,0 | 525,1 | 60,5 | 56,4 |
| 10 | 0,523 | 384,0 | 240,2 | 143,8 | 436,2 | 52,3 | 43,1 |

Année 2016

1) Scénario nuc 72 %

On garde un même niveau de production de nucléaire, d'hydraulique et de bioénergie. On enlève le fossile (fioul, gaz, charbon) et on le remplace par de l'éolien et du solaire (on garde le rapport éolien/solaire = 1,723).

| Effacement consommation (%) | Capacité stockage (TWh) | Puissance totale (GW) | dont éolien (GW) | dont solaire (GW) | Coût (G€) | dont investissement | Effacement production (%) |
|-----------------------------|-------------------------|-----------------------|------------------|-------------------|-----------|---------------------|---------------------------|
| 1 | 0,303 | 96,9 | 61,3 | 35,6 | 127,1 | 30,3 | 73,6 |
| 2 | 0,171 | 97,2 | 61,5 | 35,7 | 114,3 | 17,1 | 74,4 |
| 3 | 0,130 | 94,3 | 59,7 | 34,6 | 107,3 | 13,0 | 73,5 |
| 5 | 0,084 | 88,0 | 55,7 | 32,3 | 96,4 | 8,4 | 70,7 |
| 10 | 0,072 | 74,3 | 47,0 | 27,3 | 81,5 | 7,2 | 62,6 |

2) Scénario nuc50 %

On réduit la part du nucléaire à 50 % ; on garde au même niveau l'hydraulique et la bioénergie. On enlève le fossile (fioul, gaz, charbon) et on le remplace par de l'éolien et du solaire (on garde le rapport éolien/solaire = 1,723).

| Effacement consommation (%) | Capacité stockage (TWh) | Puissance totale (GW) | dont éolien (GW) | dont solaire (GW) | Coût (G€) | dont investissement | Effacement production (%) |
|-----------------------------|-------------------------|-----------------------|------------------|-------------------|-----------|---------------------|---------------------------|
| 1 | 0,842 | 213,8 | 135,3 | 78,5 | 298,1 | 84,2 | 58,3 |
| 2 | 0,504 | 211,9 | 134,1 | 77,8 | 262,3 | 50,4 | 58,3 |
| 3 | 0,364 | 209,6 | 132,6 | 77,0 | 246,0 | 36,4 | 57,9 |
| 5 | 0,263 | 197,1 | 124,7 | 72,4 | 223,4 | 26,3 | 54,2 |
| 10 | 0,222 | 169,7 | 107,4 | 62,3 | 191,9 | 22,2 | 44,0 |

3) Scénario nuc0 %

On se passe complètement du nucléaire ; on garde au même niveau l'hydraulique et la bioénergie. On enlève le fossile (fioul, gaz, charbon) et on le remplace par de l'éolien et du solaire (on garde le rapport éolien/solaire = 1,723).

| Effacement consommation (%) | Capacité stockage (TWh) | Puissance totale (GW) | dont éolien (GW) | dont solaire (GW) | Coût (G€) | dont investissement | Effacement production (%) |
|-----------------------------|-------------------------|-----------------------|------------------|-------------------|-----------|---------------------|---------------------------|
| 1 | 2,188 | 454,4 | 287,5 | 166,9 | 673,2 | 218,8 | 48,5 |
| 2 | 1,310 | 454,8 | 287,8 | 167,0 | 585,8 | 131,0 | 49,1 |
| 3 | 0,904 | 454,6 | 287,7 | 166,9 | 545,0 | 90,4 | 49,5 |
| 5 | 0,544 | 445,0 | 281,6 | 163,4 | 499,4 | 54,4 | 48,9 |
| 10 | 0,497 | 383,5 | 242,7 | 140,8 | 433,2 | 49,7 | 38,8 |

Année 2017

1) Scénario nuc72 %

On garde un même niveau de production de nucléaire, d'hydraulique et de bioénergie. On enlève le fossile (fioul, gaz, charbon) et on le remplace par de l'éolien et du solaire (on garde le rapport éolien/solaire = 1,770).

| Effacement consommation (%) | Capacité stockage (TWh) | Puissance totale (GW) | dont éolien (GW) | dont solaire (GW) | Coût (G€) | dont investissement | Effacement production (%) |
|-----------------------------|-------------------------|-----------------------|------------------|-------------------|-----------|---------------------|---------------------------|
| 1 | 0,245 | 116,8 | 74,6 | 42,2 | 141,3 | 24,5 | 75,3 |
| 2 | 0,154 | 114,9 | 73,4 | 41,5 | 130,3 | 15,4 | 74,9 |
| 3 | 0,151 | 108,8 | 69,5 | 39,3 | 123,9 | 15,1 | 72,8 |
| 5 | 0,168 | 95,2 | 60,8 | 34,4 | 112,0 | 16,8 | 65,4 |
| 10 | 0,093 | 85,6 | 54,7 | 30,9 | 94,9 | 9,3 | 60,4 |

2) Scénario nuc50 %

On réduit la part du nucléaire à 50 % ; on garde au même niveau l'hydraulique et la bioénergie. On enlève le fossile (fioul, gaz, charbon) et on le remplace par de l'éolien et du solaire (on garde le rapport éolien/solaire = 1,770).

| Effacement consommation (%) | Capacité stockage (TWh) | Puissance totale (GW) | dont éolien (GW) | dont solaire (GW) | Coût (G€) | dont investissement | Effacement production (%) |
|-----------------------------|-------------------------|-----------------------|------------------|-------------------|-----------|---------------------|---------------------------|
| 1 | 0,603 | 264,3 | 168,9 | 95,4 | 324,6 | 60,3 | 67,4 |
| 2 | 0,403 | 261,6 | 167,2 | 94,4 | 301,9 | 40,3 | 67,3 |
| 3 | 0,363 | 241,6 | 154,4 | 87,2 | 277,9 | 36,3 | 62,7 |
| 5 | 0,367 | 212,4 | 135,7 | 76,7 | 249,1 | 36,7 | 54,8 |
| 10 | 0,248 | 186,5 | 119,2 | 67,3 | 211,3 | 24,8 | 46,8 |

3) Scénario nuc0%

On se passe complètement du nucléaire ; on garde au même niveau l'hydraulique et la bioénergie. On enlève le fossile (fioul, gaz, charbon) et on le remplace par de l'éolien et du solaire (on garde le rapport éolien/solaire = 1,770).

| Effacement consommation (%) | Capacité stockage (TWh) | Puissance totale (GW) | dont éolien (GW) | dont solaire (GW) | Coût (G€) | dont investissement | Effacement production (%) |
|-----------------------------|-------------------------|-----------------------|------------------|-------------------|-----------|---------------------|---------------------------|
| 1 | 1,483 | 581,8 | 371,8 | 210,0 | 730,1 | 148,3 | 62,9 |
| 2 | 0,950 | 579,4 | 370,2 | 209,2 | 674,4 | 95,0 | 63,1 |
| 3 | 0,898 | 530,9 | 339,2 | 191,7 | 620,7 | 89,8 | 57,9 |
| 5 | 0,804 | 477,0 | 304,8 | 172,2 | 557,4 | 80,4 | 51,5 |
| 10 | 0,648 | 409,0 | 261,3 | 147,7 | 473,8 | 61,3 | 40,9 |

Scénarios pour 1 % effacement consommation

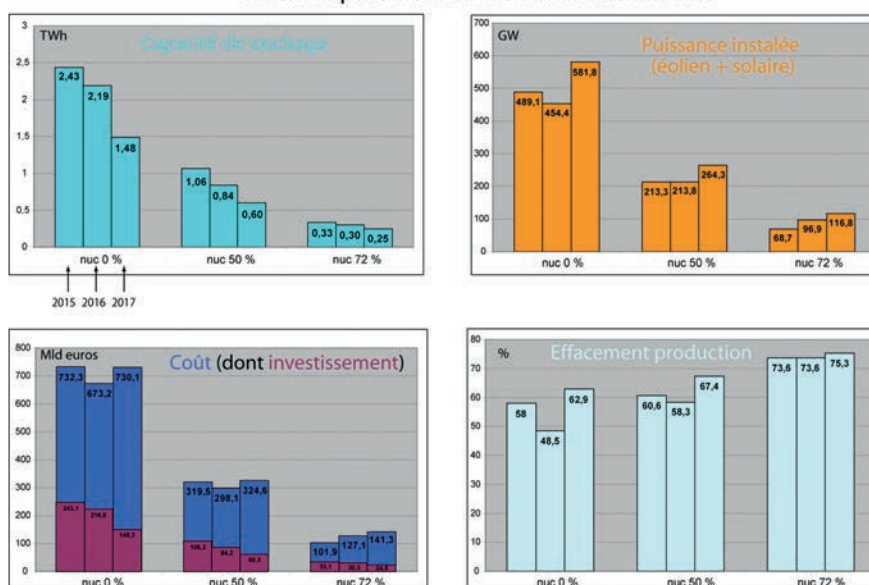


Figure 7.

Conclusions

L'analyse suivante prend en compte l'effacement de consommation à 1 %, cela représente néanmoins plus de trois jours et demi de coupure d'électricité par an. On prend ensuite en compte les valeurs moyennes sur les trois années des résultats de la simulation : coût total, puissance installée, capacité de stockage et effacement de production.

Scénario nuc0 %

- Le coût total de ce scénario se situe autour de 700 Md€, ce qui représente environ 30 % du PIB de la France.
- La puissance installée est de près de 500 GW, soit environ 320 GW d'éolien et 180 GW de solaire, ce qui correspond à une augmentation d'un facteur 23 par rapport à la capacité actuelle. Avec une limite supérieure du flux moyen d'énergie solaire de 25 W/m², cela demande une surface d'au moins 7 200 km², et du flux moyen d'énergie éolienne de 2-3 W/m², il faut donc prévoir de mobiliser une surface de 130 000 km² (soit 23 % de la surface de la France !).
- Une valeur faible de l'effacement de consommation conduit à une forte valeur de l'effacement de production (55 %).
- La capacité de stockage est relativement élevée (2 TWh) ; se pose alors la question de sa faisabilité technique.

Une telle solution énergétique est irréaliste.

Scénario nuc50 %

- Le coût total diminue de plus d'un facteur 2 par rapport au scénario précédent (nuc0 %).
- La puissance installée (éolien et solaire) diminue de moitié.
- La capacité de stockage est réduite d'un facteur 2,5.

Mais les 150 GW d'éolien de cette solution nécessitent de mobiliser une surface correspondant à 60 000 km² (soit 10 % de celle de la France). De même, cette solution repose sur de fortes valeurs d'effacement de production (60 %).

Le déploiement de l'éolien sur une telle surface semble peu probable.

Scénario nuc72 % (situation actuelle)

- Le coût total diminue d'un facteur 2,5 par rapport au scénario précédent (nuc50 %).
- La puissance installée (éolien et solaire) est réduite d'un facteur 2,4.
- La capacité de stockage, quant à elle, baisse d'un facteur 2,8.

Mais les 60 GW d'éolien de cette solution nécessitent de mobiliser une surface de 25 000 km² (soit 4,5 % de la surface de la France). Une solution qui repose, elle aussi, sur de fortes valeurs d'effacement de production (70 %).

Il reste à vérifier si le déploiement de l'éolien sur une telle surface est réaliste et si le financement de cette solution reste possible, son coût total étant de 120 Md€, soit plus de 5 % du PIB de la France.

Annexe

Puissances installées en France (données RTE)

| Puissance | 2015 | | 2016 | | 2017 | |
|-------------|---------|------|---------|------|---------|------|
| | MW | % | MW | % | MW | % |
| Fioul | 8 645 | 6,7 | 7 137 | 5,5 | 4 098 | 3,1 |
| Gaz | 10 901 | 8,4 | 11 712 | 9,0 | 11 851 | 9,1 |
| Charbon | 3 007 | 2,3 | 2 997 | 2,3 | 2 997 | 2,3 |
| Nucléaire | 63 130 | 48,8 | 63 130 | 48,3 | 63 130 | 48,3 |
| Éolien | 10 312 | 8,0 | 11 670 | 8,9 | 13 559 | 10,4 |
| Solaire | 6 191 | 4,8 | 6 772 | 5,2 | 7 660 | 5,9 |
| Hydraulique | 25 421 | 19,7 | 25 482 | 19,5 | 25 517 | 19,5 |
| Bioénergies | 1 703 | 1,3 | 1 910 | 1,5 | 1 949 | 1,5 |
| Total | 129 310 | | 130 118 | | 130 761 | |