



COMILLAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

ICADE

CIHS



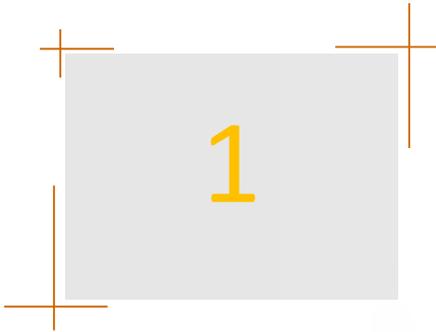
openTEPES

Modèle ouvert de planification de la production, du stockage, de l'exploitation et de l'expansion du réseau de transport avec les SER et les SSE

Andrés Ramos

Andres.Ramos@comillas.edu

https://pascua.iit.comillas.edu/aramos/Ramos_CV.htmv



1. Introduction
2. Modélisation
3. Études de cas

COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

Introduction

ICAI

ICADE

CIHS





openTEPES

version 4.16.0

Navigation

- Introduction
- Electric System Input Data
- Hydropower System Input Data
- Hydrogen System Input Data
- Heat System Input Data
- Output Results
- Mathematical Formulation
- Research projects
- Publications
- Download & Installation
- Contact Us

Quick search

Go



Open Generation, Storage, and Transmission Operation and Expansion Planning Model with RES and ESS (openTEPES)

"Simplicity and Transparency in Energy Systems Planning"

The openTEPES model has been developed at the Instituto de Investigación Tecnológica (IIT) of the Universidad Pontificia Comillas.

The openTEPES model presents a decision support system for defining the integrated generation, storage, and transmission expansion plan (GEP+SEP+TEP) of a large-scale electric system at a tactical level (i.e., time horizons of 10-20 years), defined as a set of generation, storage, and (electricity, hydrogen, and heat) networks dynamic investment decisions for multiple future years.

It is integrated into the open energy system modelling platform, helping model Europe's energy system.

It has been used by the Ministry for the Ecological Transition and the Demographic Challenge (MITECO) to analyze the electricity sector in the latest Spanish National Energy and Climate Plan (NECP) 2023-2030 in June 2023.

Reference: A. Ramos, E. Quispe, S. Lumbreras "OpenTEPES: Open-source Transmission and Generation Expansion Planning" SoftwareX 18: June 2022 [10.1016/j.softx.2022.101070](https://doi.org/10.1016/j.softx.2022.101070)

Index

- Introduction
- Electric System Input Data
 - Acronyms
 - Dictionaries, Sets
 - Input files
 - Options
 - Parameters
 - Period
 - Scenario
 - Stage
 - Adequacy reserve margin
 - Maximum CO₂ emission
 - Minimum RES energy
 - Duration
 - Electricity demand
 - System inertia
 - Upward and downward operating reserves
 - Generation
 - Variable maximum and minimum generation
 - Variable maximum and minimum consumption
 - Variable fuel cost
 - Variable emission cost
 - Energy inflows
 - Energy outflows
 - Variable maximum and minimum storage
 - Variable maximum and minimum energy
 - Electricity transmission network
 - Node location
- Hydropower System Input Data
 - Dictionaries, Sets
 - Natural hydro inflows
 - Natural hydro outflows
 - Reservoir
 - Variable maximum and minimum reservoir volume
- Hydrogen System Input Data
 - Hydrogen demand
 - Hydrogen transmission pipeline network



Read the Docs

<https://opentepes.readthedocs.io/en/latest/index.html>

downloads 100k

A. Ramos, E. Quispe, S. Lumbreras "OpenTEPES : Open-source Transmission and Generation Expansion Planning" SoftwareX 18 : juin 2022 [10.1016/j.softx.2022.101070](https://doi.org/10.1016/j.softx.2022.101070)

DOI: <https://doi.org/10.24433/CO.8709849.v1>

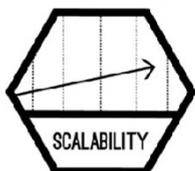


GitHub - IIT-EnergySystemModels/openTEPES :
Modèle ouvert de planification de la production, du
stockage, de l'exploitation et de l'expansion du
réseau de transport avec les SER et les SSE
(openTEPES)

Principaux objectifs de développement

- Simplicité et transparence
- Code écrit pour être lu par des humains
- Évolutivité : des cas à petite échelle aux cas à grande échelle
- Forte orientation vers l'efficacité informatique :
 - En générant le problème d'optimisation
 - Utilisation de bibliothèques (Pandas) pour les données d'entrée et la manipulation des données
 - Une mise en œuvre soignée pour réduire le temps de solution
 - Stabilité numérique. Variables d'échelle et contraintes autour de 1
 - Formulation serrée et compacte de certaines contraintes

Simplicity



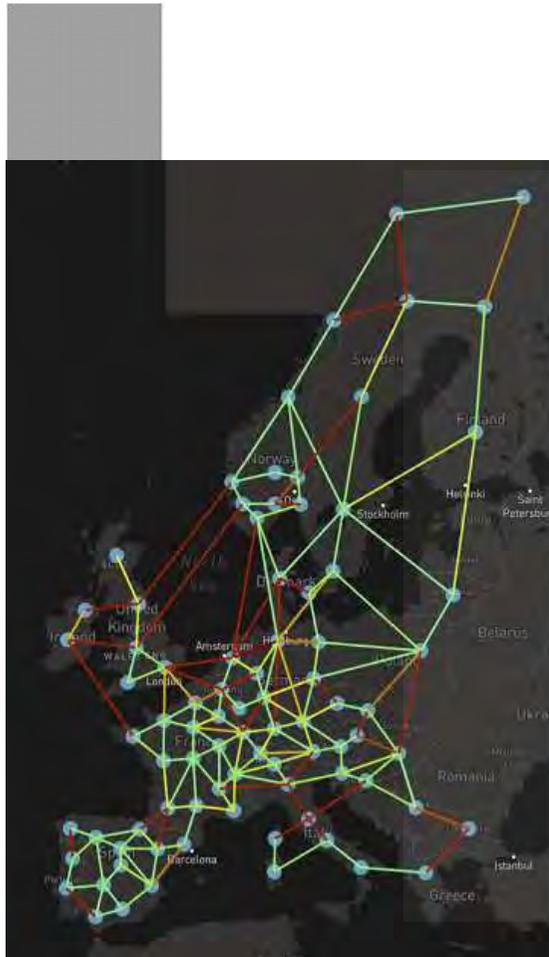
- Développé en Python/Pyomo

- Données d'entrée et résultats de sortie au format texte (csv)

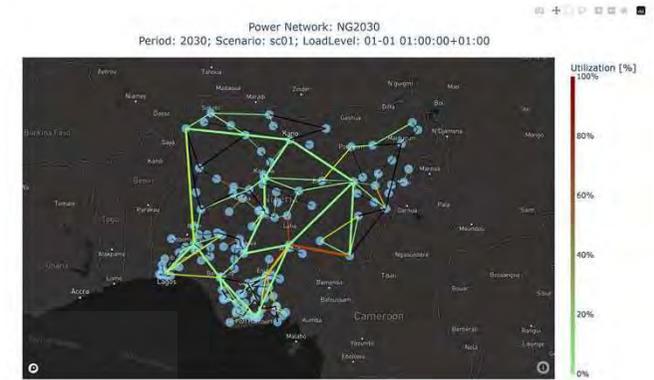
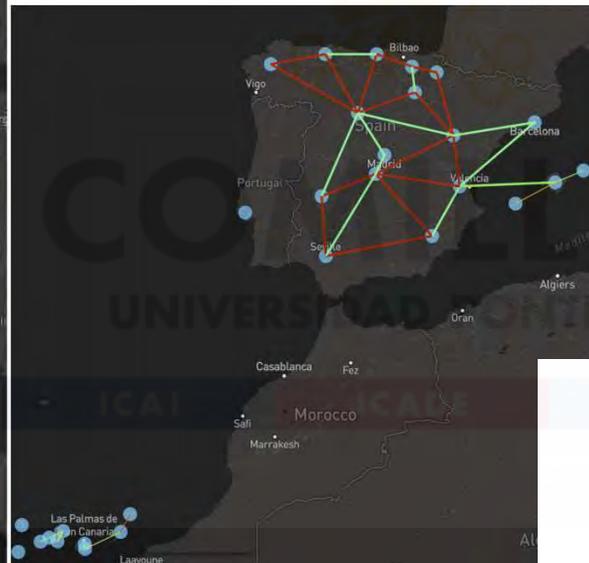


Quelques études de cas

Europe TF2030



Espagne ES2030



Nigeria NG2030

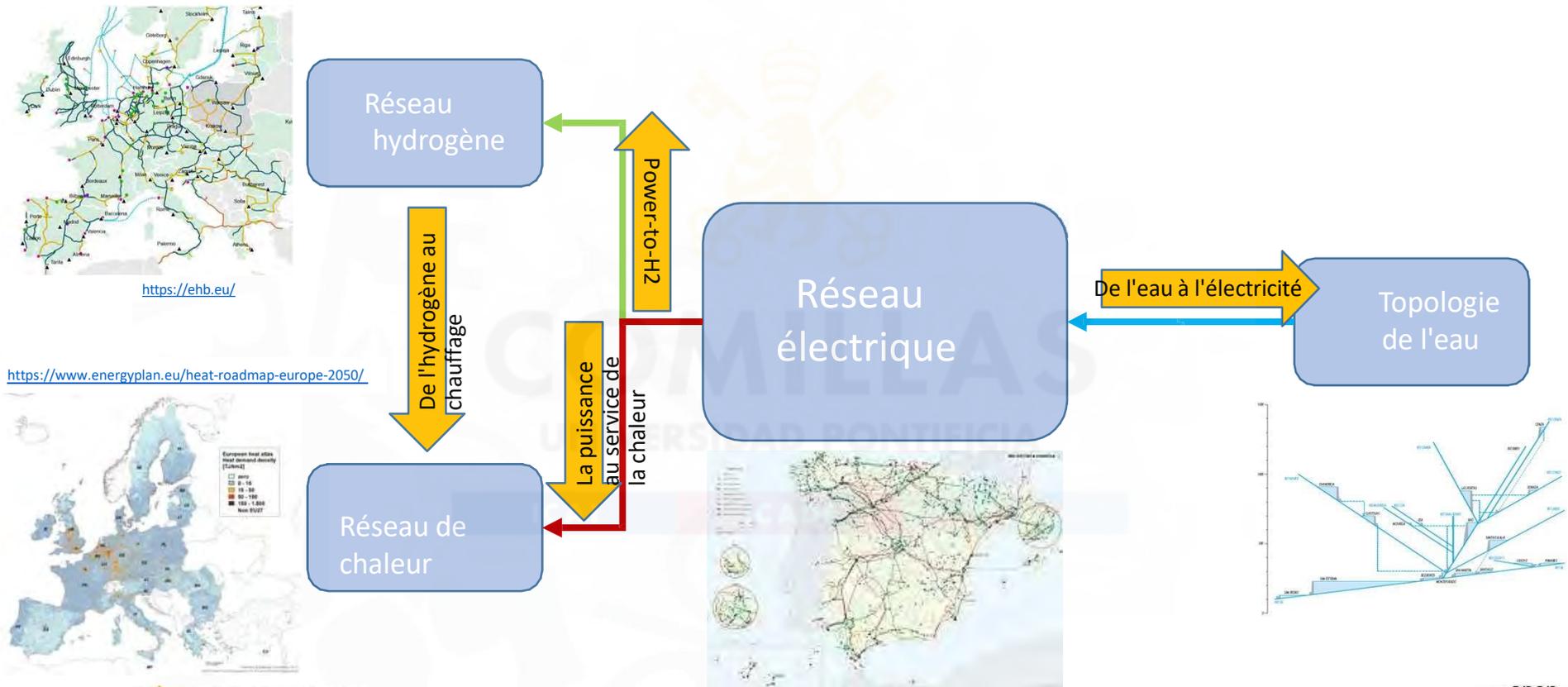
Cas Espagne SEP2030
2999548 lignes, 3513436 colonnes, 11508142 nonzeros
Cas Espagne continentale ES2030
5162243 lignes, 6832942 colonnes, 21554828 nonzeros
Cas Europe TF2030
39700167 lignes, 34702184 colonnes et 123300396 nonzeros

2

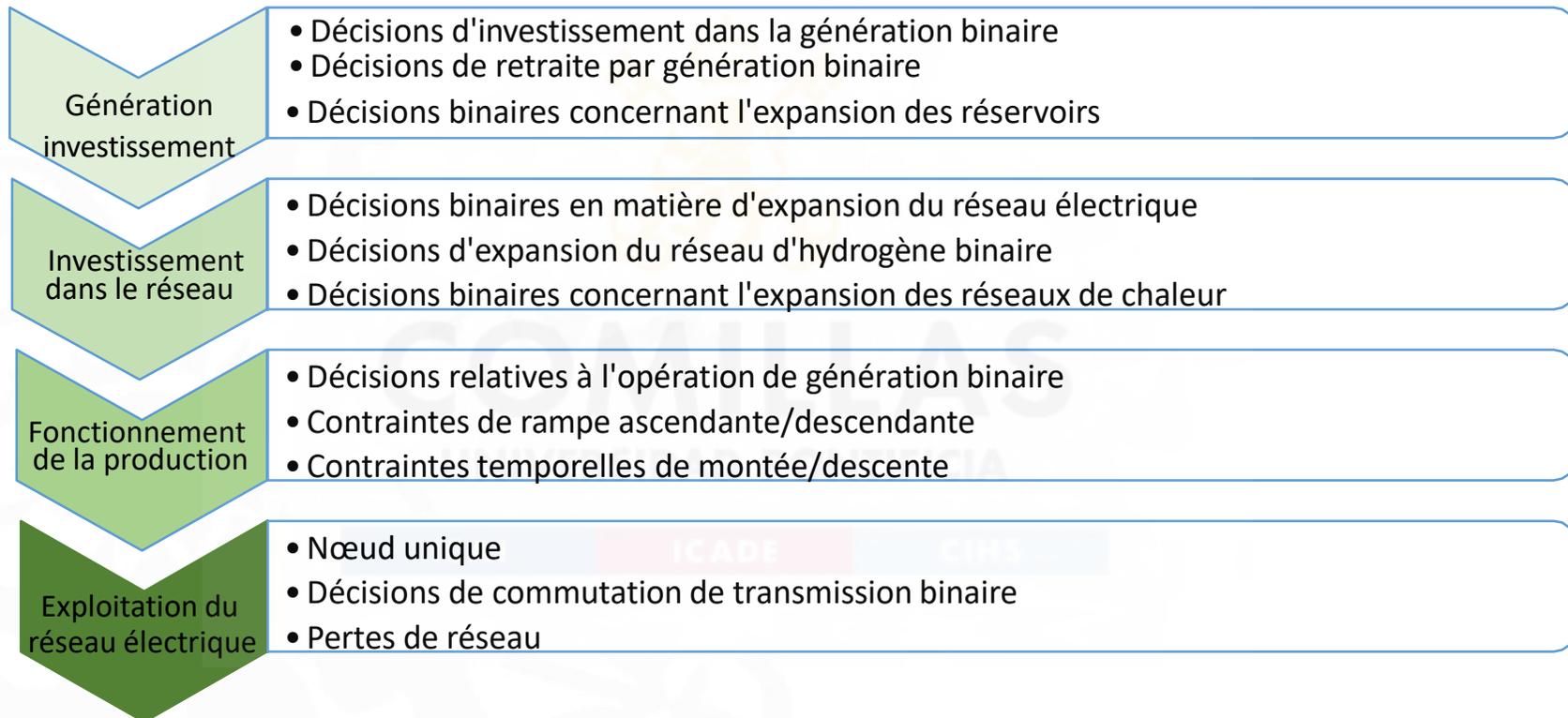
1. Introduction
2. Modélisation
3. Études de cas

Modélisation

Réseaux d'électricité/hydrogène/chaleur/eau Transporteurs multi-énergies. Couplage de secteurs

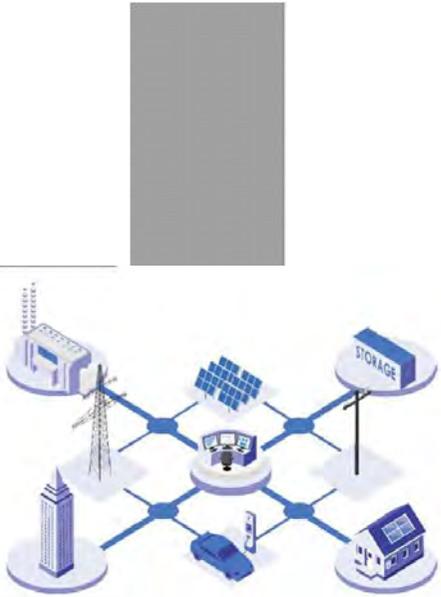


Options de modélisation



Aperçu de la modélisation

BOTTOM-UP
APPROACH



Source : EPRI

- Construit selon un paradigme **ascendant**
- Déterminer la **production, le stockage et l'utilisation** optimaux de l'énergie.
- la **planification des ressources de transport** (IRP, GEP+SEP+TEP).
- Fournit un **plan d'investissement** optimal tout en **en tenant compte** du fonctionnement du système pour **minimiser le coût total**
- Domaine **temporel**
 - **pluriannuel** (dynamique, anticipation parfaite) avec **8736 heures/an** ou **étapes représentatives**
 - **Durée flexible du pas de temps** (par exemple, pas de temps de deux heures, de trois heures ou de quatre heures)
- Il utilise la **programmation linéaire en nombres entiers mixtes** (fonctionne sur **GUROBI, GLPK ou CBC**) pour résoudre le problème.

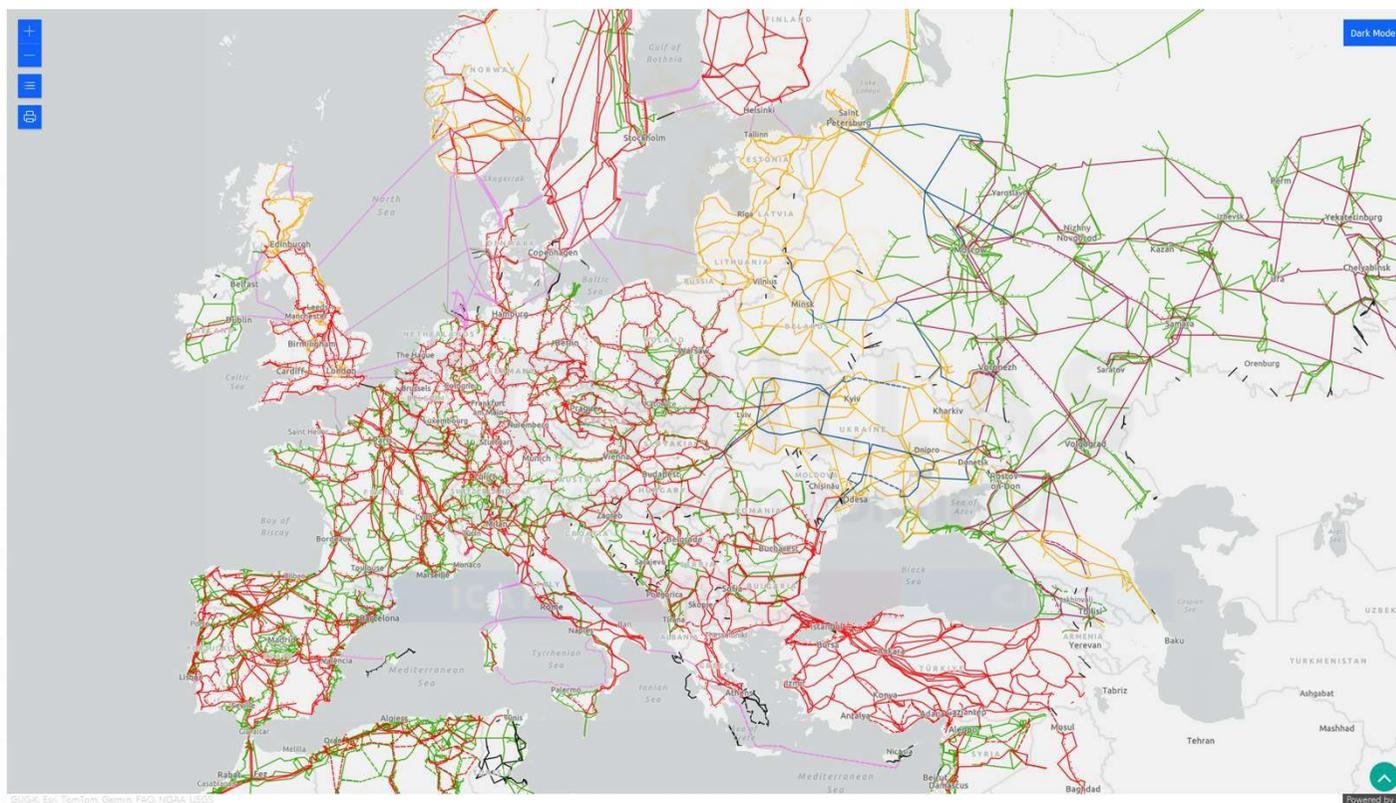


mai 2024

9



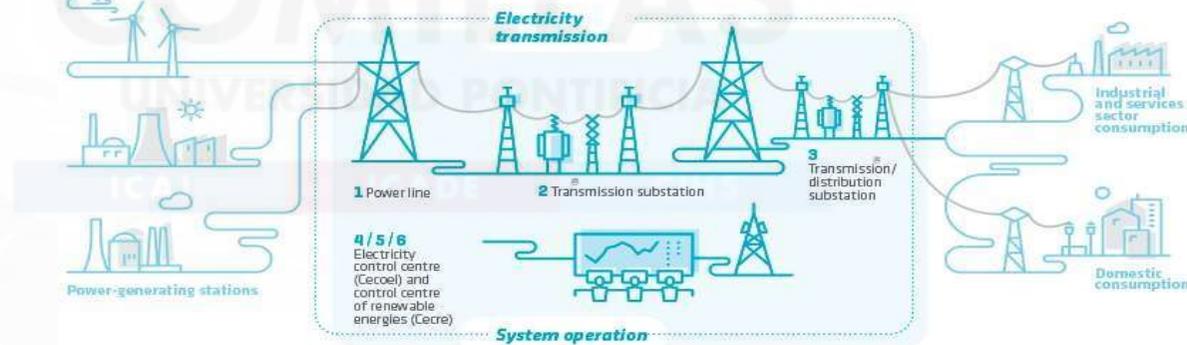
Représentation géographique



-  Nœud
Nœud électrique
-  Zone
NUTS2, NUTS3
-  Zone *Pays*
Région
-  *CSW, CSE, CCS*

Principales caractéristiques de la modélisation (i)

- Flux de puissance DC (DCPF) avec/sans pertes ohmiques
- Engagement unitaire sous contrainte de réseau (NCUC)
- Programmation des opérations de stockage à moyen et à court terme (par exemple, pompage hydroélectrique, batteries).



Principales caractéristiques de la modélisation (ii)

- **Systèmes de stockage de l'énergie (ESS)** (par exemple, centrales hydroélectriques, stockage d'énergie par pompage en boucle ouverte et fermée, batteries, VE, DSM et solaire thermique)
- Représentation **topologique** des **bassins** (réservoirs en cascade et volumes)
- **Le** pompage-turbinage (PHS), les batteries ou la gestion décentralisée de la demande (DSM) **permettent de déplacer l'énergie entre différentes périodes** et représentent une **faible modification du coût variable d'exploitation**.
 - **Modélisation unitaire de l'ESS**



Principales caractéristiques de la modélisation (iii)

- Marge minimale de réserve d'adéquation [p.u.]
- Puissance minimale de fonctionnement du moteur synchrone (inertie) [s]
- Émissions de carbone maximales du système [tCO₂]
- Énergie SER minimale du système (Renewable Portfolio Standard RPS) [GWh]

Production, stockage et extension du réseau de transport (GEP+SEP+TEP)



- Détermine les plans d'investissement/de retraite des nouveaux actifs afin de répondre à la demande prévue à un coût total minimal.
- Générateurs candidats prédéfinis par l'utilisateur, ESS et lignes de transmission.
 - Les lignes candidates peuvent être des circuits CCHT ou CVC.

Faire face à l'incertitude

- Plusieurs **paramètres stochastiques** susceptibles d'influencer les décisions d'expansion optimales sont pris en compte.
- Les **scénarios d'opération** sont associés à :
 - Apports naturels d'eau
 - Sources d'énergie renouvelables
 - Demande d'électricité



Demande et réserves d'exploitation

- Équilibre entre la production et la demande [GW]
- Réserves d'exploitation à la hausse et à la baisse (aFRR, mFRR) [GW] fournies par les générateurs contrôlables (TGCC, hydroélectricité à accumulation) et les systèmes de stockage d'énergie (pompage hydroélectrique, batteries),
y compris l'activation de la réserve [GWh]
- Paramètre d'activation de la réserve : une proportion (par exemple, 25-30 %) de la puissance fournie en tant que réserve d'exploitation qui doit être déployée en tant qu'énergie.
- Réponse à la demande

S. Huclin et al. "Exploring the roles of storage technologies in the Spanish electric system with high share of renewable energy" Energy Reports 8:4041-4057, November 2022. [10.1016/j.egy.2022.03.032](https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.03.032)

Sous-système thermique

- **Sortie minimale** et **deuxième bloc** d'un unité engagée (toutes sauf les unités VRES) [p.u.]
- Production totale d'une unité engagée [GW]
- **Relation logique** entre l'engagement, l'état de **démarrage** et d'arrêt d'une unité engagée [u.p.]
- **Montée** et **descente** maximales pour le deuxième bloc d'une unité thermique [MW/h]
- **Temps minimum de montée** et de **descente** d'une unité thermique [h]
- **Production d'énergie unitaire** minimale/maximale pour une période donnée (hebdomadaire, mensuelle, annuelle)
- **Coûts à vide**, **variables**, de réserve d'exploitation et de démarrage.



Énergie renouvelable variable (ERV)

- Énergie solaire photovoltaïque, énergie éolienne terrestre et marine, biomasse, cogénération, hydroélectricité au fil de l'eau, biogaz
- Production variable horaire minimale et maximale



Sous-systèmes hydroélectriques et de stockage



- Hydroélectricité, pompage-turbinage en boucle ouverte et fermée (PHS), PHS traités individuellement et stockage en batterie du système
- VE (charge passive, charge intelligente et V2G)
- Inventaire énergétique de l'ESS [GWh] [hm]³
- Sorties d'énergie pour représenter la production de H2 ou de km pour les VE
- Charge totale d'une unité ESS [GW]
- Charge minimale et maximale d'un ESS [p.u.]
- Incompatibilité entre la charge et la décharge d'un ESS [p.u.]
- Montée et descente maximales de la rampe [MW/h]
- Stockage horaire minimum et maximum [GWh]

Bassins en cascade

Tajo

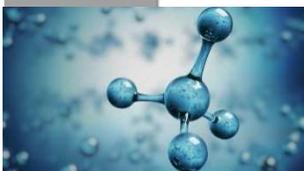


Source : Iberdrola

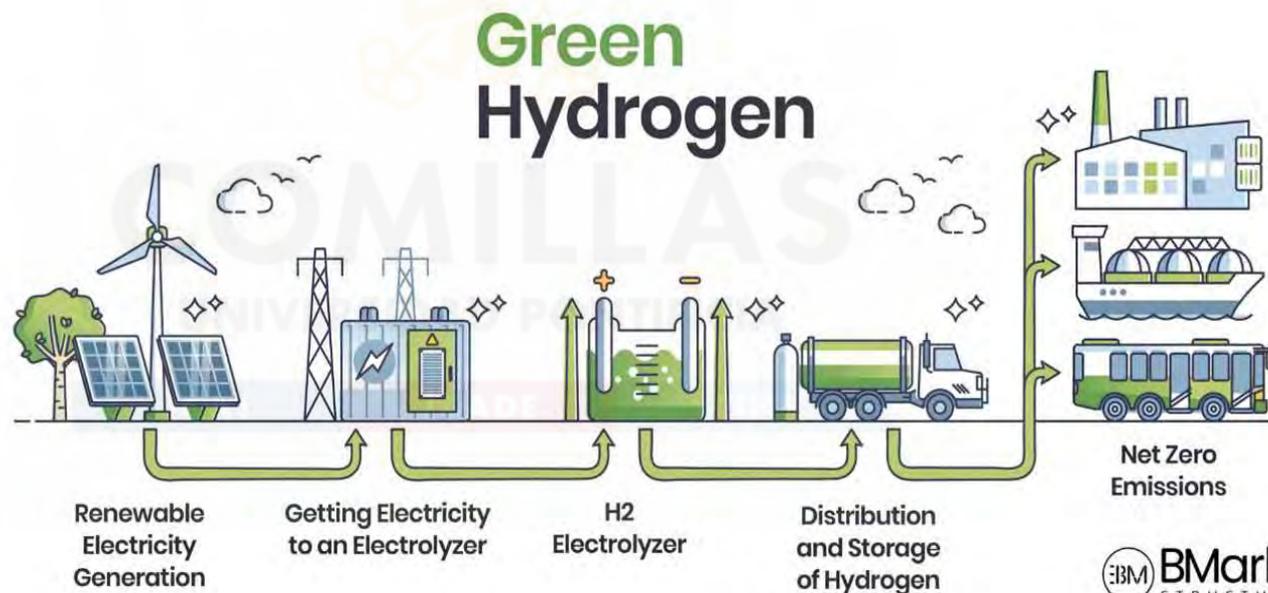


Le vecteur énergétique de l'hydrogène

- Demande d'hydrogène
- Réseau hydrogène
- **Electrolyseur** (consomme de l'électricité pour produire de l'hydrogène)

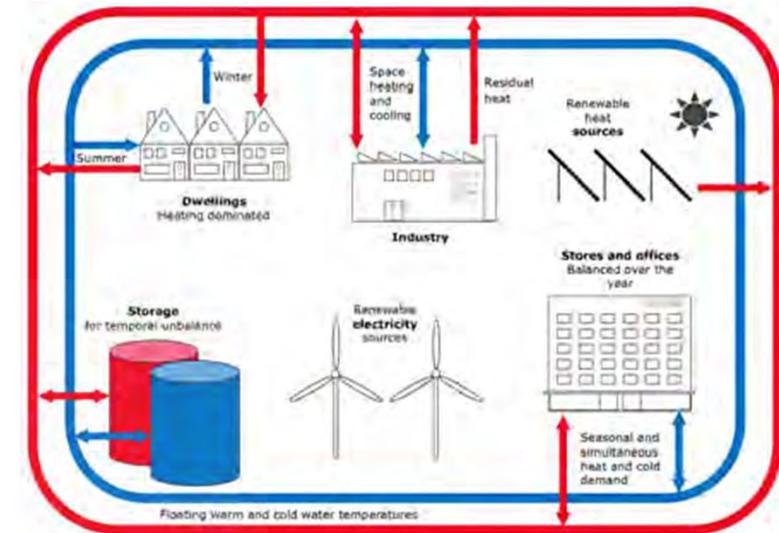


<https://bmarkostructures.com/blog/what-are-hydrogen-electrolyzers/>



Transporteur d'énergie thermique

- Demande de chaleur
- Réseau de chaleur
- Pompe à chaleur, chauffage électrique (consomme de l'électricité pour produire de la chaleur)
- CHP. Cogénération (production simultanée d'électricité et de chaleur)
- Chauffage à combustible, chaudière
 - Le chauffage à l'hydrogène peut être utilisé comme combustible (connexion des deux transporteurs)



Données d'entrée des systèmes électriques, hydroélectriques, d'hydrogène et de chauffage

<https://opentepes.readthedocs.io/en/latest/InputData.html#hydro-system-input-data>



Electric System Input Data

All the input files must be located in a folder with the name of the case study.

openTEPES

version: 4.0.0

Navigation

Introduction

Electric System Input Data

- Acronyms
- Dictionaries, Sets
- Input files
- Options
- Parameters
- Period
- Scenario
- Stage
- Adequacy reserve margin
- Maximum CO₂ emission
- Minimum RES energy
- Duration
- Electricity demand
- System inertia
- Upward and downward operating reserves
- Generation
- Variable maximum and minimum generation
- Variable maximum and minimum consumption
- Variable fuel cost
- Variable emission cost
- Energy inflows
- Energy outflows
- Variable maximum and minimum storage
- Variable maximum and minimum energy
- Electricity transmission network
- Node location
- Hydropower System Input Data
 - Dictionaries, Sets
 - Natural hydro inflows
 - Natural hydro outflows
 - Reservoir
 - Variable maximum and minimum reservoir volumes
- Hydrogen System Input Data
 - Hydrogen demand

Acronyms

Acronym	Description
AC	Alternating Current
aFRR	Automatic Frequency Restoration Reserve
AWE	Alkaline Water Electrolyzer (consumes electricity to produce hydrogen)
BESS	Battery Energy Storage System
FHU	Fuel Heating Unit (Fuel to Heat: consumes any fuel other than hydrogen to produce heat)
CC	Capacity Credit
CCGT	Combined Cycle Gas Turbine
CHP	Combined Heat and Power, Cogeneration (produces electricity and heat simultaneously)
DC	Direct Current
DCPF	DC Power Flow
DR	Demand Response
DSM	Demand-Side Management
DSR	Demand-Side Response
EHU	Electrical Heating Unit (Power to Heat: consumes electricity to produce heat)
EFOR	Equivalent Forced Outage Rate
ELZ	Electrolyzer (Power to Hydrogen: consumes electricity to produce hydrogen)
ENS	Energy Not Served
ENTSO-E	European Network of Transmission System Operators for Electricity
ESS	Energy Storage System
EV	Electric Vehicle
mFRR	Manual Frequency Restoration Reserve
H ₂	Hydrogen
HHU	Hydrogen Heating unit (Hydrogen to Heat: consumes hydrogen to produce heat)
HNS	Hydrogen Not Served
HP	Heat Pump (power to heat: consumes electricity to produce heat)
HTNS	Heat Not Served
NTC	Net Transfer Capacity
OCGT	Open Cycle Gas Turbine
PHS	Pumped-Hydro Storage
PNS	Power Not Served
PV	Photovoltaics
RES	Renewable Energy Source
TTC	Total Transfer Capacity
VOLT	Value of Lost Load



mai 2024

23

Résultats des sorties

<https://opentepes.readthedocs.io/en/latest/OutputResults.html>



Output Results

Some maps of the electricity transmission network and the energy share of different technologies is plotted.

openTEPES

version 4.16.0

Navigation

- Introduction
- Electric System Input Data
- Hydropower System Input Data
- Hydrogen System Input Data
- Heat System Input Data
- Output Results
 - Investment/Retirement
 - Generation operation
 - ESS operation
 - Reservoir operation
 - Electricity balance
 - Electricity network operation
 - Hydrogen balance and network operation
 - Heat balance and network operation
- Costs and revenues
- Marginal information
- Operational flexibility
- Mathematical Formulation
- Research projects
- Publications
- Download & Installation
- Contact Us

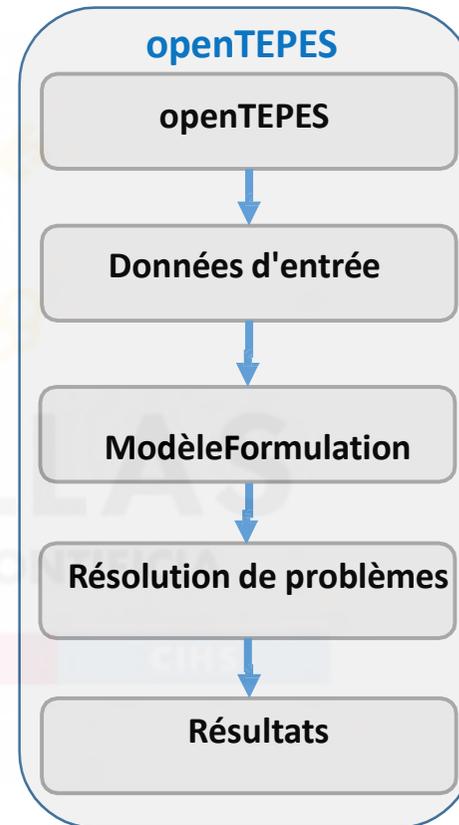
Quick search

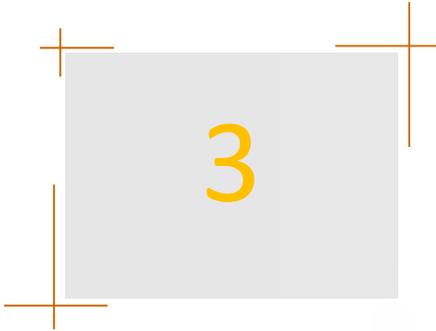


Résultats des sorties

- **Investissement** : (production, stockage, réservoirs hydroélectriques, lignes électriques, canalisations d'hydrogène et caloducs) décisions d'investissement
- **Exploitation** : engagement des unités, démarrage et arrêt des unités non renouvelables, production des unités et agrégation par technologies (thermique, hydroélectricité à accumulation, hydroélectricité pompée, SER), réduction des SER, flux des lignes électriques, des conduites d'hydrogène et des caloducs, pertes ohmiques des lignes, angles de tension des nœuds, réserves d'exploitation à la hausse et à la baisse, niveaux des stocks d'ESS, volumes des réservoirs hydroélectriques, électricité, hydrogène et chaleur non desservis.
- **Émissions** : Émissions de CO2 par unité
- **Marginal** : Coûts marginaux locaux à court terme (CMLT), valeur de l'énergie stockée, valeur du volume d'eau
- **Économique** : coûts d'investissement, d'exploitation, d'émission et de fiabilité, et revenus de l'exploitation et des réserves d'exploitation.
- **Flexibilité** : flexibilité assurée par la demande, par les différentes technologies de production et de consommation, et par la puissance non desservie.

Structure d'openTEPES





1. Introduction
2. Modélisation
3. Études de cas

COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

Études de cas

ICAI

ICADE

CIHS



Installation



Easy-way (paquetage Python)

1. Miniconda. Choisissez le programme d'installation 64 bits si possible.



<https://docs.conda.io/projects/miniconda/en/latest/>

2. Packages et Solver :

1. Lancer une nouvelle invite de commande Anaconda
2. [Installer openTEPES via pip](#) par
3. Installer le solveur

```
pip install openTEPES
```

Hard-way (Clone ou téléchargement)

1. Cloner le dépôt openTEPES.

1. Lancez l'[invite de commande Anaconda](#)
2. Configurez le PATH en
cd "C:\NUsers\N<nom d'utilisateur>\N...\NopenTEPES" (Notez que le chemin d'accès est l'endroit où se trouve le fichier Qui a été cloné)

3. [Installer openTEPES via pip](#) en
2. Télécharger à partir du site web (ReadTheDocs), et installer comme s'il s'agissait d'un clone.



Exécuter dans une invite Anaconda

Si elle est installée avec pip
(situé dans C:\ProgramData\miniconda3\Scripts) (situé dans
C:\ProgramData\anaconda3\Scripts)

`openTEPES_main.exe`

S'il est cloné, il doit être
exécuté à partir du dossier
où a été cloné

Sélectionner

- Annuaire
- Cas
- Solveur
- Résultats
- Informations sur le journal

`python openTEPES_main.py`

Installation de Gurobi

- Installer gurobi à partir d'une invite Anaconda (en tant qu'administrateur ou non)
`conda install -c gurobi gurobi`
- S'inscrire à un compte gurobi gratuit en tant qu'universitaire et se connecter
<https://portal.gurobi.com/iam/register/>
- Demande de licence académique gratuite : Licence académique avec nom d'utilisateur
<https://portal.gurobi.com/iam/licenses/request/?type=academic>
- Vous obtiendrez quelque chose comme ceci
`grbgetkey ae36ac20-16e6-acd2-f242-4da6e765fa0a`
- Créez une invite cmd et allez dans le dossier Python
`C:\ProgramData\miniconda3` ou `C:\ProgramData\anaconda3`
- Utiliser `grbgetkey ae36ac20-16e6-acd2-f242-4da6e765fa0a`
- Vous obtiendrez un fichier texte `gurobi.lic` avec la licence liée à votre nom d'utilisateur et au nom de votre PC.
- Copier la licence dans le dossier Python
`C:\ProgramData\miniconda3`
`C:\ProgramData\anaconda3`

Installation de CPLEX

- Allez sur IBM ILOG CPLEX Optimization Studio (<https://www.ibm.com/products/ilog-cplex-optimization-studio>) et cliquez sur Try it free.
- Il vous sera demandé de créer un compte en tant qu'universitaire ou d'utiliser un compte déjà existant.
- Vous serez dirigé vers la page de téléchargement
- Téléchargez la version correspondant à votre système d'exploitation et installez-la.
- Copier le fichier `cplex.exe` du dossier (`C:\NProgram Files\NIBM\NILOG\NCPLEX_Studio_Community2211\Ncplex\Nbin`) dans le dossier Python.

Projets de recherche



<https://opentepes.readthedocs.io/en/latest/Projects.html>

OpenMod Africa

- [Modélisation du marché de l'électricité](#), développée pour Repsol. Novembre 2023 - avril 2024. [L. Olmos, A. Ramos, S. Gómez Sánchez](#)
- [Outils de simulation des prix du marché Day-ahead \(HESIME\)](#), développé pour le Ministère de la Science et de l'Innovation/Agence de Recherche de l'Etat (10.13039/501100011033) dans le cadre du programme Partenariats Public-Privé avec les fonds NextGenerationEU/PRTR (CPP2022-009809). Avril 2023 - mars 2026. [L. Olmos, A. Ramos, S. Gómez Sánchez](#)
- [Open Modelling Toolbox for development of long-term pathways for the energy system in Africa \(OpenMod4Africa\)](#), développé pour l'Union européenne. Juillet 2023 - juin 2026. [L. Olmos, S. Lumbreras, A. Ramos, M.A.E. Elabbas](#)
- [Intégration hautement efficace et flexible de la biomasse et de l'hydrogène renouvelable pour la production combinée de chaleur et d'électricité à faible coût dans le système énergétique \(Bio-FlexGen\)](#), développé pour l'Union européenne. Septembre 2021 - août 2024. [J.P. Chaves, A. Ramos, J.F. Gutierrez](#)
- [Analyse du rôle des centrales hydroélectriques de pompage-turbinage dans le NECP 2030 espagnol](#), développé pour Iberdrola. Juillet 2023 - octobre 2023. [A. Ramos, P. Linares, J.P. Chaves, M. Rivier, T. Gómez, A. Sánchez, F. Martín](#)
- [Routier à la préparation de la candidature à l'appel sur les systèmes de stockage d'énergie innovants](#), développé pour Glide Energy. Juin 2023 - octobre 2023. [L. Rouco, A. Ramos, F.M. Echavarren, R. Górriz](#)
- [Analyse des avantages techniques et économiques de la production solaire thermique dans le système péninsulaire espagnol](#), développée pour ProTermosolar. Mars 2023. [A. Ramos, L. Sigrist](#)
- [Hydro generation advanced systems : modeling, control, and optimized integration to the system \(AVANHID\)](#), développé pour le Ministère de la Science et de l'Innovation/Agence de Recherche de l'Etat (10.13039/501100011033) dans le cadre du programme Public-Private Partnerships with NextGenerationEU/PRTR funds (CPP2021-009114). Décembre 2022 - novembre 2025. [A. Ramos, J.M. Latorre, P. Dueñas, L. Rouco, L. Sigrist, I. Egido, J.D. Gómez Pérez, F. Labora](#)
- [Local markets for energy communities : designing efficient markets and assessing the integration from the electricity system perspective \(OptiREC\)](#), développé pour le ministère de la Science et de l'Innovation/Agence nationale de la recherche (10.13039/501100011033) dans le cadre du programme Strategic projects oriented to the ecological transition and digital transition with NextGenerationEU/PRTR funds (TED2021-131365B-C43). Décembre 2022 - novembre 2024. [A. Ramos, J.P. Chaves, J.M. Latorre, J. García, M. Troncia, S.A. Mansouri, O.M. Valarezo, M. Mohammed](#)
- [Mise en œuvre de la nouvelle génération de modèles d'évaluation intégrée ouverts pour un développement durable net zéro \(DIAMOND\)](#), développés pour l'Union européenne. Octobre 2022 - août 2025. [S. Lumbreras, L. Olmos, A. Ramos](#)
- [Application de la méthode d'analyse coûts-avantages du REGRT-e à l'installation de pompage-turbinage Aguayo II](#), développée pour Repsol. Juin 2022. [A. Ramos, L. Olmos, L. Sigrist](#)
- [Application de la méthode d'analyse coûts-bénéfices ENTISO-e au pompage-turbinage de Los Guájares](#), développée pour VM Energía. Mai 2022 - Juin 2022. [A. Ramos, L. Olmos, L. Sigrist](#)
- [Impact du véhicule électrique sur les marchés de l'électricité en 2030](#), développé pour Repsol. Novembre 2021 - février 2022. [A. Ramos, P. Frías, J.P. Chaves, P. Linares, J.J. Valentín](#)
- [Forum européen de modélisation du climat et de l'énergie \(ECEMF\)](#), développé pour l'Union européenne. Mai 2021 - décembre 2024. [S. Lumbreras, A. Ramos, L. Olmos, C. Mateo, D. Santos](#)
- [Évaluation des besoins de stockage pour le système électrique espagnol à l'horizon 2020-2050 avec une part importante d'énergies renouvelables](#), développée pour l'Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). Janvier 2021 - juin 2022. [A. Ramos, P. Linares, J.P. Chaves, J. García, S. Wogrin, J.J. Valentín](#)
- [FlexEner. Nouveau système énergétique 100% renouvelable, flexible et robuste pour l'intégration des nouvelles technologies dans la production, les réseaux et la demande - Scénarios](#), développé pour Iberdrola dans le cadre du programme Misiones CDTI 2019 (MIG-20201002). Octobre 2020 - décembre 2023. [M. Rivier, T. Gómez, A. Sánchez, F. Martín, A. Ramos, J.P. Chaves, S. Gómez Sánchez, L. Herding](#)
- [Améliorer les outils et les capacités de modélisation des systèmes énergétiques](#), développé pour la Commission européenne. Octobre 2020 - juin 2022. [S. Lumbreras, A. Ramos, P. Linares, D. Santos, M. Ribas, P. Rodríguez](#)
- [MODESC - Plateforme de modèles innovants pour accélérer la transition énergétique vers une économie décarbonée](#), développée pour le ministère de la Science et de l'Innovation dans le cadre du programme Retos Colaboración 2019 (RTC2019-007315-3). Septembre 2020 - décembre 2023. [T. Gómez, M. Rivier, J.P. Chaves, A. Ramos, P. Linares, F. Martín, L. Herding](#)
- [Open ENergy TRANSITION ANALyses for a low-carbon Economy \(openENTRANCE\)](#), développé pour l'Union européenne. Mai 2019 - juin 2023. [L. Olmos, S. Lumbreras, A. Ramos, E. Alvarez](#)
- [Analyse de l'expansion et de l'exploitation du système électrique espagnol à l'horizon 2030-2050](#), développée pour Iberdrola. Janvier 2019 - décembre 2021. [M. Rivier, T. Gómez, A. Sánchez, F. Martín, T. Freire, J.P. Chaves, T. Gerres, S. Huclin, A. Ramos](#)



Études réalisées. Analyse de la transition énergétique (i)

- Lien avec les modèles de systèmes énergétiques (modèles d'évaluation intégrée) pour affiner la représentation du secteur de l'électricité (par exemple, en se concentrant sur le réseau de transmission).
 - Analyser la transition énergétique 2030-2050 à l'échelle européenne et plus particulièrement l'impact des lignes de transmission dans les décisions d'investissement à long terme en matière de production.
- Plan national pour l'énergie et le climat (PNEC) 2030 pour l'Espagne
 - Analyse exhaustive des scénarios 2030 du système électrique espagnol
 - Analyse prospective du système électrique espagnol en 2050

Études réalisées. Analyse du stockage (ii)

- Analyse coûts-bénéfices (ACB) des unités de pompage-turbinage candidates
 - Impact économique des nouvelles unités de pompage-turbinage dans le système électrique
- Rôle futur des systèmes d'énergie solaire (batteries, pompage hydroélectrique, CSP)
 - Analyse de la concurrence entre les batteries (2 à 4 h de stockage), les unités de pompage-turbinage (8 à 60 h de stockage) et le solaire thermique (6 à 9 h de stockage)
- Pénétration des VE et type de charge
 - Impact du VE sur le fonctionnement du système et le type de charge (simple, intelligente, V2G)
- Impact des communautés énergétiques locales sur les investissements en matière de transport avec une représentation détaillée de l'hydroélectricité de stockage en Norvège et en Espagne

D. Santos-Oliveira, J. Lecarpentier, S. Lumbreras, L. Olmos, A. Ramos, M. Chammas, Th. Brouhard *The impact of EV penetration on the European Power System : the Tradeoffs in Storage*. Réseau de recherche en sciences sociales 2024 [10.2139/ssrn.4700642](https://ssrn.com/abstract/4700642)

Études réalisées. Sécurité d'approvisionnement (iii)

- Technologies assurant la fermeté et la flexibilité du système
 - Dans quelle mesure chaque technologie contribue-t-elle à la sécurité de l'approvisionnement (capacité de charge électrique) aux heures critiques ?

openENTRANCE - Impact des LEC sur le fonctionnement du système électrique

- [Open ENergy TRansition ANalyses for a low-carbon Economy \(openENTRANCE\)](#), développé pour l'Union européenne. Mai 2019 - juin 2023. L. Olmos, S. Lumbreras, A. Ramos, E. Alvarez

- Il vise à développer, utiliser et diffuser un système ouvert, Une plateforme de modélisation transparente et intégrée pour évaluer les voies européennes de transition vers une économie à faible émission de carbone.



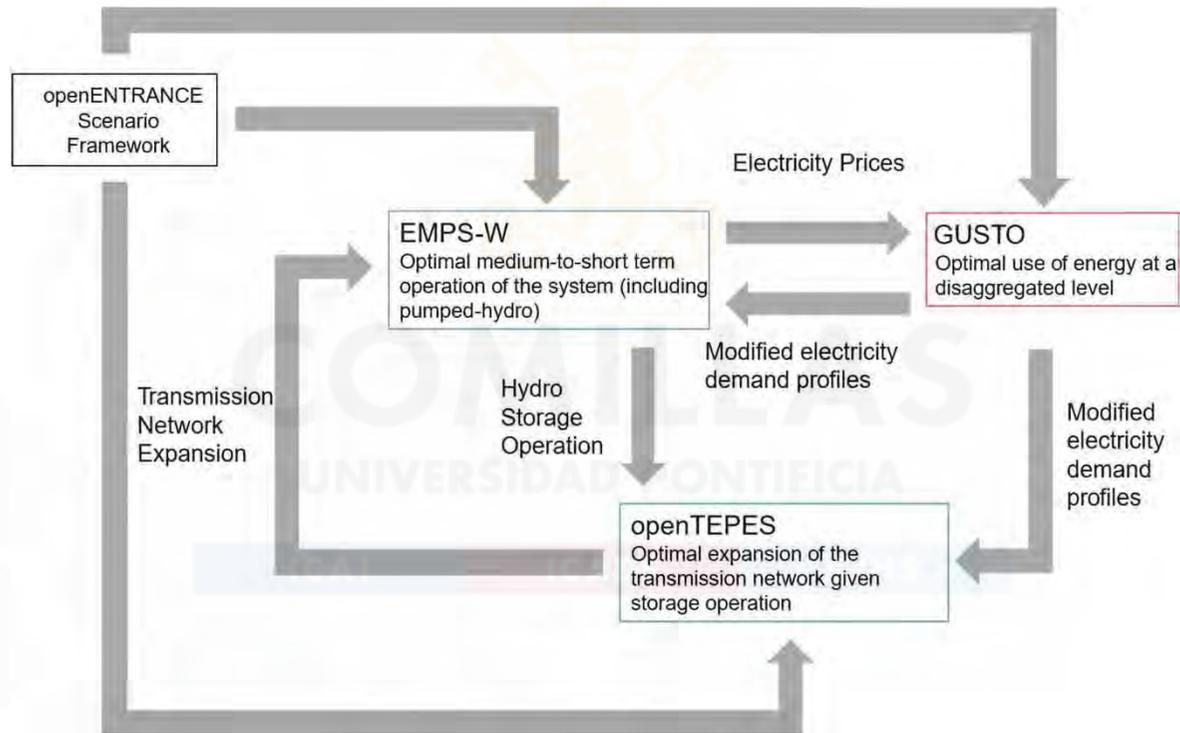
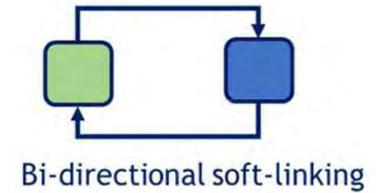
Champ d'application de l'analyse

- Analyse de l'impact sur le **fonctionnement du système**, le **développement du réseau de transport**, le niveau d'utilisation des différentes sources de flexibilité et les prix de gros de l'électricité des **communautés énergétiques locales (CEL)**.
- Évaluer dans quelle mesure la **flexibilité fournie par les LEC** se substitue à celle fournie par le **stockage centralisé** (batteries, hydroélectricité pompée) et le réseau.
- L'introduction des LEC n'est envisagée que dans les systèmes **espagnol** et **norvégien**, qui sont représentés avec un niveau de détail plus élevé (**plusieurs zones par pays et une modélisation plus détaillée de la gestion du stockage**).
- Le **reste du système européen** n'est représenté qu'à un **niveau agrégé** (un seul nœud par pays et une gestion plus simplifiée du stockage).
- Seul le **développement du réseau de transmission est affecté** par une augmentation de la pénétration des LEC.
- Scénario "TechnoFriendly" envisagé : forte sensibilisation à l'environnement, révolution sociétale ascendante et révolution technologique descendante.
- Planification statique : 1 an (horizon 2030) avec une résolution horaire

Europe TF2030



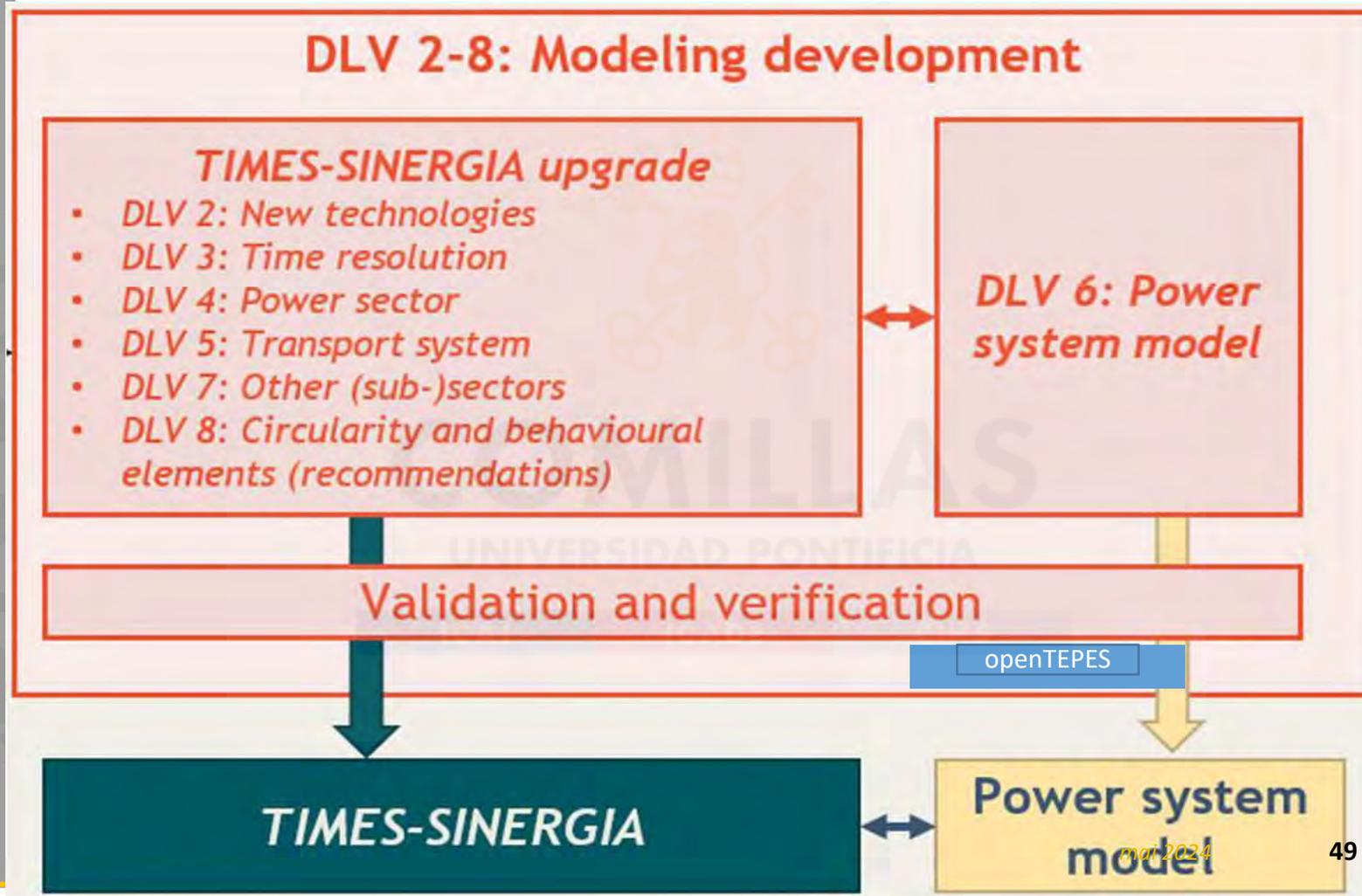
Flux de travail



Connexion d'un ESM avec un modèle du secteur de l'électricité

- Améliorer les outils et les capacités de modélisation des systèmes énergétiques, développé pour la Commission européenne. Octobre 2020 - juin 2022. S. Lumbreras, A. Ramos, P. Linares, D. Santos, M. Pérez-Bravo, A.F. Rodríguez Matas, J.C. Romero
 - Il vise à améliorer la description du système énergétique espagnol dans le modèle [TIMES-SINERGIA](#), depuis les technologies prises en compte ou une résolution temporelle plus élevée jusqu'à la modélisation détaillée du secteur de l'électricité, comme l'inclusion des contraintes de transmission, avec [openTEPES](#).

Flux de travail



Champ d'application de l'analyse

- Développement de caractéristiques supplémentaires du modèle de système énergétique **TIMES- SINERGIA** pour améliorer le système énergétique espagnol
- Connexion descendante avec le modèle du secteur de l'électricité **openTEPES**
- Ces deux modèles sont au cœur de la mise à jour du **PNCE espagnol**.

DIAMOND - Connexion d'un modèle IAM avec un modèle du secteur de l'électricité

- [Mise en œuvre de la nouvelle génération de modèles d'évaluation intégrée ouverts pour un développement durable net zéro \(DIAMOND\)](#), développés pour l'Union européenne. Octobre 2022 - août 2025. S. Lumbreras, L. Olmos, A. Ramos
 - Il permettra d'actualiser, de mettre à niveau et d'ouvrir complètement six IAM emblématiques des processus scientifiques et politiques, en améliorant leurs détails sectoriels et technologiques, leur résolution spatio-temporelle et leur granularité géographique. Il renforcera encore la capacité de modélisation pour évaluer la faisabilité et l'opportunité des trajectoires d'atténuation conformes aux engagements de Paris, leur interaction avec l'adaptation, l'économie circulaire et d'autres ODD, leurs effets sur la répartition et l'équité, et leur résilience aux extrêmes, ainsi que des stratégies solides de gestion des risques et d'investissement.

DIAMOND

comillas.edu

mai 2024

51



Champ d'application de l'analyse

- Une interface interopérable du modèle **openTEPES** sera développée pour **GCAM-Europe**, **OMNIA** et **OPEN-PROM**, ce qui permettra d'évaluer les besoins du réseau dans les scénarios IAM et d'**identifier des solutions sans regret**.
les investissements communs aux scénarios en vue de constituer l'architecture de base d'un plan d'expansion européen

ECEMF - Sur le compromis entre l'hydrogène et l'électricité pour la production de chaleur

- [Forum européen de modélisation du climat et de l'énergie \(ECEMF\)](#), développé pour l'Union européenne. Mai 2021 - décembre 2024. S. Lumbreras, A. Ramos, L. Olmos, C. Mateo, D. Santos Oliveira
 - Il vise à fournir les connaissances nécessaires à l'élaboration des futures politiques énergétiques et climatiques aux niveaux national et européen. À l'appui de cet objectif, l'ECEMF propose une série d'activités visant à atteindre cinq objectifs et à relever les quatre défis énoncés dans le texte de l'appel. Le programme d'événements de l'ECEMF et son nouveau canal de communication basé sur les technologies de l'information permettront aux chercheurs d'identifier et de développer conjointement les questions de recherche les plus urgentes et les plus pertinentes pour les politiques avec différents partenaires de l'ECEMF. pour atteindre les objectifs ambitieux de la politique européenne en matière d'énergie et de climat, en particulier le "Green Deal" européen et le passage à une société neutre sur le plan climatique.



EUROPEAN
CLIMATE + ENERGY
MODELLING
FORUM

comillas.edu



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA
ICAI ICADI CIHS

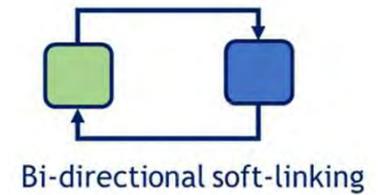
mai 2024

53

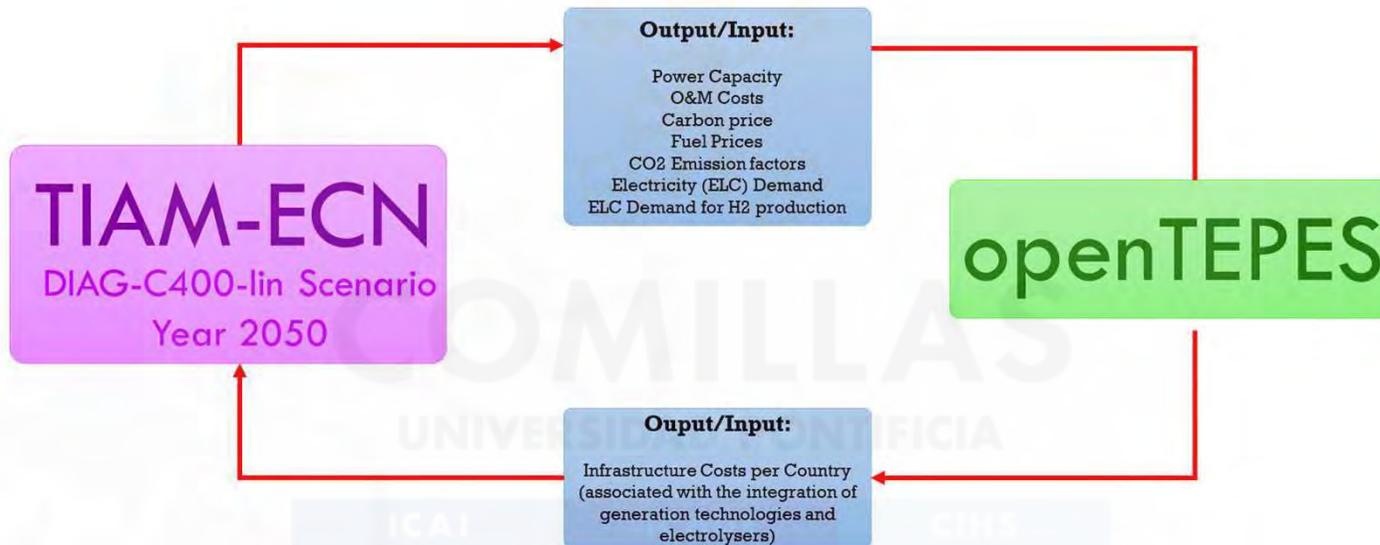


Champ d'application de l'analyse

- Question de recherche : Quel est le **compromis entre l'hydrogène et l'électricité pour la production de chaleur** ?
- Scénario : DIAG-C400-lin, année cible = 2050
- Technologies cibles (déploiement et utilisation à optimiser) :
 - Production d'hydrogène (électrolyseurs)
 - Production de chaleur à partir de SER
 - Réseau de transmission
- Utilisation de TYNDP 2022 Distributed Energy 2050 pour la désagrégation des données



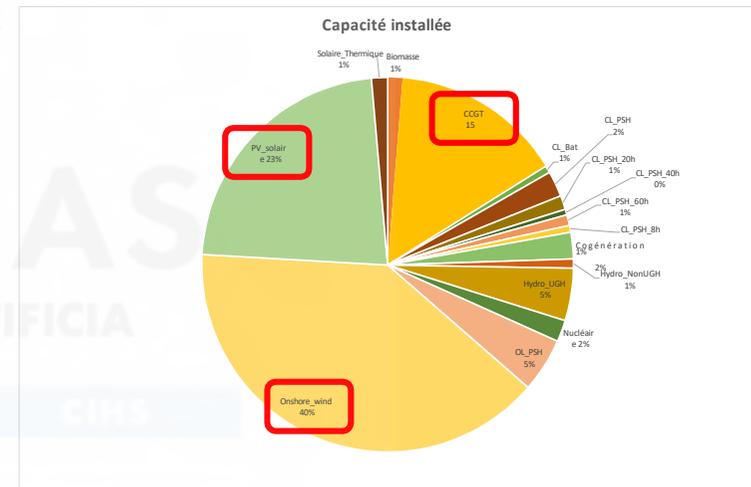
Flux de travail



Critère de convergence : Résultats de l'expansion dans deux itérations consécutives

Espagne continentale SEP2030

- Plan national intégré décennal pour l'énergie et le climat (PNEC)
- Capacité installée : **137 GW**
- Fermeture progressive de la moitié des unités nucléaires (**3,1 GW**), pas d'unités au charbon, CCGT existantes (**24,5 GW**)
- Investissements importants dans l'énergie solaire photovoltaïque (**32,5 GW**) et l'éolien terrestre (**38,2 GW**)
- Hydroélectricité à accumulation et pompage existants
stockage hydroélectrique (**16,5 GW**) et stockage hydroélectrique par pompage supplémentaire (**3,5 GW**)
- Batteries à installer (**2,5 GW**)



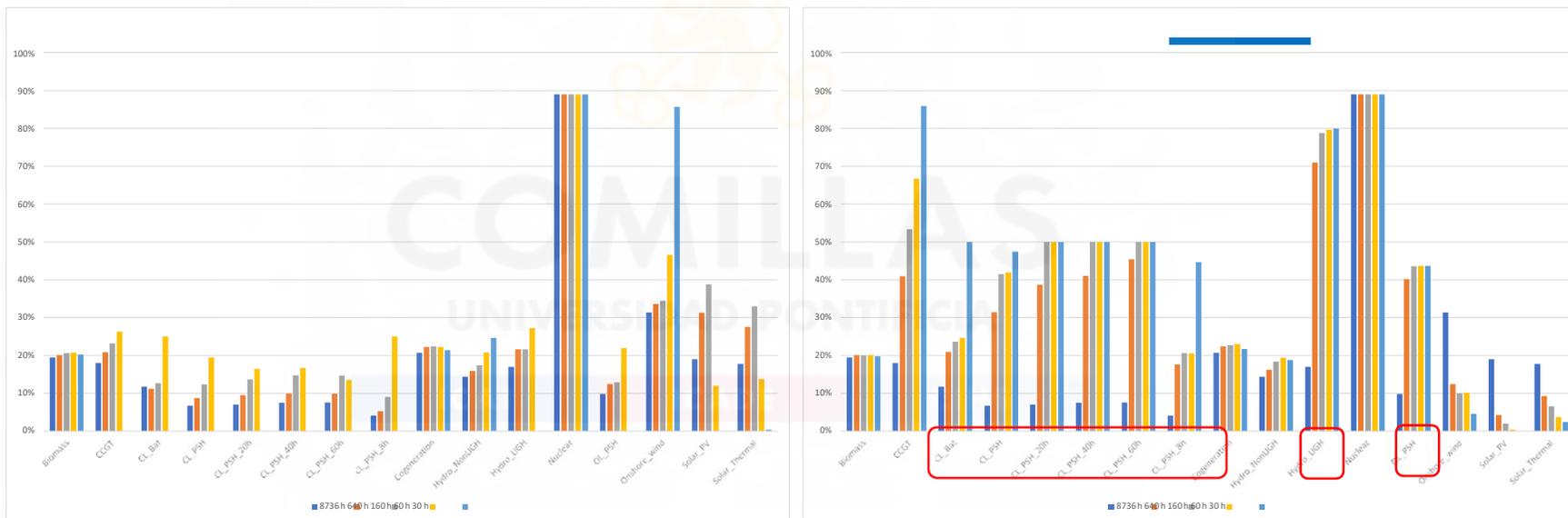
Espagne ES2030



Fermeté/Capacité de charge électrique (ELCC) Capacité ferme équivalente (EFC)

Facteurs de capacité des différentes technologies aux heures de pointe de la demande et de la demande nette

Facteur de capacité pendant les heures de demande maximale Facteur de capacité pendant les heures de demande maximale nette

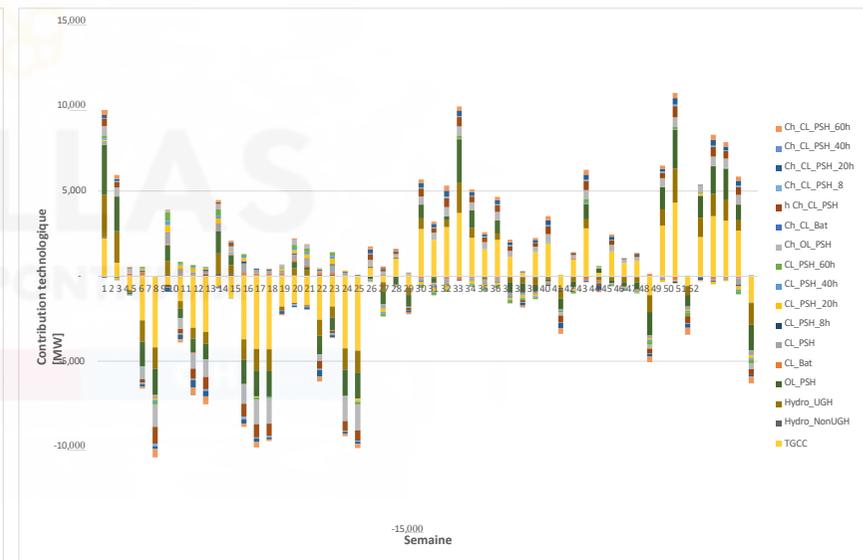
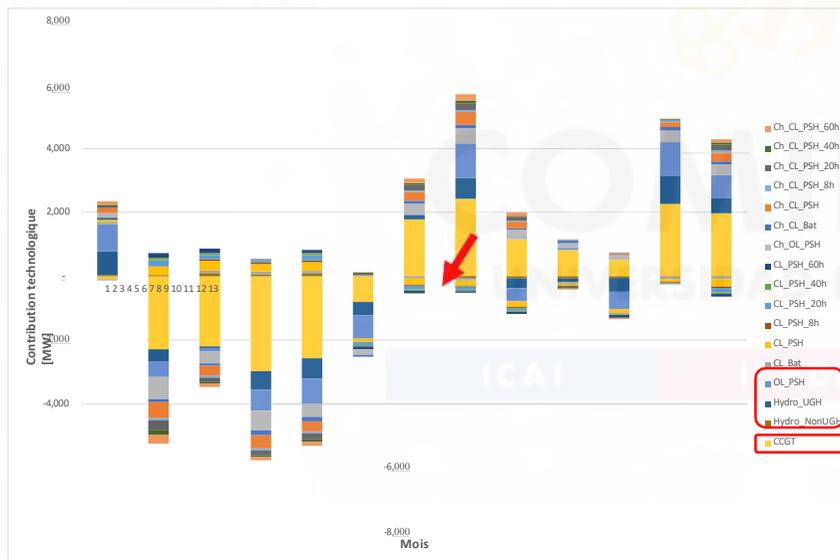


S. Huclin, J.P. Chaves, A. Ramos, M. Rivier, T. Freire-Barceló, F. Martín-Martínez, T. Gómez San Román, Á. Sánchez Miralles [Exploring the roles of storage technologies in the Spanish electric system with high share of renewable energy](#) Energy Reports 8:4041-4057, November 2022. [10.1016/j.egy.2022.03.032](https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.03.032)

A. Ramos, S. Huclin, J.P. Chaves [Analysis of different flexible technologies in the Spain NECP for 2030](#). Frontiers in Built Environment 9, octobre 2023 [10.3389/fbuil.2023.1065998](https://doi.org/10.3389/fbuil.2023.1065998)

Flexibilité

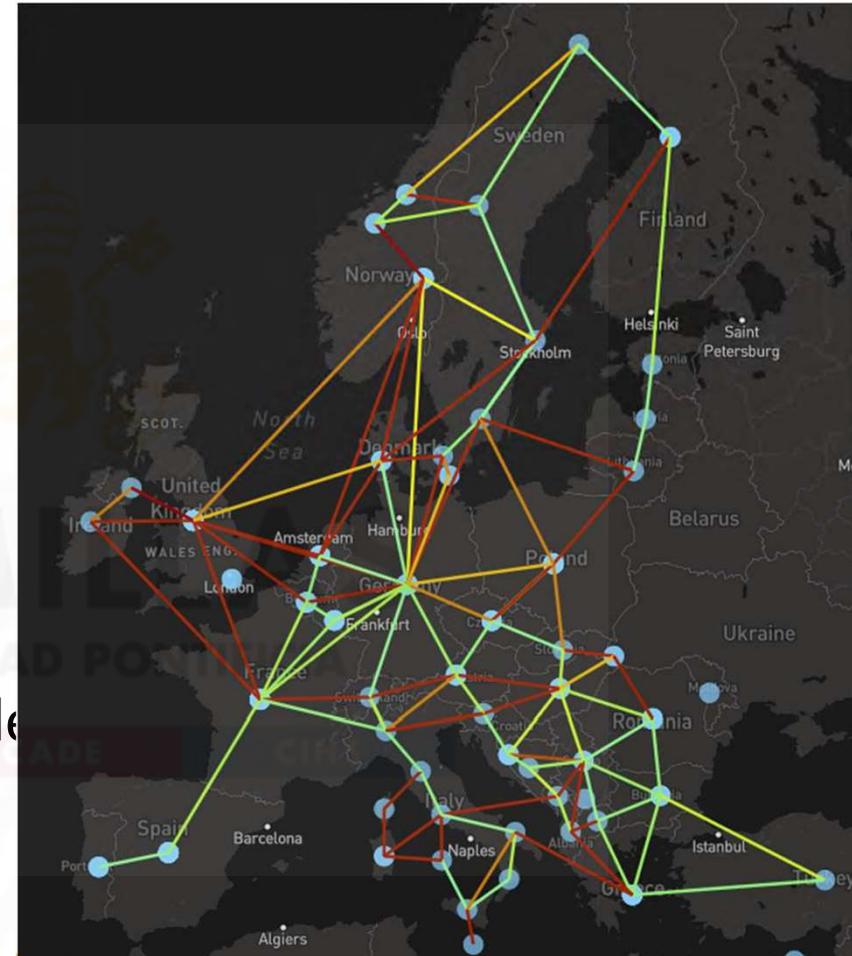
Contribution de la technologie à la variation mensuelle/hebdomadaire de la demande nette (différence entre la valeur et sa moyenne)



Prévisions d'adéquation à moyen terme MAF2030

<https://www.entsoe.eu/outlooks/maf/Pages/default.aspx>

- Quelle sera la situation du système européen en 2025 et 2030 du point de vue de l'adéquation ?
- Comme l'évaluation de la fiabilité et l'analyse des performances réalisées par le NERC aux États-Unis



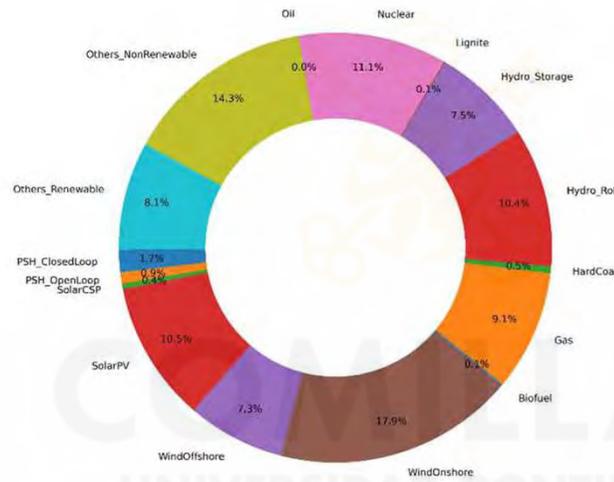
mai 2024

60

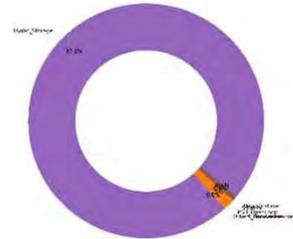
open
TEPES

Mix de production d'énergie

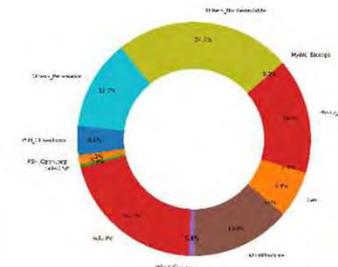
L'Europe



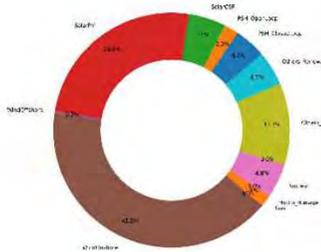
Norvège



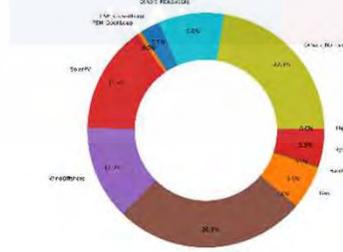
Italie



Espagne



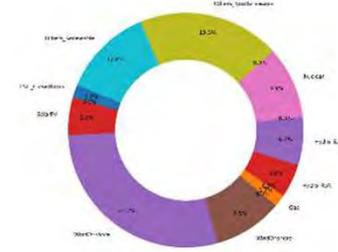
Allemagne



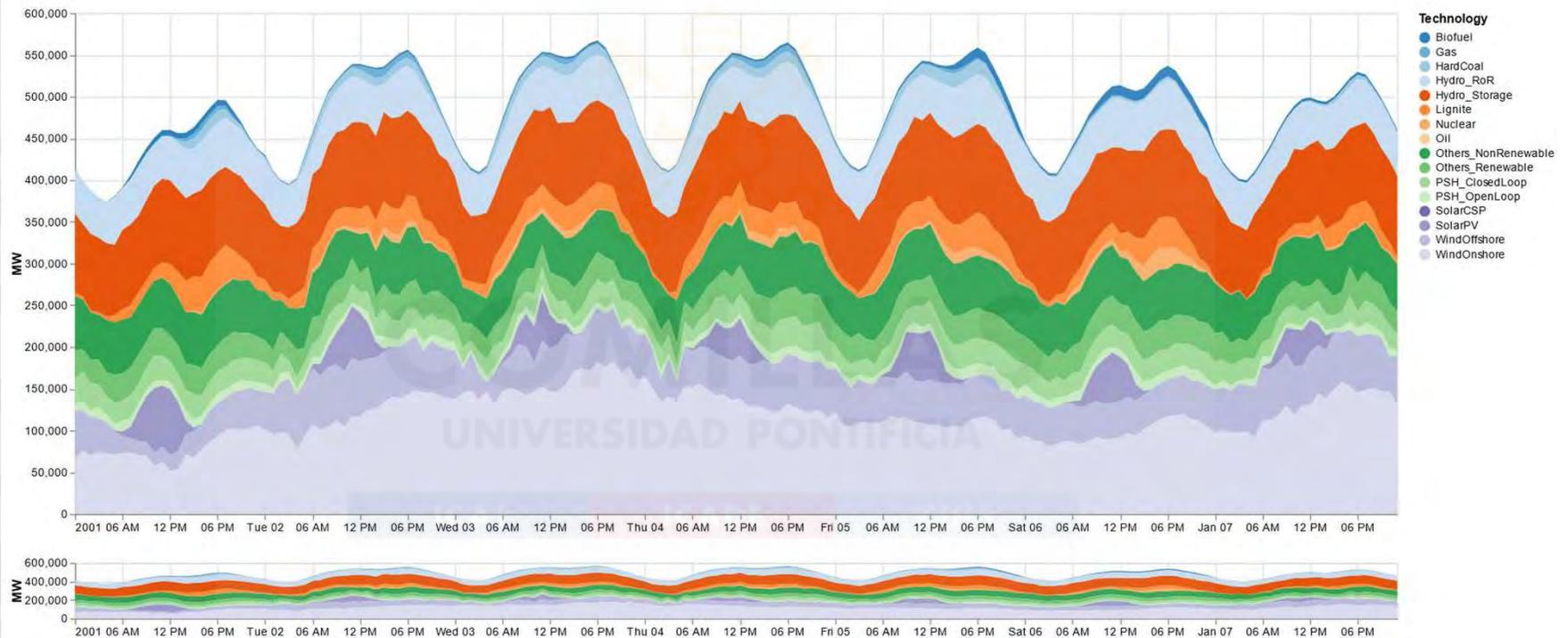
France



ROYAUME-UNI

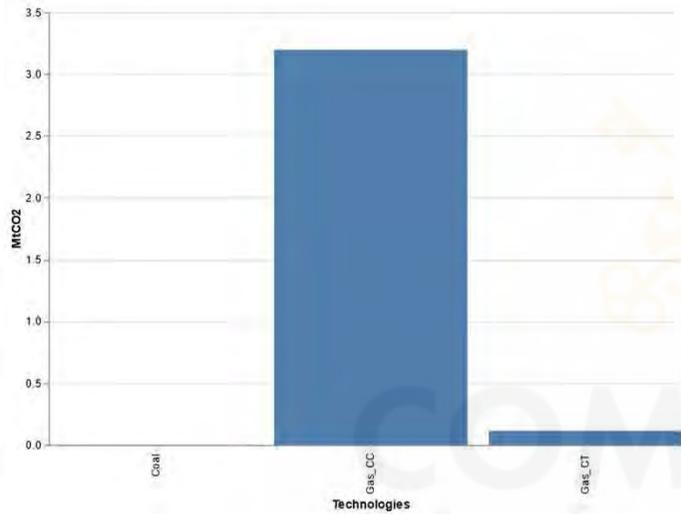


Production technologique horaire

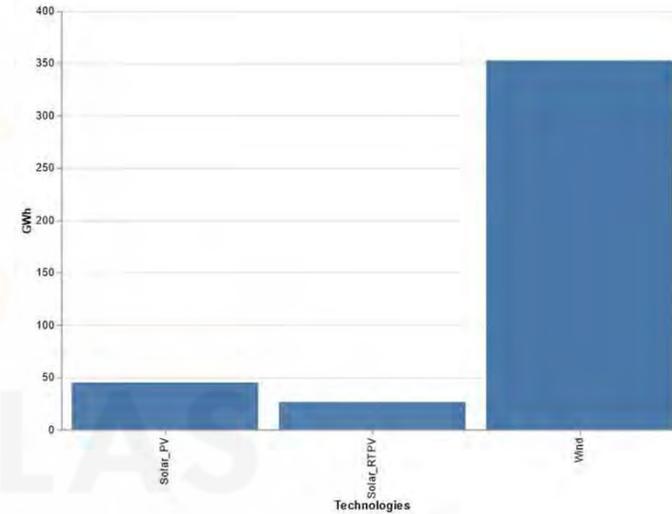


Autres résultats de sortie

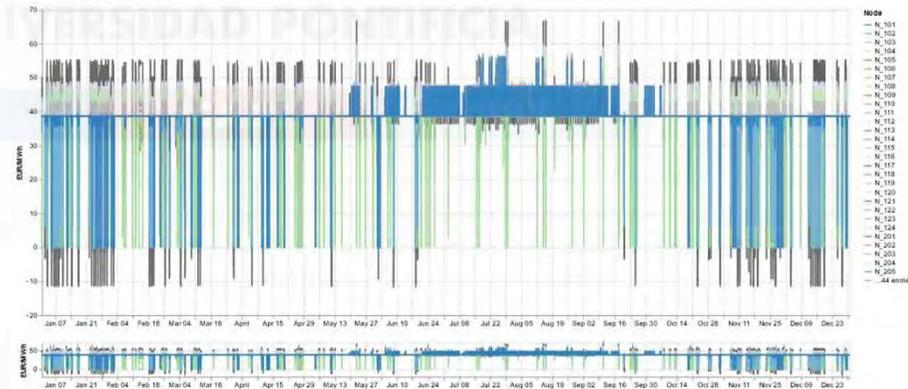
Émissions



Réduction



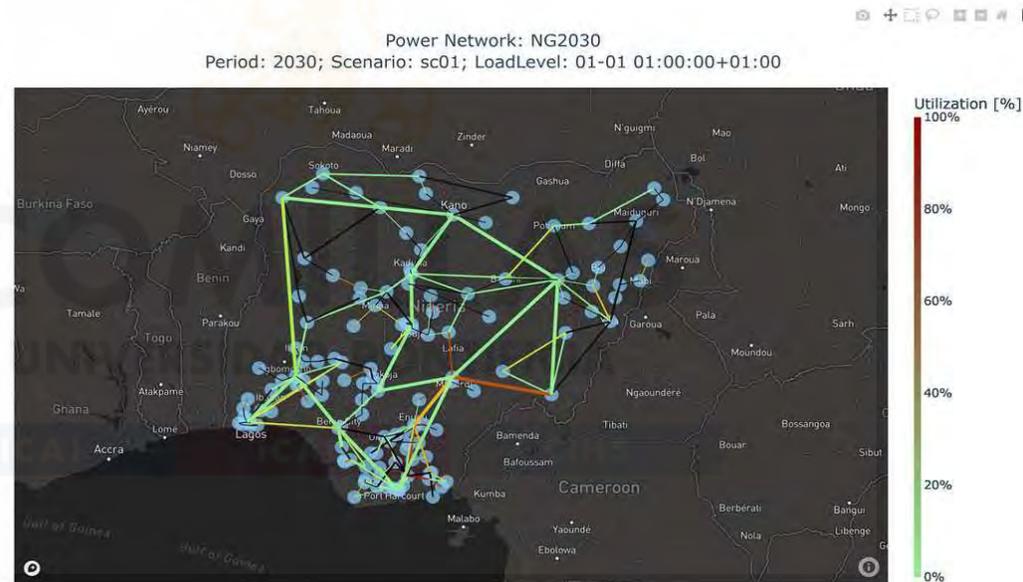
LSRMC



Études possibles dans le cadre d'OpenMod4Africa

- Des études similaires ont déjà été réalisées pour l'un des pools énergétiques régionaux.
 - Extension de la production et/ou du transport d'électricité
 - Analyses opérationnelles des technologies de flexibilité

Nigeria 2030





Merci de votre attention



Andres.Ramos@comillas.edu

ICAI

ICADE

CIHS