



La modélisation et la flexibilité du secteur énergétique

Exercice pratique 16 (EP_16)

Veillez utiliser la citation suivante au besoin:

- **Cet exercice pratique**

Pooya Hoseinpoori, Alex Kell & Adam Hawkes. (2021, March). Hands-on 16: Energy and Flexibility Modelling (Version 1.4). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4616943>

Veillez télécharger les fichiers requis en suivant le lien <https://doi.org/10.5281/zenodo.4616943>.

Résultats attendus des apprentissages

À la fin de cet exercice, vous devriez être en mesure de:

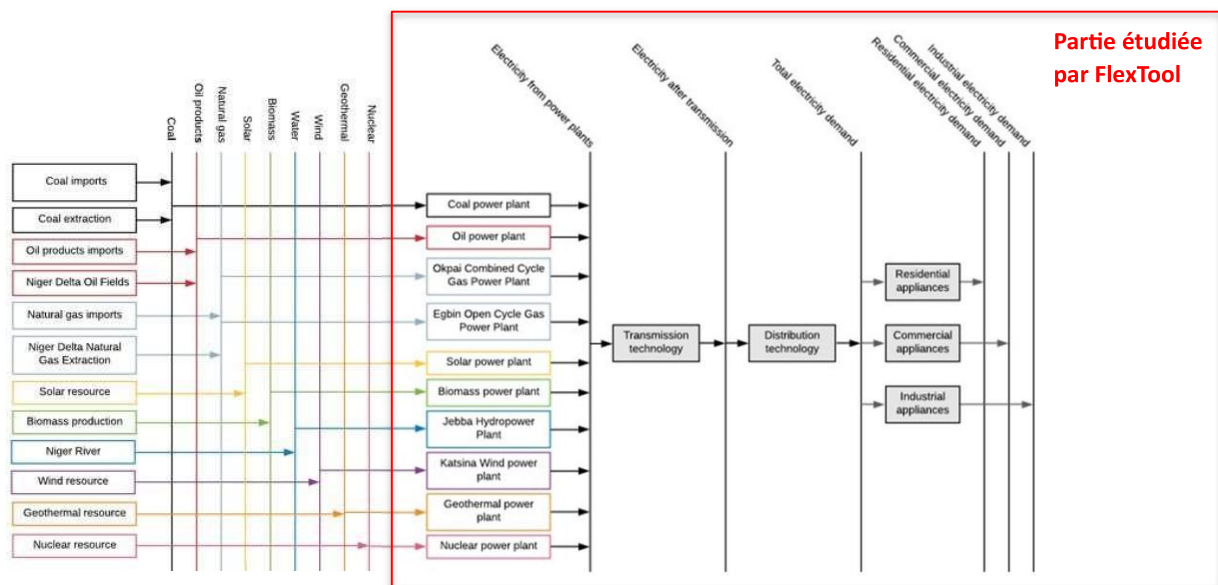
1. évaluer la flexibilité d'un système développé en utilisant OSeMOSYS;
2. ajouter les données de OSeMOSYS dans FlexTool;
3. reconstruire, dans FlexTool, un système développé initialement dans OSeMOSYS;
4. effectuer, pour le modèle créé dans FlexTool, une analyse de la sensibilité ainsi que de divers scénarios d'investissements.

Contexte

Dans la première partie de ce cours, nous avons vu comment utiliser OSeMOSYS afin de développer un modèle complet pour une région donnée. Dans la deuxième partie du cours, nous avons concentré nos efforts sur l'analyse de la flexibilité d'un système électrique en utilisant FlexTool. Ces deux outils possèdent des caractéristiques particulières. Dans cet exercice, nous présentons la façon dont ces deux approches

peuvent être utilisées pour développer et étudier divers aspects d'un système énergétique d'une région donnée. Ce dernier exercice pratique vous permettra d'évaluer la flexibilité du système électrique développé en utilisant OSeMOSYS dans la première partie du cours.

Il est important de noter que les limitations du système développé en utilisant OSeMOSYS sont différentes des limitations d'un système développé avec FlexTool. OSeMOSYS propose une approche globale allant de la production ou l'importation de diverses formes d'énergie primaire jusqu'à la satisfaction de diverses demandes d'énergie finale en passant par la production, la transformation, le transport et la distribution de formes d'énergie. Pour sa part, FlexTool se concentre sur l'évaluation de la flexibilité du réseau et de la production d'électricité, ne couvrant pas la description en amont de la production et de l'importation de formes d'énergie primaire et de la transformation de certaines formes d'énergie (voir l'encadré en rouge dans la figure ci-dessous).



Nous allons reconstruire, dans FlexTool, le système électrique développé dans OSeMOSYS en utilisant une approche pas-à-pas lors de l'Activité 1. Nous effectuerons ensuite, lors de l'Activité 2, une évaluation de la flexibilité du système. Veuillez télécharger le gabarit du fichier de données qui vous est fourni et remplissez-le tel que mentionné lors de l'Activité 1. Vous pouvez utiliser les noms de votre choix mais il est important de garder une approche simple et cohérente au sujet de la nomenclature des unités, des nœuds, etc.; autrement vous recevrez un message d'erreur lorsque vous exécuterez le modèle.



Activité 1

Dans cette activité, nous reconstruirons, dans FlexTool, le modèle du système électrique développé en utilisant OSeMOSYS. À cette fin, nous ajouterons les données obtenues dans OSeMOSYS (voir l'Exercice pratique 11) au fichier de données nécessaire au bon fonctionnement de FlexTool.

master	gridNode	nodeGroup	unit_type	fuel	unitGroup	units	nodeNode	ts_cf	ts_inflow	ts_import	ts_energy	ts_reserve_node	ts_reserve_nodeGroup	ts_unit	ts_time
--------	----------	-----------	-----------	------	-----------	-------	----------	-------	-----------	-----------	-----------	-----------------	----------------------	---------	---------

Le tout sera effectué en trois étapes:

1. ajout de toutes les données du système, création des technologies, des réseaux et des nœuds, et définition des groupes (remplissage des feuilles de calcul mauves);
2. addition des séries chronologiques (remplissage des feuilles de calcul vertes);
3. construction de la structure du système en reliant les réseaux, les nœuds et les technologies (remplissage des feuille de calcul jaunes).

1. Remplissage des feuilles de calcul mauves

- a. La feuille de calcul **master** inclut des données concernant les paramètres qui ont un impact sur l'ensemble du modèle. Par exemple, vous pouvez activer ou désactiver des contraintes du système telles que la marge de capacité requise (**use_capacity_margin**), les exigences de la limite d'inertie (**use_inertia_limit**), etc. Vous pouvez aussi déterminer des coûts de pénalité tels que le coût des émissions de CO₂ (**co2_cost**), le coût de la perte de charge (**loss_of_load_penalty**), le coût du manque d'inertie (**loss_of_inertia_penalty**), etc. Notez que ces données varient d'une région à l'autre. Dans cet exemple, les données ne représentent pas un cas réel et nous nous contenterons d'utiliser les valeurs par défaut.

parameter	value
co2_cost	20
loss_of_load_penalty	100000
loss_of_reserves_penalty	20000
lack_of_inertia_penalty	30000
curtailment_penalty	50
lack_of_capacity_penalty	5000
time_in_years	1.000
time_period_duration	60
reserve_duration	0.50
use_capacity_margin	1
use_online	1
use_ramps	1
use_non_synchronous	1
use_inertia_limit	1
mode_invest	0
mode_dispatch	1
print_duration	0
print_durationRamp	0
print_unit_results	0

- b. La feuille de calcul **nodeGroup** est utilisée afin d'affecter certaines contraintes du système à certains nœuds spécifiques. Ces contraintes seront imposées à tous les nœuds d'un groupe. Dans cet exemple, nous définissons deux groupes: le premier est appelé **sync** et sert à déterminer la limite d'inertie, la marge de capacité ainsi que la limite de la part non-synchronisée; le deuxième, **reserve1**, est utilisé afin de déterminer s'il faut appliquer les

exigences de la réserve dynamique mentionnée dans la feuille de calcul **te_reserve_nodegroup**. Par exemple, la somme de l'inertie de tous les nœuds du groupe de nœuds sync devrait être supérieure à 10000 MWs.

nodeGroup	capacity margin (MW)	non synchronous share	inertia limit (MWs)	use ts_reserve	use dynamic reserve	color in results
sync	343	0.80	10000	0	0	
reserve1				1	1	

- c. Tel que mentionné au Cours 16, vous pouvez créer divers réseaux (par exemple: pour le gaz naturel, les déplacements utilisant l'électricité, etc.) dont chacun est constitué d'un certain nombre de nœuds. La feuille de calcul **gridNode** est utilisée afin de définir des réseaux et les nœuds de chacun de ces réseaux. Dans l'exemple ci-dessous, nous ne définissons qu'un seul réseau, le réseau électrique (**elec**), et nous représentons toute la région par un seul nœud (**nodeA**) afin d'être cohérent avec le réseau électrique développé dans le modèle OSeMOSYS. Nous affectons le **nodeA** aux groupes **sync** et **reserve1**, ce qui signifie que les contraintes de ces groupes seront imposées au **nodeA**. La demande totale, les importations et la marge de capacité devront donc être déterminées pour chaque nœud. La marge de capacité est supposée égale à 15% de la demande totale et est donc calculée de la façon suivante: $0.15 * \text{demand}/8760$.

Add empty row												
grid	node	nodeGroup	nodeGroup2	nodeGroup3	demand (MWh)	import (MWh)	capacity margin (MW)	non synchronous share	use ts_reserve	use dynamic reserve	print results	color in results
elec	nodeA	sync	reserve1		20027794	0	343		1	1	1	

- d. La feuille de calcul **unit_type** est utilisée pour définir toutes les technologies du système. Puisque nous n'avons qu'un réseau électrique, toutes les technologies sont des unités de production ou de stockage d'électricité.

Notez que puisque FlexTool effectue une évaluation détaillée de la flexibilité du réseau électrique, des données opérationnelles plus détaillées sont requises pour définir les technologies du système (taux de montée en puissance, la constante d'inertie, les coûts de démarrage, etc.). Certaines de ces données peuvent être obtenues via OSeMOSYS (celles-ci sont identifiées en rouge dans la figure suivante) et le reste des données devront provenir d'autres sources.

Add empty row																							
unit type	efficiency	min load	eff at min load	ramp up (p.u. per min)	ramp down (p.u. per min)	O&M cost/MWh	availability	max reserve	inertia constant (MWs/MW)	fixed cost/kW/year	inv cost/kW	inv cost/kWh	fixed kW/kWh ratio	conversion eff	startup cost	min uptime (h)	min downtime (h)	eff charge	self discharge loss	lifetime	interest	annuity	non synchronous
PWRCOA	0.39	0.40	0.34	0.02	0.02	36.0	1.00	1.00	6.00	78	2500			2.00						35	0.10	0.104	0
PWROHC	0.35	0.50	0.30	0.05	0.05	108.0	1.00	1.00	6.00	35	1200			1.00		5.00				25	0.10	0.110	0
PWRNGS001	0.59	0.20	0.54	0.20	0.20	53.0	1.00	1.00	6.00	35	1200			0.50	4.00					30	0.10	0.106	0
PWRNGS002	0.39	0.20	0.34	0.20	0.20	63.0	1.00	1.00	6.00	20	700			0.50	4.00					25	0.10	0.110	0
PWRBIO	0.35	0.40	0.30	0.02	0.02	16.0	1.00	1.00	6.00	75	2500			2.00						30	0.10	0.106	0
PWRHYD	1	0.10	1.00	0.20	0.20		1.00	1.00	6.00	90	3000									50	0.10	0.101	0
PWRGEO	0.35	0.30	0.30	0.02	0.02	12.0	1.00	1.00	6.00	120	4000			1.00						25	0.10	0.110	0
PWRNUC	0.33	0.75	0.28	0.00	0.00	12.0	1.00	1.00	7.00	184	6137			6.00						50	0.10	0.101	0
PWRSOL	1			1.00	1.00		1.00	0.90		12	886									24	0.10	0.111	1
PWRWIND	1			1.00	1.00		1.00	0.90		44	1087									25	0.10	0.110	1

Dans OSeMOSYS, les coûts des formes d'énergie sont comptabilisés dans la section présentant ces formes d'énergie (dans la partie gauche du SÉR (système énergétique de référence)). Il n'y a donc pas de données disponibles dans OSeMOSYS concernant les coûts d'exploitation et d'entretien des technologies de conversion. Puisque ces coûts sont requis dans FlexTool, nous les calculons en se basant sur les prix des formes d'énergie (ce qui constitue la majeure partie des coûts d'exploitation et d'entretien).

Note: Le rendement des centrales géothermiques est supposé égal à 0,35 au lieu de la valeur 0,80 utilisée dans OSeMOSYS.

- e. La feuille de calcul **fuel** est utilisée pour définir le coût et l'intensité carbone des différentes formes d'énergie. Les données surlignées en rouge proviennent de OSeMOSYS. Dans FlexTool, un coût est aussi défini pour la chaleur géothermique et a été ajouté (ceci est optionnel et est laissé à la discrétion de l'utilisateur).

fuel	fuel (price/MWh)	CO2 content (t/MWh)
COA	17.38	0.34
OIL	49.03	0.26
NGS	43.26	0.20
BIO	5.76	0.36
GEO_heat	5.00	0



- f. La feuille de calcul **unitGroup** est utilisée pour définir les groupes d'unités ainsi que leurs contraintes respectives. Il est possible de regrouper diverses technologies et de spécifier diverses limites pour celles-ci (tel que l'investissement minimal ou maximal). Dans notre exemple, quoique divers groupes de technologies ont été définis, aucune contrainte particulière n'est créée.

	max invest MW	min invest MW	max invest MWh	min invest MWh	print results	color in results
unitGroup						
Fossil					1	
Hydro					1	
Wind					1	
PV					1	
Bio					1	
Geo					1	
NUC					2	

2. Remplissage des feuilles de calcul vertes

- a. La feuille de calcul **ts_cf** est utilisée pour ajouter les facteurs de capacité des technologies. Un facteur de capacité d'une technologie est son niveau de production pour un MW de capacité installé. C'est habituellement utilisé pour les technologies dont la production varie en fonction des conditions météorologiques ou d'autres facteurs externes.

	cf_profile	wind_A	PV_A	Hydro_A
Time				
t0000		0.202	0	0.334
t0001		0.228	0	0.334
t0002		0.242	0	0.334
t0003		0.245	0.008	0.334
t0004		0.184	0.14	0.334
t0005		0.267	0.317	0.334
t0006		0.342	0.465	0.334
t0007		0.342	0.566	0.334

Notez que, pour les centrales hydroélectriques, nous définissons le facteur de capacité plutôt que les données habituelles utilisées par FlexTool afin de montrer la variation de la production hydroélectrique relativement à la variation de l'apport en eau. Ceci est dû au fait que, dans OSeMOSYS, la production hydroélectrique est définie en utilisant un facteur de



capacité et que l'apport en eau n'est pas connu. C'est la raison pour laquelle nous laissons la feuille de calcul **ts_inflow** vide.

	inflow	Hydro_A
time		
t0000		
t0001		
t0002		
t0003		
t0004		
t0005		
t0006		
t0007		

- b. La feuille de calcul **ts_energy** est utilisée pour ajouter les profils des demandes finales. Dans l'exemple que nous étudions concernant le réseau électrique, nous n'avons qu'un profit de demande d'électricité. Toutefois, tel que mentionné précédemment, vous pouvez ajouter d'autres demandes finales tel que, par exemple, de chauffage et des déplacements utilisant l'électricité.

	grid	elec
	node	nodeA
time		
t0000		
t0001		
t0002		
t0003		
t0004		
t0005		
t0006		
t0007		
t0008		

	grid	elec
	node	nodeA
time		
t0000		1474.647
t0001		1567.848
t0002		1930.296
t0003		2149.836
t0004		2207.828
t0005		2369.376
t0006		2390.087
t0007		2340.38
t0008		2495.715
t0009		2512.284

- c. La feuille de calcul **ts_import** est utilisée afin d'ajouter un profil d'importation d'électricité. Nous supposons qu'il n'y a pas d'importation d'électricité et nous laissons donc cette feuille de calcul vide.
- d. La feuille de calcul **ts_reserve_node** est utilisée afin d'ajouter les réserves exigées à chaque tranche de temps de chaque nœud. Nous utilisons une valeur fixe de 230 MW. La feuille de calcul **ts_reserve_nodeGroup** est utilisée afin de définir les réserves exigées pour un groupe

de nœuds et devraient être supérieures ou égales à la somme des réserves des membres de tous les nœuds. Puisqu'un seul nœud est utilisé dans notre exemple, la réserve exigée est égale à la réserve au nœud **nodeA**.

	node	nodeA
Time		
t0000		343
t0001		343
t0002		343
t0003		343
t0004		343
t0005		343
t0006		343
t0007		343
t0008		343
t0009		343

	nodeGroup	reserve1
Time		
t0000		343
t0001		343
t0002		343
t0003		343
t0004		343
t0005		343
t0006		343
t0007		343
t0008		343
t0009		343

- e. La feuille de calcul **ts_unit** est utilisée afin d'ajouter, pour une technologie de production d'électricité, des séries chronologiques de caractéristiques pouvant varier dans le temps. Par exemple, le rendement d'une pompe à chaleur (tel que mentionné au Cours 16). L'exemple étudié ne possède aucun paramètre ayant de telles caractéristiques et nous laissons donc cette feuille de calcul vide.

3. Remplissage des feuilles de calcul jaunes

- a. La feuille de calcul **units** est utilisée afin de définir la structure du réseau (tel que les capacités installées) ainsi que les entrées et les sorties liées aux unités de production.
 - i. Ajoutez toutes les unités définies à la feuille de calcul **unit_type** (vous pouvez les sélectionner à partir du menu déroulant).
 - ii. Affectez ces unités à un groupe d'unités.
 - iii. Ajoutez la forme d'énergie d'entrée ou affectez un facteur de capacité à chaque technologie.
 - iv. Spécifiez le réseau des entrées ainsi que les nœuds (s'il y a lieu).
 - v. Spécifiez le réseau des sorties. Dans notre exemple, le réseau des sorties de toutes les technologies et le nœud **nodeA** du réseau électrique.
 - vi. Spécifiez la capacité installée à chaque nœud. Dans le cas des unités de stockage, spécifiez aussi la capacité de stockage (MWh). Toutes les données d'entrées sont tirées du modèle OSeMOSYS.
 - vii. S'il y a plusieurs sorties (par exemple pour la chaleur et l'électricité combinées), vous devriez aussi spécifier le réseau **output2**.



Add empty row		Choose one input option (none, fuel, cf profile, inflow <u>or</u> input grid+node)					Output #1																
unitGroup	unit type	fuel	cf profile	inflow	input grid	input node	output grid	output node	capacity (MW)	invested capacity (MW)	max invest (MW)	storage (MWh)	invested storage (MWh)	max invest (MWh)	storage start	storage finish	reserve increase ratio	use efficiency time series	fix unit generation	use min generation	use max generation	use min online	inflow multiplier
Fossil	PWRCOA	COA					elec	nodeA	14														
Fossil	PWROHC	OIL					elec	nodeA	0														
Fossil	PWRNGS001	NGS					elec	nodeA	350														
Fossil	PWRNGS002	NGS					elec	nodeA	0														
Bio	PWRBIO	BIO					elec	nodeA	90														
Hydro	PWRHYD		Hydro_A				elec	nodeA	274														
Geo	PWRGEO	GEO_heat					elec	nodeA	1756														
NUC	PWRNUC						elec	nodeA	0														
PV	PWRSOL		PV_A				elec	nodeA	170								0.10						
Wind	PWRWIND		wind_A				elec	nodeA	0								0.10						

Notes: Pour les centrales éoliennes et solaires, vous pouvez spécifier de quelle façon la réserve requise devrait être augmentée à mesure que la pénétration de ces énergies renouvelables augmente. Dans cet exemple, on suppose que le ratio de la réserve devrait augmenter de 10% (ce qui est la valeur utilisée par défaut dans FlexTool).

- b. La feuille de calcul est utilisée afin de spécifier les caractéristiques des liens de transmission entre les différents nœuds. Puisqu'un seul nœud est utilisé dans notre exemple, la feuille de calcul est vide.

Add empty row													
grid	node1	node2	cap.rightward (MW)	cap.leftward (MW)	invested capacity (MW)	max invest (MW)	loss	inv.cost/kW	lifetime	interest	annuity	HVDC	color in results

Après avoir ajouté toutes les données requises, copier le fichier Excel dans le répertoire **InputData** du répertoire **FlexTool**.

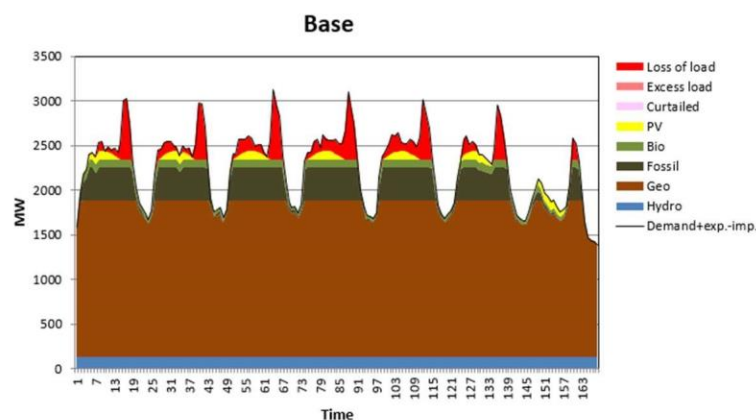
Activité 2

Dans cette deuxième activité, nous évaluons la flexibilité du système électrique. À cette fin, ajoutez le fichier **InputData** à la liste des fichiers **InputData** actifs. Exécutez ensuite le **Scénario de base** et attendez la création du **fichier des résultats**.

Note importante: Assurez-vous que les macros sont activées dans le nouveau fichier **InputData**; sinon, il y aura erreur lors de l'exécution du modèle.

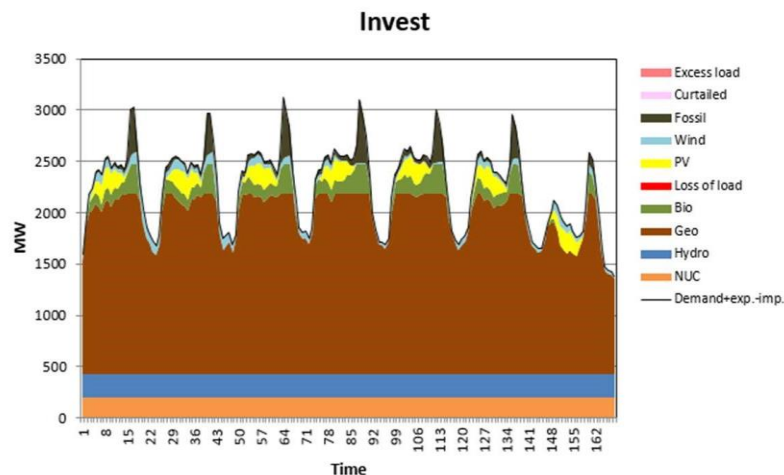
Questions:

- Le système présente-t-il des problèmes de flexibilité?
- Si vous constatez une inflexibilité du système, quelle en est, selon vous, la source?
Indice: Vérifiez le profil de la répartition présenté à la feuille de calcul **genUnitGroup_elec** ainsi que les taux d'utilisation des diverses unités de production à la feuille de calcul **units_elec**.
- Pensez-vous que l'ajout d'unités de stockage tel que des batteries permettrait de réduire les problèmes de flexibilité du système?



Le profil de la répartition indique que la disponibilité de la capacité de production solaire est bien alignée avec la demande d'électricité. De plus, toutes les unités de production fonctionnent presque à pleine capacité (aucune inutilisation de la production des ÉRV). Le problème semble être lié à une capacité de production insuffisante.

Dans la prochaine étape, exécutons le modèle en mode investissement (scénario **invest**). Dans la feuille de calcul **units** du fichier d'entrée des données, entrez un niveau maximal des investissements à 200 MW pour toutes les technologies. Nous utilisons un niveau d'investissement identique pour toutes les technologies afin de représenter une évaluation non-biaisée et laissons le modèle choisir les technologies optimales. Ajoutez ensuite le scénario **invest** à la liste des scénarios actifs et exécutez le modèle.



Questions:

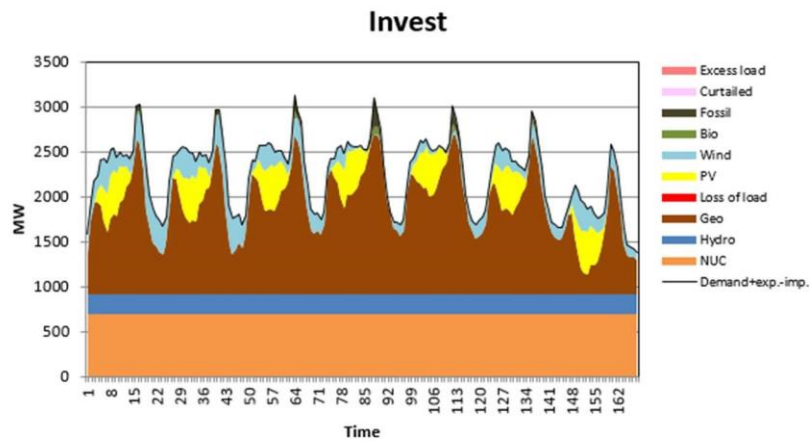
- Le système montre-t-il toujours des problèmes de flexibilité?
- Quel est le changement du mix technologique? Quelles technologies ont été installées?

Node	Unit	Base			Invest		
		Capacity (MW)	Generation (MWh)	Utilization (%)	Capacity (MW)	Generation (MWh)	Utilization (%)
nodeA	PWRCOA	14	84800.596	69.145952	190.646	164772.24	9.8662531
	PWRNGS001	350	2047364.9	66.776417	550	351299.94	7.2914059
	PWRBIO	90	632234.22	80.192062	290	924613.56	36.396377
	PWRHYD	274	1150384	47.927875	474	1990072.1	47.927675
	PWRGEO	1756	14874265	96.695639	1756	13754466	89.415972
	PWRSOL	170	260266.78	17.476952			
	PWROHC				200	573.88837	0.032756186
	PWRNGS002				200	26817.03	1.5306524
	PWRNUC				200	1752000	100
	loss of load		978480.01				
	excess load		0				

À votre tour: Augmentez le niveau maximal des investissements à 700 MW pour toutes les technologies et exécutez à nouveau le modèle. Vous pouvez aussi effectuer cela en ajoutant un scénario d'analyse de la sensibilité.

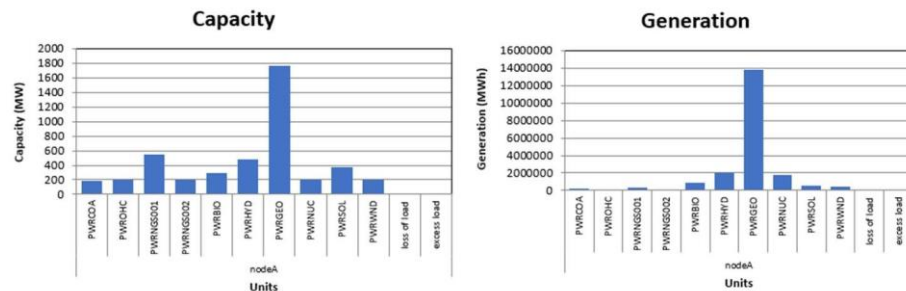
Questions:

- Quel changement du mix technologique constatez-vous en relaxant le niveau maximal des investissements?

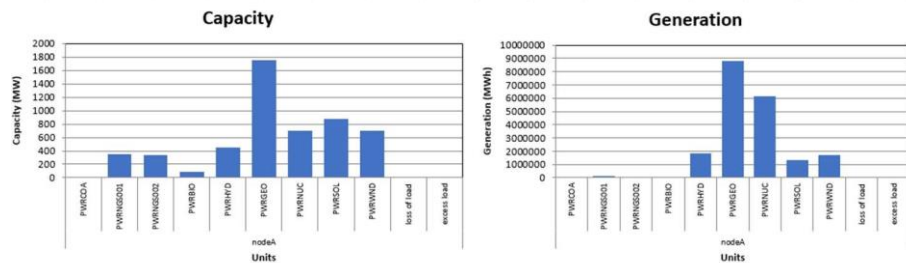


Comparez les capacités installées et la production des diverses technologies pour chacun des deux scénarios d'investissements. Quelles technologies présentent une augmentation de la capacité installée?

Niveau maximal
des investissements:
200 MW



Niveau maximal
des investissements:
700 MW





L'augmentation du niveau maximal des investissements pour diverses technologies induit un impact sur le rôle et la valeur de ces unités de production. Dans ce dernier exemple, les centrales nucléaires et les centrales hydroélectriques remplacent les centrales géothermiques pour la production de l'énergie de base (« baseload »). Les centrales géothermiques sont utilisées pour satisfaire la demande intermédiaire ainsi que celle de pointe.

À votre tour: Ajoutez diverses options de flexibilité tel que l'hydrogène ou la conversion de l'électricité en chaleur (« Power to heat ») au lieu d'augmenter le niveau maximal des capacités de production et constatez les effets de ces options sur le mix technologique du système.