



La modélisation et la flexibilité du secteur énergétique

Exercice pratique 14 (EP_14)

Veillez utiliser la citation suivante au besoin:

- **Cet exercice pratique**

Pooya Hoseinpoori, Alex Kell & Adam Hawkes. (2021, March). Hands-on 14: Energy and Flexibility Modelling (Version 1.4). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4617028>

Veillez télécharger les fichiers requis en suivant le lien <https://doi.org/10.5281/zenodo.4617028>.

Résultats attendus des apprentissages

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

1. identifier les problèmes de flexibilité de l'étude de cas;
2. mettre en œuvre diverses options de flexibilité dans FlexTool;
3. ajouter le stockage et la transmission d'énergie thermique dans FlexTool;
4. comparer les investissements de diverses options de flexibilité et d'évaluer leurs impacts ainsi que leur rentabilité.

Activité 1

Dans cette première activité, nous souhaitons identifier les problèmes de flexibilité d'un système ayant une forte utilisation des énergies renouvelables variables (ÉRV). Cette étude de cas représente un système ayant trois nœuds.

Note: Les données utilisées dans cette étude de cas ne représentent pas la réalité.



Suivez les étapes suivantes:

1. téléchargez le fichier de données **Case-study.xlsm** (en utilisant le lien mentionné précédemment);
2. sauvegardez ce fichier dans le répertoire racine **InputData\FlexTool-v2.0**;
3. ouvrez l'interface principal de FlexTool (i.e. le fichier Excel **flexTool.xlsm**) et ajoutez **Case-study.xlsm** à la liste des **Active input files**;
4. ajoutez le scénario **Base** à la liste des **Active Scenarios**;
5. exécutez le modèle et attendez l'ouverture du fichier des résultats.

Dans la feuille de calcul **summary_D**, essayez d'identifier les problèmes de flexibilité en analysant les résultats présentés ci-dessous:

Update sheets window	Case-study
	Base
Status	Optimal
VRE share (% of annual demand)	38.17
Loss of load (% of annual demand)	35.54
Excess load (% of annual demand)	0
Insufficient reserves (% of reserve demand)	0
Insufficient inertia (% of inertia demand)	0
Curtailement (% of VRE gen.)	3.964
Loss of load (max MW)	1688.19
Excess load (max MW)	0
Reserve inadequacy (max MW)	0
Insufficient inertia (TWh/a)	0
Curtailement (max MW)	983.581
Curtailement (TWh/a)	0.529473

Dans la feuille de calcul **node_plot**, vérifiez le délestage, la production inutilisée des ÉRV (« VRE curtailement » en anglais), la réserve provenant des ÉRV, etc., aux divers nœuds.

Questions:

1. Quel nœud a le plus haut niveau de délestage pour le chauffage? Selon vous, pourquoi est-ce le cas?
2. Quel nœud a le plus haut niveau de délestage électrique?
3. Quel nœud a le plus haut niveau de production inutilisée des ÉRV?
4. Quel nœud a le plus haut niveau de transfert de puissance sortante?



À votre tour:

1. La feuille de calcul **units_elec** présente, par exemple, la capacité installée, la production et le taux d'utilisation de chacune des technologies de production d'électricité du réseau (consultez les graphiques de la feuille de calcul **units_elec_plot**).
2. La feuille de calcul **units_heat** présente, par exemple, la capacité installée, la production et le taux d'utilisation de chacune des technologies de chauffage (consultez les graphiques de la feuille de calcul **units_heat_plot**).
3. Vous trouverez les informations concernant le transfert de puissance entre les nœuds dans la feuille de calcul **transfer_elc** (consultez les graphiques de la feuille de calcul **transfer_elect_plot**).

Il y a quelques problèmes clés à mentionner en ce qui concerne la flexibilité du système présenté lors de cette activité:

1. le délestage électrique aux nœuds B et C;
2. le délestage du chauffage au nœud A;
3. le niveau élevé de la production inutilisée des ÉRV aux nœuds A et C.

Au cours des prochaines activités, nous proposerons certaines actions pouvant mitiger ou éliminer ces problèmes de flexibilité. Par exemple, il est possible d'effectuer des investissements afin d'ajouter des options de flexibilité. Nous étudierons l'impact de ces actions sur les résultats du système énergétique.

Activité 2

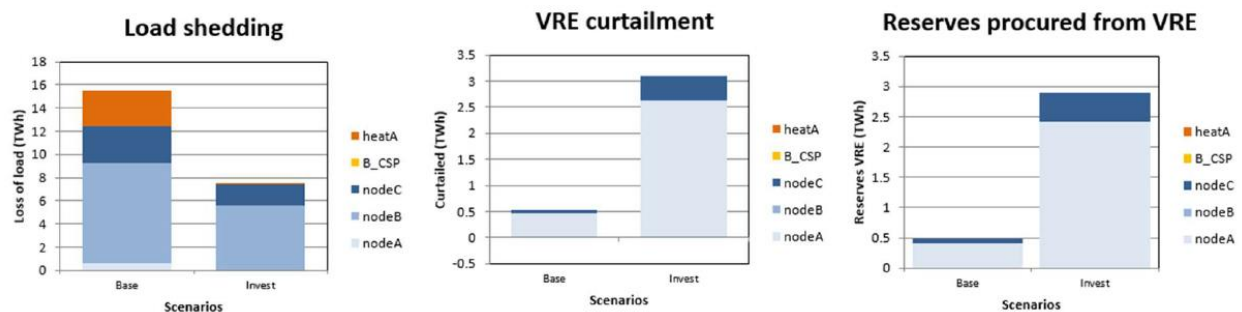
La première étape pour mitiger ou éliminer les problèmes de flexibilité consiste à déterminer si certains investissements pouvant accroître la capacité de production de technologies ou de réseaux de transport d'énergie peuvent résoudre les problèmes de flexibilité.

1. Ouvrez le fichier de données de l'étude de cas et, dans les feuilles de calcul **unit_type** et **nodeNode**, validez les niveaux maximaux d'investissements possibles pour chaque technologie ou élément du réseau de transport.
2. Fermez le fichier de données et ajoutez *Invest* à la liste des scénarios actifs. Exécutez ensuite le modèle et attendez la création du fichier des résultats (veuillez garder le scénario **Base** dans la liste des scénarios actifs afin de pouvoir comparer les résultats).

Questions:

1. Est-ce que les investissements en de nouvelles capacités pour les technologies existantes permettent de réduire la perte de charge? Quels sont les impacts sur la production inutilisée des ÉRV?
2. Est-ce que la part des ÉRV augmente lorsque l'on passe du scénario **Base** au scénario **Invest**?

Vérifiez les résultats du scénario **Invest** de la feuille de calcul **summary_D**. Allez ensuite dans la feuille de calcul **node_plot** et comparez le délestage et la production inutilisée des ÉRV des scénarios **Base** et **Invest**.



1. Les investissements en de nouvelles capacités pour des technologies existantes a réduit le coût total du système.
2. Les investissements en de nouvelles capacités pour des technologies existantes ont réduit la perte de charge aux nœuds B et C.
3. Les investissements en de nouvelles capacités pour des technologies de chauffage, dans ce cas des pompes à chaleur, a éliminé la perte de chauffage au nœud A.
4. Les investissements en de nouvelles capacités pour des technologies de production utilisant les énergies renouvelables variables (ÉRV) a amplifié le niveau de production inutilisée de ces technologies aux nœuds A et C malgré le fait qu'il y ait du délestage au nœuds B et C; ceci peut être dû aux éléments suivants:
 - a. insuffisance de la flexibilité au nœud A (stockage de l'énergie, agilité de la réponse de la demande, etc.);
 - b. insuffisance du réseau de transport entre les nœuds;
 - c. excès des investissements en l'absence de la croissance de la demande.

À votre tour: Vérifiez la configuration du système et le mix technologique dans les feuilles de calcul **units_elec**, **units_heat** et **transfer_elc**.



Au Cours 13, il fut mentionné que l'électricité dédiée au chauffage peut, si mise en œuvre de façon efficace, offrir un potentiel intéressant de flexibilité pour le réseau électrique. Les pompes à chaleur intégrées avec stockage thermique peuvent générer un déplacement dans s le temps de la charge attendue du réseau en utilisant l'excès de la production des ÉRV et en emmagasinant l'eau chaude dans des réservoirs de stockage.

Activité 3

Dans cette activité, nous souhaitons étudier l'impact de l'ajout de stockage thermique sur la flexibilité du réseau électrique.

À cette fin, ajoutons une unité de stockage thermique.

1. Créez une copie du fichier **Case-study.xlsm** dans le répertoire **InputData** et renommez-le **Case-study-heat.xlsm**.
2. Ajoutez au fichier créé à l'étape précédente une unité de stockage thermique dans les feuilles de calcul **units** et **unit_type** (voir ci-dessous).
3. Ajoutez **Case-study-heat.xlsm** à la liste des fichiers actifs (**Active input files**; vous devriez aussi avoir le fichier actif **Case-study.xlsm**) et exécutez le modèle.

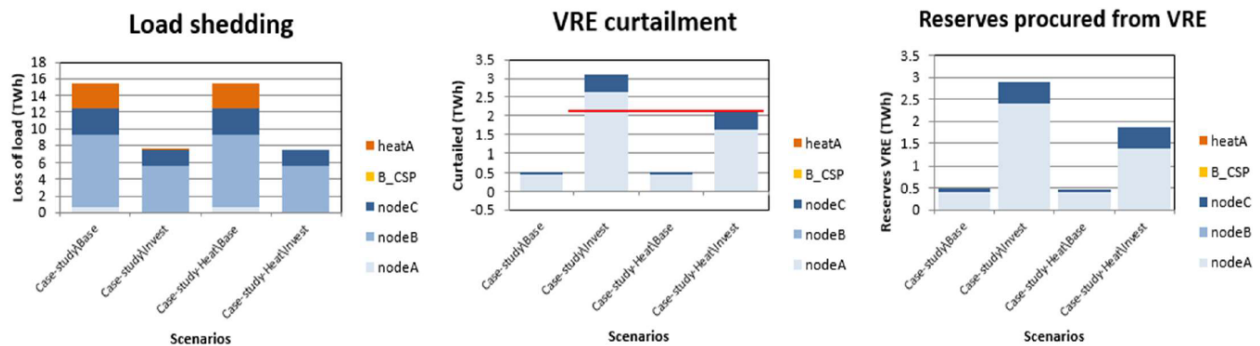
Add empty row																							
unit type	efficiency	min load	eff at min load	ramp up (p.u. per min)	ramp down (p.u. per min)	O&M cost/MWh	availability	max reserve	inertia constant (MW s/MW)	fixed cost/kW /year	inv.cost/kW	inv.cost/kWh	fixed kw/kWh ratio	conversion eff	startup cost	min uptime (h)	min downtime (h)	eff charge	self discharge loss	lifetime	interest	annuity	non synchronous
Thermal storage	1.00			1.00	1.00		1.00	0.00			0	10						1.00	0.00	20	0.08	0.102	1

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)
Thermalstorage	Thermal storage						heat	heatA	500		2500	40000

Questions:

1. Quel est l'impact de l'ajout d'un stockage thermique sur la perte de charge et la production des ÉRV aux divers nœuds des scénarios **Base** et **Invest**?
2. Quel est l'impact sur le coût total du système (la fonction objectif)?
3. Est-ce que le stockage thermique a un impact sur le délestage du chauffage dans le scénario **Base**?

Update sheets window	Case-study	Case-study	Case-study-Heat	Case-study-Heat
	Base	Invest	Base	Invest
Status	Optimal	Optimal	Optimal	Optimal
Optimal objective	1.55E+11	7.41E+10	1.54E+11	7.38E+10
...Curtailment payments (M EUR)	26.47364038	155.1863756	25.26952735	105.3269259
VRE share (% of annual demand)	38.17	49.21	38.24	48.93
Loss of load (% of annual demand)	35.54	21.18	35.58	21.18
Excess load (% of annual demand)	0	0.02157	0	0
Insufficient reserves (% of reserve demand)	0	0	0	0
Insufficient inertia (% of inertia demand)	0	0	0	0
Curtailment (% of VRE gen.)	3.964	18.02	3.776	12.3
Loss of load (max MW)	1688.19	1390.19	1688.19	1390.19
Excess load (max MW)	0	-153.169	0	0
Curtailment (max MW)	983.581	2237.13	896.495	1822.24
Curtailment (TWh/a)	0.529473	3.10373	0.505391	2.10654
Model leakage (TWh/a)	-0.00913161	-0.0480479	-0.00913161	-0.0280732
Capacity inadequacy (max MW)	0	0	0	0
Spill (TWh/a)	0	0.325747	0	0



À votre tour:

1. Vérifiez la configuration du système et du mix technologique en consultant les feuilles de calcul **units_elec**, **units_heat** et **transfer_elc**.
2. Vérifiez le taux d'utilisation du stockage thermique dans les scénarios **Base** et **Invest**.

1. L'ajout d'un stockage thermique un déplacement dans le temps de la charge au nœud A, ce qui réduit la production inutilisée des ÉRV (et les paiements du système associés à cette inutilisation) ainsi que les niveaux de la marge de réserve à ce nœud.
2. L'ajout d'un stockage thermique n'a aucun impact sur le délestage aux nœuds B et C (ceci est de faible importance).
3. L'ajout d'un stockage thermique ne réduit pas le délestage du chauffage dans le cas du scénario de base puisque la perte de chauffage, dans ce scénario, est due à une capacité insuffisante des pompes à chaleur.

Même si l'ajout d'un stockage thermique ainsi que l'activation de l'option de flexibilité concernant la puissance pour le chauffage permettent de réduire la production inutilisée des ÉRV en déplaçant la charge dans le temps, cela ne résout pas tous les problèmes de flexibilité à tous les nœuds. Dans la prochaine activité, nous essaierons de déplacer la charge dans l'espace (entre les nœuds) et nous ajouterons de la capacité au réseau existant de transport de l'électricité.

Activité 4

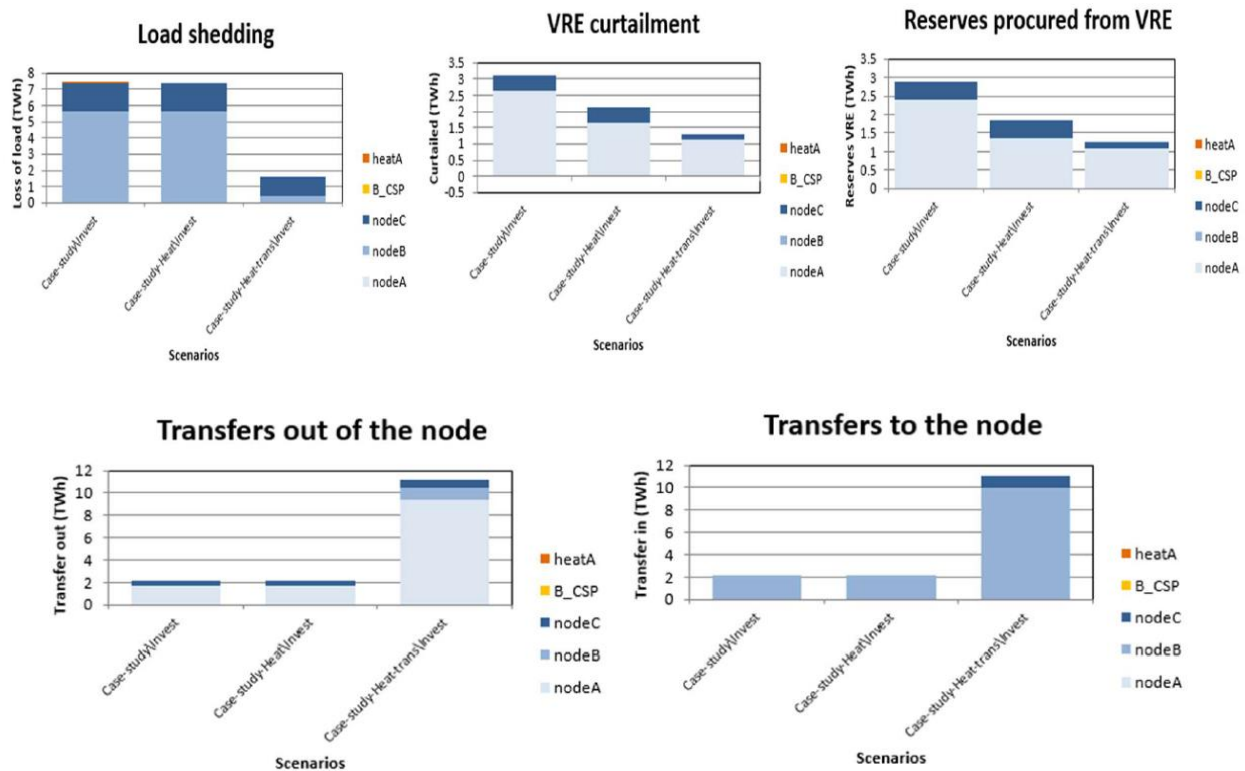
Analysons en deux étapes les impacts d'un investissement dans l'ajout à la capacité du réseau existant de transport de l'électricité.

Étape 1: Vérifions tout d'abord si cet investissement est suffisant pour permettre de résoudre les problèmes de flexibilité du modèle.

1. Créez une copie du fichier **Case-study-heat.xlsx** dans le répertoire **InputData** et nommez ce nouveau fichier **Case-study-heat-trans.xlsx**.
2. Dans la feuille de calcul **nodeNode**, augmentez à 1000 MW le niveau d'investissement maximal dans le réseau existant de transport de l'électricité.
3. Ajoutez **Case-study-heat-trans.xlsx** à la liste des **Active input files** et exécutez le modèle.
4. Vous pouvez retirer **Base** de la liste des **Active input files** si vous souhaitez réduire le nombre de scénarios générés. Ceci peut faciliter la comparaison des résultats entre divers scénarios.

Questions:

1. Est-ce que l'investissement dans l'ajout à la capacité du réseau existant de transport de l'électricité résout tous les problèmes de flexibilité à tous les nœuds?
2. Quel est l'impact sur le coût total du système (la fonction objectif)? Indice: consultez la feuille de calcul **summary_D**.



Dans la feuille de calcul [node_plot](#), vérifiez si l'investissement dans l'ajout à la capacité du réseau existant de transport de l'électricité a un impact sur le délestage, la production inutilisée des ÉRV et l'équilibre de la puissance entre les nœuds. De plus, vérifiez le transfert de puissance entre les nœuds et le taux d'utilisation du réseau de transport.

L'investissement dans l'ajout à la capacité du réseau existant de transport de l'électricité entre les nœuds A et B et les nœuds B et C réduit la perte de charge au nœud B ainsi que le niveau de production inutilisée des ÉRV au nœud A. Cependant, cet investissement ne réduit que partiellement la perte de charge au nœud C.

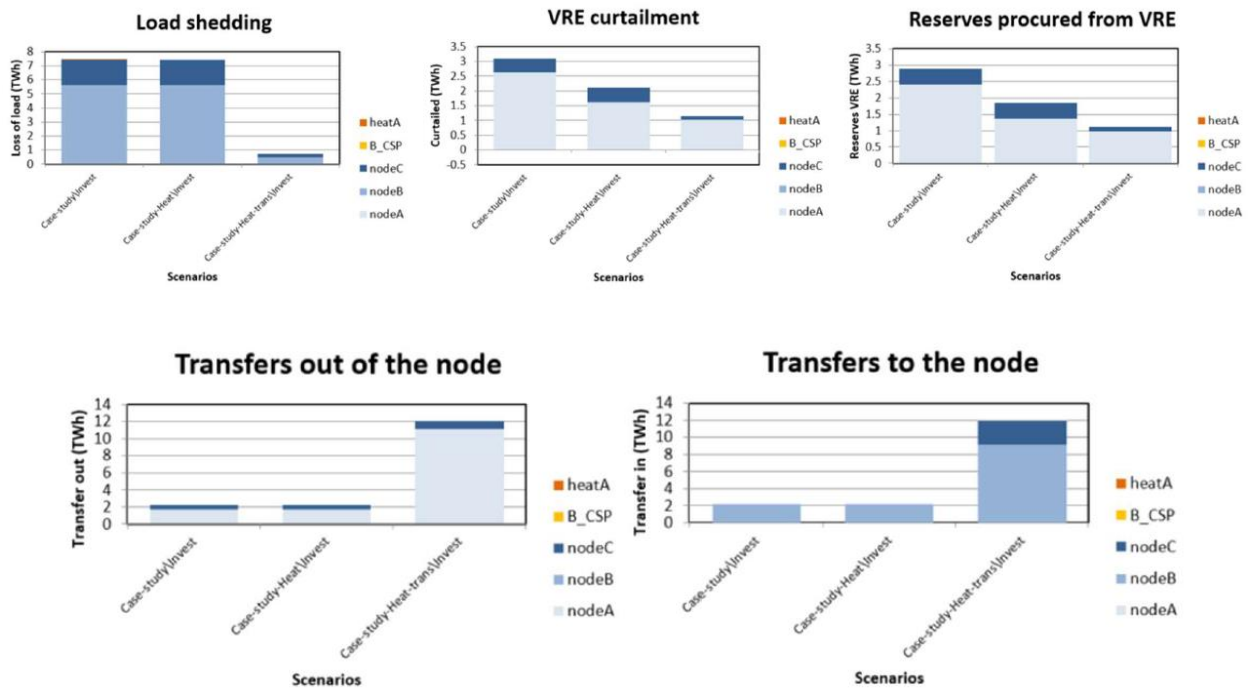
Étape 2: Quoique le niveau de production inutilisée des ÉRV au nœud A ait diminué, ajouter une nouvelle capacité de transport de l'électricité entre les nœuds A et C pourrait permettre de réduire ce niveau encore davantage. De plus, cette nouvelle capacité de transport entre les nœuds A et C pourrait potentiellement permettre de diminuer de façon importante la perte de charge du nœud C.

Dans la feuille de calcul [nodeNode](#), ajoutez une nouvelle capacité du réseau de transport de l'électricité entre les nœuds A et C en spécifiant une capacité initiale nulle et la possibilité d'un investissement maximal de 1000 MW. Exécutez ensuite le modèle.

Add empty row			cap.rightward (MW)	cap.leftward (MW)	invested capacity (MW)	max invest (MW)	loss	inv.cost/kW	lifetime	interest	annuity	HVDC	color in results											
grid	node1	node2																						
elec	nodeA	nodeB												150	150		1000	0.01	100	50	0.08	0.082	0	
elec	nodeB	nodeC												100	100		1000	0.01	100	50	0.08	0.082	0	
elec	nodeA	nodeC												0	0		1000	0.01	100	50	0.08	0.082	0	

Questions:

1. Est-ce que l'investissement dans une nouvelle capacité du réseau de transport de l'électricité entre les nœuds A et C résout les problèmes de flexibilité pour tous les nœuds?
2. Quels sont les impacts du transport de l'électricité sur l'ensemble du réseau? Indice: consultez la feuille de calcul [transfer_elc](#).





1. Investir dans une nouvelle capacité du réseau de transport entre les nœuds A et C semble réduire de façon efficace la perte de charge du nœud C. Toutefois, lorsque l'on compare les résultats avec ceux obtenus à l'Étape 1, cet investissement n'a pas d'impact sur le niveau de production inutilisée des ÉRV au nœud A.
2. La nouvelle ligne de transport entre les nœuds A et C réduit de façon significative la quantité d'électricité transportée du nœud B vers le nœud C. Le transport d'électricité entre les nœuds A et C et les nœuds B et C induit un faible facteur d'utilisation de capacité, indiquant que le niveau de l'investissement pourrait être réduit puisqu'il excède ce qui est requis par le système.

À votre tour:

Ajoutez d'autres options de flexibilité tel que la gestion de la demande et la croissance des investissements en unités de stockage au nœud A et vérifiez si ces options permettent de réduire encore davantage l'inutilisation de la production des ÉRV au nœud A.

Note: Pour introduire une réponse de la demande aux nœuds A ou B, vous pouvez simplement copier les unités de réponse de la demande et modifier le réseau de sortie vers le nœud souhaité, et ensuite modifier la capacité installée ainsi que l'investissement maximal. Vous pouvez aussi augmenter l'investissement dans la gestion de la demande au nœud C.

Note: Si aucune de ces options ne fonctionne, cela signifie qu'il y a un investissement trop élevé dans les unités des ÉRV qui a pour effet d'excéder la demande. Pour résoudre cette difficulté, vous pouvez réduire l'investissement dans les ÉRV ou augmenter la demande en ajoutant un réseau électrique pour les véhicules électriques (VÉ) ou un réseau d'hydrogène pour le système.

Prenez connaissance du fichier de données gabarit pour les VÉ et consultez les feuilles de calcul **nodeGroup**, **gridNode**, **unit_type**, **unitGroup**, **units** et **ts_energy** afin d'apprendre comment ajouter un réseau pour les VÉ du système pour un nœud spécifique.

Add empty row		Choose one input option (none, fuel, cf profile, inflow or 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
Hydro	Hydro_RES			nodeA_RES			elec	nodeA	300		200	300000		0									1
Hydro	Hydro_ROR			nodeA_ROR			elec	nodeA	150		0												1
Battery	battery						elec	nodeA	100		50	200											
Dem_inc	demand_incr						elec	nodeC	-30		100												
Dem_dec	demand_decr						elec	nodeC	40		100												
Dem_inc	demand_incr						elec	nodeA	-30		100												
Dem_dec	demand_decr						elec	nodeA	40		100												