

Un outil de simulation du système électricité hydrogène et chaleur – avec production de froid

L'apport de ce logiciel SimelSP5 est de confronter heure par heure la possibilité de production d'électricité disponible et les besoins de chaleur d'un réseau de chaleur.

Les quantités d'électricité disponibles sont, heure par heure, la différence entre les possibilités physiques de production et les quantités « contraintes », c'est-à-dire celles qui doivent être produites pour répondre à des obligations dues à des contrats de fourniture, ou à une réglementation, ou aux besoins d'équilibrage du réseau électrique.

Il est possible de produire de l'hydrogène et de la chaleur sans utiliser l'électricité du réseau électrique ou en l'utilisant. Si l'on connaît les besoins de la consommation finale d'électricité, d'hydrogène et de chaleur, et si l'on connaît le coût de l'hydrogène et de la chaleur produits sans utiliser l'électricité du réseau, le simulateur calcule combien dépenser pour répondre à la demande finale d'électricité de chaleur et d'hydrogène.

Quelques utilisations possibles de cette simulation

- Comparer en quelques secondes plusieurs jeux d'hypothèses

Par exemple : la sensibilité des résultats à la capacité des PAC (pompes à chaleur) et à la valeur de leurs COP (coefficients de performance) ; l'utilité des chaudières à flamme pour éviter que certaines PACs ne fonctionnent que très peu de temps ; la capacité des moyens de stockage de chaleur selon le coût du stockage ; le coût des équipements en investissement et en frais annuels de gestion ; etc.

- Evaluer l'utilité d'un nouveau réseau de chaleur alimenté en partie par l'électricité du réseau

Cela peut se faire en comparant trois hypothèses : production de chaleur (et éventuellement de froid) sur le lieu de la consommation par des pompes à chaleur éventuellement réversibles) ou par des chaudières à flamme ; production de chaleur (et de froid) de façon centralisée avec un réseau de chaleur (et de froid) Comme les optimums sont plats, des configurations sensiblement différentes peuvent donner des résultats très proches.

Le logiciel de simulation SimelSP5 est une extension du logiciel SimelSP3 qui représente le système électricité-hydrogène (et qui est publié) et qui a été complété par un module représentant la production de chaleur à partir de l'électricité du réseau.

Les pompes à chaleur qui mettent de la chaleur en stock peuvent puiser leur chaleur dans les locaux à rafraîchir.

Le plan de cette note

Introduction

A- Le système électricité, hydrogène et chaleur

A-1- Le besoin de chaleur du réseau de chaleur ; la production de froid

A-2- Le stockage de chaleur

A.3- Pour produire de la chaleur

A.3.1- Electricité « contrainte » et électricité « disponible »

A-3-2- Chaudière électrique, pompe à chaleur, chaudière à flamme

A-4 - Les flux d'électricité et de chaleur

B- Le modèle de simulation du système électricité, hydrogène et chaleur

B-1 Le mode de simulation

B-2 Une extension de SimelSP3, simulateur du système électricité-hydrogène

B-3- Les données à introduire dans SimelSP5

B.4- Les résultats donnés par SimelSP5

B.4.1- Résultats sur une année

B-4-2 Pour visualiser et quantifier les différentes parties du système

A – Première partie : le système électricité, hydrogène et chaleur

A-1- Le besoin de chaleur du réseau de chaleur ; la production de froid

Au stade actuel, le logiciel de simulation peut utiliser l'un ou l'autre de deux profils horaires de consommation de chaleur.

L'un a été construit récemment à partir d'une chronique horaire élaborée en vue d'une thèse sur la production de la chaleur pour réseaux urbains ; cette chronique horaire est accessible ici : <https://cea-liten-heatpro-app.streamlit.app>.

L'autre profil de consommation a été construit à partir de la chronique horaire de consommation retenue par l'ADEME pour sa « vision 2050 » sans production d'électricité nucléaire et émissions de gaz carbonique. Il est facile d'introduire d'autres profils de consommation de chaleur.

L'ADEME, suite à une demande, avait refusé de publier son logiciel de simulation du système électrique, dont elle n'avait pas la propriété intellectuelle, mais a accepté de publier le détail de ses hypothèses, parmi lesquelles les chroniques horaires de consommation par type d'usage. J'ai ajouté à la consommation pour le chauffage, très modulée selon la saison, une consommation constante reflétant la consommation d'eau chaude et la consommation par l'industrie. Celle-ci peut être ajustée par l'utilisateur du logiciel. Il est regrettable que RTE se refuse à communiquer les hypothèses qu'il retient pour ses scénarios.

La consommation des réseaux de chaleur est aujourd'hui de 25 TWh/an. La PPE (programmation pluriannuelle de l'énergie) envisage une augmentation modérée, limitée par l'évaluation qui a été faite des ressources renouvelables ou de récupération.

Avec l'utilisation d'électricité « de récupération », il est possible d'envisager un changement radical. Par exemple 100 ou 150 TWh/an.

Lorsqu'une PAC qui met de la chaleur en stocke puise cette chaleur dans les locaux que l'on souhaite rafraîchir, il y a la fois « production » de chaleur et « production » de froid ; et la production de chaleur se fait avec un COP assez élevé.

A-2- Le stockage de chaleur

SimelSP5 représente deux modes de stockage, qui diffèrent par leur coût.

La recharge d'un stockage « peu cher » peut consister par exemple à élever la température des stocks de chaleur existants, notamment les réservoirs de réseaux de chaleur géothermiques.

Pour maintenir en température ces réservoirs, la quantité de chaleur serait égale à la production annuelle du réseau de chaleur augmentée des pertes de stockage. Si l'apport de chaleur élève la température, cela permet d'augmenter les quantités de chaleur délivrées par le réseau sans avoir à faire de nouvelles dépenses.

Aujourd'hui la production des réseaux de chaleur géothermiques est voisine de 3 TWh/an.

Un stockage « plus cher » est un stockage géothermique qui consiste à réchauffer des roches à 200 ou 300 mètres de profondeur à l'aide d'un ensemble de sondes où circulent vers la capacité de stockage de l'eau réchauffée par l'électricité du réseau électrique et, hors du stockage, de l'eau servant à porter la chaleur au réseau de chaleur.

Pour chaque type de stockage, l'utilisateur de SimelSP5 introduit la capacité, les pertes de stockage, le montant de l'investissement et des dépenses annuelles de gestion.

Les pertes de stockage géologique intersaisonnier peuvent être selon le cas de 30 à 60 % (thèse de M. Leurent, p.107).

A.3- Pour produire de la chaleur

A.3.1- Electricité « contrainte » et électricité « disponible »

Il est habituel de distinguer une fourniture d'électricité pour la « consommation finale » et des « excédents » de possibilités de production de production. Ici nous distinguons, d'une part, une production d'électricité « contrainte » du fait que le fournisseur s'est engagé à répondre aux besoins des consommateurs au moment convenu et, d'autre part, une possibilité de production « disponible » à ceux qui veulent l'utiliser mais sans engagement du producteur.

Lorsque le consommateur accepte de déplacer ou d'effacer (définitivement) sa consommation, cela est compté ici comme une capacité de « stockage », mesurée en quantité d'énergie (en GWh, gigawattheure) ou comme une capacité de production, mesurée en puissance (GW, gigawatt) mise à la disposition du producteur.

Pour produire de l'hydrogène, l'électrolyse est alimentée à puissance constante sauf effacement, c'est-à-dire avec de l'électricité contrainte, et en partie en électricité disponible. Pour l'utilisation de l'électricité disponible, elle a la priorité sur la production de chaleur.

A-3-2- Chaudière électrique, pompe à chaleur, chaudière à flamme

La chaudière électrique est beaucoup moins coûteuse que la PAC, surtout lorsque le facteur de charge de la PAC est bas ; de plus la chaudière est indifférente aux brutales variations de puissance. Elle utilise l'électricité de façon beaucoup moins efficace que la PAC mais cela n'a guère d'effet si l'électricité disponible est abondante.

La PAC peut produire du froid en même temps que du chaud, ce qui est un gros avantage si le froid est valorisé. De plus, une même PAC peut produire de la chaleur à mettre en stock puis remonter en température la chaleur déstockée pour l'introduire dans le réseau de chaleur, et encore produire puiser de la chaleur dans l'environnement en période de chauffage.

Si la chaleur produite à partir d'électricité disponible et livrée au réseau en passant ou non par le stockage ne suffit pas, il faut un complément de chaleur qui présente des « pointes » de puissance auxquelles les pompes à chaleur ne peuvent répondre : certaines d'entre elles ne fonctionneraient que quelques dizaines d'heures par saison. Dans ces moments de pointe, la valeur de l'électricité est trop élevée (jusqu'à plusieurs centaines d'euros par MWh) pour une chaudière électrique. Il faut alors un apport de chaleur par une chaudière à flamme.

A.4- Les flux d'électricité et de chaleur

La chaleur est produite de plusieurs façons :

1- par des pompes à chaleur ou des chaudières électriques alimentées par de l'électricité « disponible » après la production d'hydrogène ; les pompes à chaleur prennent la chaleur dans le milieu extérieur le plus souvent en saison chaude. Heure par heure, dans la limite des besoins du réseau de chaleur, la chaleur produite par la chaudière électrique est injectée directement et, selon le choix de l'utilisateur du simulateur, la chaleur produite par les PACs peut, ou non, être injectée directement dans le réseau ; la chaleur qui n'est pas mise directement dans le réseau est mise en stock dans la limite de capacité du stockage ;

Les chaudières électriques ne sont probablement pas efficaces, comparées aux PACs.

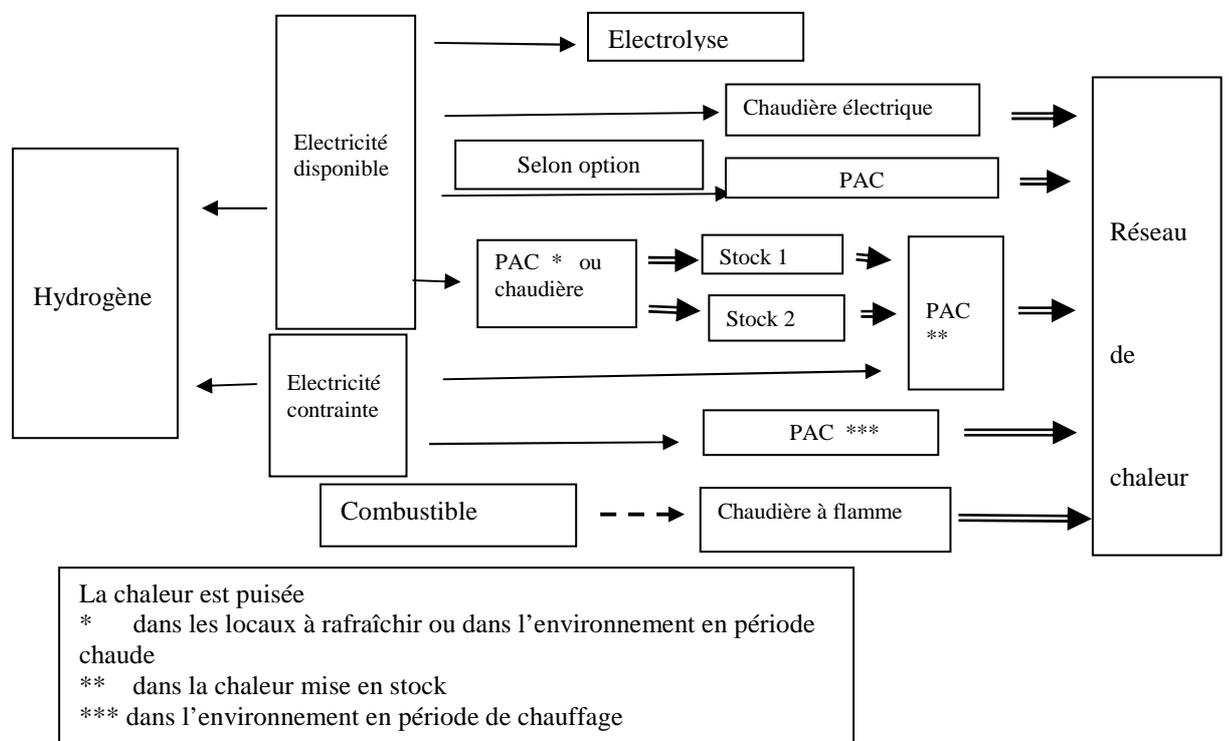
2- par des pompes à chaleur qui remontent en température la chaleur déstockée pour l'introduire dans le réseau de chaleur ; l'électricité consommée est ici « contrainte » ;

3- par des pompes à chaleur qui prennent la chaleur dans le milieu extérieur en saison froide et l'injectent directement dans le réseau ; l'électricité consommée est « contrainte » ;

4- des chaudières à flamme lorsque la chaleur venant du déstockage ne suffit pas répondre aux besoins ;

Electricité contrainte : le niveau de production d'électricité, heure par heure, est contraint soit par contrat, soit par la réglementation, soit par les nécessités physiques.

Electricité disponible : possibilité de production qui dépasse l'électricité contrainte, disponible sans garantie par le fournisseur.



Les PACs ont donc quatre fonctions : puiser la chaleur dans l'environnement ou dans les locaux que l'on souhaite refroidir avec de l'électricité disponible et la livrer directement au réseau ou la mettre en stock. Produire de la chaleur avec de l'électricité contrainte pour relever la température de la chaleur déstockée ou pour puiser de la chaleur dans l'environnement. Ce faisant, elles peuvent aussi produire du froid.

B- Le modèle de simulation du système électricité, hydrogène et chaleur

B-1- Le mode de simulation

Le but est de répondre à une demande finale d'électricité, d'hydrogène et de chaleur pour réseaux de chaleur. L'hydrogène et la chaleur sont produits partiellement à partir de l'électricité du réseau et, pour le complément, par un autre moyen dont on connaît le coût. Le froid est un co-produit pouvant être valorisé ; les possibilités de production d'électricité qui restent disponibles après production de d'hydrogène et de chaud sont valorisées pour autre chose, notamment l'exportation, ou abandonnées.

SimelSP5 simule le système formé par :

- la production et le stockage d'électricité
- la production et le stockage d'hydrogène et de chaleur à partir de ce système électrique
- la production de chaleur complémentaire permettant de répondre aux besoins des réseaux de chaleur.

Simel5 calcule heure par heure les quantités produites, stockées, déstockées et livrées d'électricité, et celles de l'hydrogène et de la chaleur produits à partir de l'électricité. Connaissant le coût de l'hydrogène produit autrement qu'à partir de l'électricité du réseau et le coût du combustible de chaudières à flamme, SimelSP5 calcule les dépenses totales permettant de répondre à la consommation finale d'électricité, d'hydrogène et de chaleur. Il calcule aussi les possibilités de production de froid.

Pour chaque jeu d'hypothèses, SimelSP5 donne ses résultats en quelques secondes, non seulement les résultats annuels mais, heure par heure, le détail des productions, mises en stock et déstockages d'électricité, d'hydrogène et de chaleur, livraison de chaleur, livraison de froid et production de chaleur complémentaire pour répondre aux besoins.

Pour la production de chaleur, il propose plusieurs options selon que la chaleur est produite par chaudière électrique ou par pompe à chaleur, PAC ; il différencie les COP des PACs selon que la chaleur pompée est trouvée dans l'environnement en saison chaude ou froide ou dans le stockage de chaleur ; il simule deux modes de stockage de chaleur, plus ou moins coûteux.

Cela permet notamment *d'évaluer les dépenses totales* permettant de répondre à la demande finale d'électricité, d'hydrogène et de chaleur selon la façon dont est constitué le parc de production et de stockage d'électricité, d'hydrogène et de chaleur et selon le coût de l'hydrogène et de la chaleur produits hors de ce système.

Le moyen de simulation utilisé ici, SimelSP5 peut tester toutes sortes de configurations : une capacité plus ou moins grande de PACs et chaudières électriques, différentes capacités de stockage de chaleur ; différents parcs de production d'électricité et d'hydrogène. Il peut aussi simuler le cas où la seule source de chaleur est une chaudière à flamme, ce qui permet d'évaluer l'avantage d'un réseau qui distribue une chaleur produite à partir d'électricité disponible.

Parmi les nombreux résultats de cette simulation, il est possible d'évaluer si la différence de dépenses totales selon que l'on utilise ou non de l'électricité du système électrique pour produire de la chaleur permet de financer un nouveau réseau de chaleur.

La possibilité de produire de la chaleur par chaudière électrique a été introduite car ce moyen coûte peu en investissement et supporte parfaitement de brusques variations de puissance, mais il est très généralement plus coûteux que des pompes à chaleur puisqu'une même pompe à chaleur rend plusieurs services différents.

B-2 Une extension de SimelSP3, simulateur du système électricité-hydrogène

SimelSP5 est une extension de SimelSP3, simulateur du système électricité et hydrogène, qui est publié. SimelSP5 comporte, en plus, la simulation de la production de chaleur pour répondre aux besoins des réseaux de chaleur : d'une part la chaleur produite à partir de l'électricité du réseau électrique, d'autre part, si besoin un complément par chaudière à flamme.

Quelques propriétés de SimelSP3, simulateur du système de production et de stockage d'électricité et de production d'hydrogène

Connaissant les capacités de production et de stockage d'électricité, SimelSP3 calcule heure par heure ce que doit être la production à partir de gaz pour que la fourniture de courant soit égale à la demande finale augmentée de la consommation des électrolyseurs alimentés en base. Si les possibilités de production à coût très faible ou nul (éolien, photovoltaïque, hydraulique, nucléaire) dépassent le besoin de cette consommation, la différence est mise en stock dans la mesure du possible, ou utilisée pour produire de l'hydrogène « sur excédents », ou pour autre chose.

Les moyens de stockage et la flexibilité de la consommation et de la production hydraulique permettent de mieux utiliser les possibilités de production éolienne et photovoltaïque, ce qui se mesure en TWh/an; ils permettent aussi de diminuer le besoin de capacité de production pilotable, ce qui se mesure en GW. SimelSP3 rend compte de ces deux services.

La stabilité du réseau électrique exige que la production d'électricité par des machines tournantes soit au-dessus d'une limite minimale. Celle-ci peut être abaissée par des moyens spécifiques. SimelSP3 rend compte de cette contrainte.

L'hydrogène peut être produit ou bien à puissance constante sauf lorsqu'il est nécessaire de faire fonctionner les moyens de production d'électricité les plus coûteux ou bien sur les possibilités de production d'électricité qui dépassent les besoins de la consommation finale et ceux de l'électrolyse fonctionnant à puissance constante.

SimelSP3 et SielSP5 sont des tableaux excel. Il a fallu, rarement, contourner les difficultés nées de « références croisées ».

B-3- Les données à introduire dans SimelSP5

Comme avec SimelSP3, l'utilisateur de SimelSP5 introduit la consommation finale d'électricité en une année et heure par heure, et les capacités d'électrolyse alimentées à puissance constante sauf effacement ou sur l'électricité disponible –appelée généralement « excédentaire ».

Il introduit aussi les caractéristiques du système électrique : capacité des moyens de production en puissance, capacité des moyens de stockage, ampleur des flexibilités, etc.

. Pour le détail, voir sur www.hprevot.fr/calcul-parc-prod-electr.html

Puis l'utilisateur introduit les données propres à la consommation, à la production et au stockage de chaleur, y compris la chaleur produite par des chaudières à flamme, à savoir :

- La consommation annuelle de chaleur et son profil horaire.
- La capacité des PACs et celle des chaudières électriques alimentées en électricité disponible ; leur coût
- L'option choisie selon que les PACs qui consomment de l'électricité disponible peuvent ou non alimenter directement les réseaux de chaleur, c'est-à-dire sans passer par le stockage.
- Les coefficients de performance des PACs selon leur usage : **1-** pour puiser de la chaleur dans l'environnement hors période de chauffage ou dans les locaux à rafraîchir, **2-** pour remonter en température la chaleur déstockée (alors, la source chaude est l'eau en sortie de stockage), **3-** puiser de la chaleur dans l'environnement en période de chauffage.
- Une capacité du stockage « pas cher » et celle d'un stockage « coûteux » ; leur taux de pertes ; leur coût.
- La capacité des chaudières à flamme qui apportent le complément de chaleur

Pour le cas où la chaleur déstockée suffit à répondre aux besoins du réseau de chaleur :

L'utilisateur introduit une capacité de chaudière à flamme nulle ; puis il augmente la capacité du stockage jusqu'à annuler la production de chaleur par des PAC qui puisent leur chaleur dans l'environnement en période de chauffage.

Pour le cas où la chaleur serait produite seulement par chaudière à flamme

Alors l'utilisateur du simulateur introduit des valeurs nulles pour les PAC alimentées par de l'électricité disponible et pour la capacité des stockages. Le simulateur calcule le besoin de PAC complémentaires (puisant leur chaleur dans l'environnement en période de chauffage). L'utilisateur ajuste la capacité de la chaudière à flamme de façon à annuler ce besoin de PAC complémentaire.

- La valeur du combustible consommé par les chaudières à flamme.

- La valeur de l'hydrogène produit autrement qu'à partir du système électricité, hydrogène et chaleur.
- La quantité de froid valorisée, en proportion de ce qui peut être produit, et sa valorisation en euros par MWh.
- De même pour les possibilités de production d'électricité qui restent disponibles.

Deux interventions de l'utilisateur pour obtenir les résultats

SimelSP5 calcule heure par heure le besoin d'électricité pour les PACs qui remontent la température à la sortie du stockage et pour celles qui apportent un complément en puisant de la chaleur dans l'environnement en période de chauffage. Dans les deux cas, la production d'électricité est « contrainte », heure par heure. Ce besoin de consommation se répercute de diverses façons dans le système. SimelSP5 calcule heure par heure cette nouvelle production contrainte. L'utilisateur recopie ces valeurs dans une colonne voisine. L'opération peut être reprise une ou deux fois de façon à stabiliser cette production rendue nécessaire pour répondre aux besoins de chaleur. C'est une façon « manuelle » de contourner la difficulté rencontrée par un tableur Excel face aux « références croisées ».

De même l'utilisateur introduit l'état de chaque stock de chaleur en début de période en copiant ce qu'il est en fin de période.

B.4- Les résultats donnés par SimelSP5

La simulation donne de très nombreux résultats : les quantités produites, stockées et déstockées heure par heure et pour l'ensemble de l'année ; le détail des dépenses annuelles.

SimelSP5 calcule notamment :

B.4.1- Résultats sur une année

Les dépenses permettant de répondre à la demande finale d'électricité, d'hydrogène et de chaleur, les dépenses totales pour répondre à cette demande

La quantité de froid pouvant être produite ; les quantités d'électricité disponibles pour la production d'hydrogène, de chaleur et de froid ou autre chose

Les dépenses totales déduction faite de la valorisation du froid et des autres usages, dont l'exportation ; ce résultat est utile pour comparer différentes façons de répondre à cette demande finale.

Le facteur de charge moyen des pompes à chaleur et de l'électrolyse

Les émissions de CO2 dues à la production d'électricité, d'hydrogène et de chaleur

Les dépenses directement imputables à la production de chaleur

Le total des dépenses fixes de PAC, chaudière électrique, chaudière à flamme ; le coût marginal de l'électricité nucléaire excédentaire ; le coût de l'énergie de la chaudière à flamme ; une valeur approchée des dépenses de production d'électricité « contrainte » consommée en période froide

Ces dépenses, rapportées à la quantité de chaleur produite, n'indiquent pas le « coût de la chaleur », car celui-ci se calcule en tenant compte du fait que la production de cette chaleur diminue, « toutes choses égales par ailleurs », les quantités d'électricité disponibles pour produire de l'hydrogène et pour autre chose.

B-4-2 Pour visualiser et quantifier les différentes parties du système

Sur la production, la consommation, le stockage et le déstockage de chaleur

Les quantités heure par heure et annuelles :

- la quantité de chaleur produite sur l'électricité disponible et livrée au réseau sans utiliser le stockage de chaleur ;
- la quantité de chaleur déstockée servant de source chaude à des PAC

- le besoin de PAC pour remonter en température la chaleur déstockée
- pour apporter le complément de chaleur
 - la production de chaleur par des chaudières à flamme, dont la capacité est une des données d'entrée
 - la capacité et la production des PACs qui puisent leur chaleur dans l'environnement en période de chauffage
- la capacité totale des pompes à chaleur, étant donné que celles qui fonctionnent « l'été » peuvent aussi fonctionner « l'hiver ».
- heure par heure, la production directe de chaleur, le mouvement de stockage et déstockage de chaleur.
- la consommation d'électricité du réseau électrique, selon qu'il s'agit d'une production disponible (que l'on peut qualifier de quasiment gratuite) ou d'une production contrainte (qui est coûteuse).
- Les possibilités de production d'électricité disponibles pour d'autres usages que la consommation finale d'électricité et la production d'hydrogène et de chaleur à partir de l'électricité de réseau.

Sur les dépenses de production d'électricité, d'hydrogène et de chaleur

- Les dépenses fixes et les dépenses de consommation d'énergie de chacun des moyens de production et de stockage d'électricité, d'hydrogène et de chaleur.
- Le total des dépenses de production d'électricité et d'hydrogène produit à partir de l'électricité du réseau.
- Les dépenses de production d'hydrogène autrement qu'à partir de l'électricité du réseau.
- Les dépenses fixes de production de chaleur.
- Les dépenses de production de chaleur en comparant les dépenses totales avec plus ou de moins de production de chaleur – dépenses totales après valorisation de la production de froid et des autres usages, notamment l'exportation.

La valorisation des exportations et celle du froid peuvent avoir un effet décisif sur le résultat économique d'une production de chaleur et de froid centralisée et distribuée par un réseau.

Voir par ailleurs le résultat de quelques simulations.