

Figure 1 : Représentation schématique du cas-test IEEE 24 bus

Cas d'étude

Sur la Figure 1 est représenté un réseau électrique composé d'un ensemble de nœuds (symbolisés par des rectangles noirs, les « bus »). Sur ces nœuds, il peut y avoir des générateurs (représentés par un cercle avec le symbole courant alternatif) et/ou des points de demande (représentés par des flèches).

Une manière de gérer ce type de réseau électrique est d'entreprendre chaque jour une planification prévisionnelle *optimale* des moyens de production à partir d'une prévision de la demande pour le jour suivant. Le jour même, les prévisions sont adaptées en quasi-temps réel afin de répondre aux différences observées entre la réalité et ce qui avait été prévu la veille.

De plus en plus, les modèles de prédiction de la demande sont modélisés par apprentissage. Cette prévision peut être faite pour chaque point de demande ou de manière globale. Dans le cadre de ce travail, la demande globale (pour l'ensemble des points de demande du réseau) pour le lendemain a été déjà estimée (Tableau 1) pour un horizon de 24 heures¹.

<i>Hour</i>	<i>System Demand</i> MW	<i>Hour</i>	<i>System Demand</i> MW
1	1598.252	13	2266.178
2	1502.834	14	2266.178
3	1431.270	15	2218.469
4	1407.416	16	2218.469
5	1407.416	17	2361.596
6	1431.270	18	2385.450
7	1765.233	19	2385.450
8	2051.487	20	2290.032
9	2266.178	21	2170.760
10	2290.032	22	1979.924
11	2290.032	23	1741.379
12	2266.178	24	1502.834

Tableau 1 : Prévision globale de la demande

Les caractéristiques techniques des générateurs sont données dans le Tableau 2 :

- P_{min} , P_{max} : puissances minimales et maximales des unités quand elles sont en fonctionnement ; naturellement quand elles sont à l'arrêt, la puissance est nulle.
- R^+ , R^- : capacités de réserve positives et négatives ; elles représentent respectivement la puissance que l'unité peut injecter ou retirer de manière quasi-instantanée pour répondre à un imprévu.

¹ Pour pouvoir intégrer les demandes spécifiques en chaque point de demande, il serait nécessaire de prendre en compte les contraintes liées au réseau lui-même comme les capacités maximales de chacune des lignes ainsi que les lois de Kirchhoff entre les tensions, intensités, puissances actives et réactives. Il n'est pas prévu que vous traitiez cet aspect et seule la demande globale sera traitée : c'est à dire qu'il sera fait l'hypothèse que les contraintes du réseau ne sont pas limitantes et donc que le réseau peut accepter les productions électriques planifiées des différentes unités de production.

En général, le gestionnaire du réseau définit un niveau de sécurité pour la réserve totale sur le réseau. Le niveau de sécurité peut être exprimé comme un pourcentage (par exemple 5, 10 ou 15%) de la demande totale instantanée. Le niveau de sécurité peut également être défini en fonction d'une panne potentielle (scenario de l'arrêt d'une unité en fonctionnement) ou peut être défini en lien avec la diminution soudaine de la demande.

Les réserves peuvent être vues comme une contrainte sur la planification (l'ensemble des installations doit permettre d'assurer le besoin de réserves), ou comme des variables additionnelles du problème d'optimisation (la réserve est envisagée comme une variable propre à chaque installation).

- RU, RD : rampes de puissance positives et négatives maximales (attention : en MW/min) limitant les vitesses de variations de puissance².
- UT, DT : temps minimal (en h) à respecter par l'unité en état de fonctionnement ou en arrêt.

<i>Unit</i>	<i>Node</i>	P_{max} MW	P_{min} MW	R^+ MW	R^- MW	RU MW/min	RD MW/min	UT h	DT h
Unit 18	18	400	100	0	0	6.67	6.67	1	1
Unit 21	21	400	100	0	0	6.67	6.67	1	1
Unit 1	1	152	30.4	40	40	2	2	8	4
Unit 2	2	152	30.4	40	40	2	2	8	4
Unit15b	15	155	54.25	30	30	3	3	8	8
Unit 16	16	155	54.25	30	30	3	3	8	8
Unit 23a	23	310	108.5	60	60	3	3	8	8
Unit 23b	23	350	140	40	40	4	4	8	8
Unit 7	7	350	75	70	70	7	7	8	8
Unit 13	13	591	206.85	180	180	3	3	12	10
Unit 15a	15	60	12	60	60	1	1	4	2
Unit 22	22	300	300	0	0	5	5	0	0

Tableau 2 : Caractéristiques techniques des unités de production.

<i>Unit</i>	C \$/MWh	C_u \$/MW	C_d \$/MW	C_{su} \$	P_{ini} MW	U_{ini} 0/1	T_{ini} h
Unit 18	5.47	0	0	0	320	1	50
Unit 21	5.47	0	0	0	320	1	16
Unit 1	13.32	15	14	1430.4	121.6	1	22
Unit 2	13.32	15	14	1430.4	121.6	1	22
Unit15b	10.52	16	14	312	0	0	-2
Unit 16	10.52	16	14	312	124	1	10
Unit 23a	10.52	17	16	624	248	1	10
Unit 23b	10.89	16	14	2298	280	1	50
Unit 7	20.70	10	9	1725	0	0	-2
Unit 13	20.93	8	7	3056.7	0	0	-1
Unit 15a	26.11	7	5	437	0	0	-1
Unit 22	0.00	0	0	0	240	1	24

Tableau 3 : Coûts de fonctionnement et états initiaux des unités de production.

² La valeur de P_{min} de l'unité 13 a été modifiée à 180 MW dans le fichier de données, afin de rester compatible avec celle de RU lors d'un démarrage.

Les caractéristiques économiques des générateurs et leurs états initiaux sont donnés dans le Tableau 3 :

- C, C_u, C_d : coûts de production en \$/MWh et coûts des réserves (positives et négatives) en \$/MW.
- C_{su} : coûts fixes de démarrage en \$.
- $P_{ini}, U_{ini}, T_{ini}$: valeurs initiales de puissance, d'état (1 : en fonctionnement, 0 : à l'arrêt) et du nombre d'heures passées dans cet état.

2. Émissions gazeuses

En plus de l'aspect économique, les performances d'un système de production peuvent être considérées par des aspects environnementaux tels que les émissions de gaz à effet de serre. On peut ainsi définir un problème multicritère (coût d'exploitation vs émissions de GES par exemple).

<i>Unit Type</i>	<i>Unit(s)</i>
Nuclear	18 21
Coal/Stream	1 2 15 16 23a
Coal/3 Stream	23b
Oil/Stream	7 13 15
Hydro	22

Tableau 4 : Type des unités de production.

Le type des unités de production considérées dans ce problème est donné dans le Tableau 4, le Tableau 5 donnant des informations sur les émissions de CO₂ associées.

Technology	Mean	Low	High
Lignite	1054	790	1372
Coal	888	756	1310
Oil	733	547	935
Natural Gas	499	362	891
Solar PV	85	13	731
Biomass	45	10	101
Nuclear	29	2	130
Hydroelectric	26	2	237
Wind	26	6	124

Tableau 5 : Émissions moyennes de CO₂ en tonnes/GWh au cours de la durée de vie d'une unité de production³

3. Énergies renouvelables

Il est possible d'étudier l'influence de l'intermittence des énergies renouvelables sur la planification. Ainsi, il est proposé de considérer qu'un nombre variable de parcs éoliens est présent sur le réseau de la Figure 1. Dans l'hypothèse d'absence de vent, ces fermes

³ Source: World Nuclear Association (WNA) Report, Comparison of Lifecycle Greenhouse Gas Emissions of Various Electricity Generation Sources.

n'ont aucun impact sur le réseau. En présence de vent, un modèle simple suppose que la puissance produite par éolienne P_w dépend de la vitesse vent V_w comme défini ci-dessous et illustré en Figure 2.

$$\begin{aligned}
 P_w(t) &= 0 && \text{si } V_w(t) \leq V_{ci} \text{ ou } V_w(t) \geq V_{co} \\
 &= P_r && \text{si } V_r \leq V_w(t) \leq V_{co} \\
 &= P_r * [V_w(t)^3 - V_{ci}^3] / [V_r^3 - V_{ci}^3] && \text{sinon.}
 \end{aligned}$$

Les caractéristiques d'une turbine seront supposées égales à : $P_r = 2 \text{ MW}$; $V_{ci} = 3,5 \text{ m/s}$; $V_r = 14 \text{ m/s}$; $V_{co} = 25 \text{ m/s}$.

Pour chaque parc éolien considéré, on peut déduire une vitesse moyenne de vent issue d'une distribution de Weibull avec une évolution horaire de cette vitesse de vent suivant une distribution normale autour de la vitesse moyenne avec un écart-type de 1 m/s (pour simplifier la modélisation). Pour la distribution de Weibull, vous pouvez utiliser un paramètre d'échelle égal à 7.2 et un paramètre de forme égal à 2.15 (vitesse médiane de 6 m/s) comme valeurs de référence pour ce cas d'étude.

A vous d'envisager alors comment intégrer l'influence des fermes éoliennes sur la planification. Par exemple, soit envisager de nouvelles variables décrivant la possibilité d'effacement, soit étudier l'évolution du prix total et de l'utilisation des unités de production en fonction de la puissance éolienne attendue (pour diverses vitesses de vent).

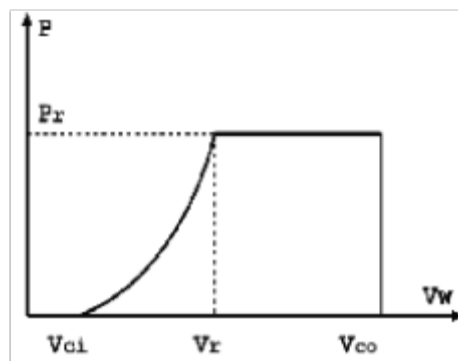


Figure 2 : Loi simplifiée de puissance de production d'une éolienne

4. Travail à réaliser

À partir des informations fournies et éventuellement d'informations complémentaires que vous désiriez inclure, vous devez définir une (ou plusieurs) problématiques pouvant être modélisées et résolues par une approche d'optimisation numérique. Vous calculerez les solutions numériques de vos problèmes par l'utilisation du logiciel MATLAB.

La définition du problème que vous avez décidé de résoudre est complètement libre mais sera à justifier. Certains choix devront amener à modifier les données du problème. Par exemple, si vous ne prenez pas en compte tous les générateurs (réduction du nombre de

variables) il est conseillé de modifier la demande proportionnellement à la puissance installée restante.

A minima, une des problématiques définies devra être résolue par une approche locale et globale, et une analyse critique des deux approches sera réalisée. Vous avez ensuite la possibilité de choisir l'une ou l'autre approche pour aller plus loin dans le projet.

La difficulté associée au problème que vous aurez défini peut donc être variable et sera prise en compte lors de la notation, cf. Annexe 3.

5. Rendu et critères d'évaluation

Une quinzaine de séances (dont certaines en autonomie) sont prévues à l'emploi du temps pour la réalisation du projet. Le rendu est double et consistera en la fourniture des différents programmes MATLAB et en une soutenance orale prévue le 15 décembre 2021. Au cours de la soutenance, une exécution du programme MATLAB sera à réaliser par les étudiants. La durée prévue pour chaque présentation orale est de 20 minutes (12 minutes d'exposé + 8 minutes de questions).

Les critères d'évaluations sont ainsi fixés :

- la modélisation formalisée du problème – 30%
- la justification des approches de résolution et des solveurs utilisés à ces fins – 20% (10% local, 10% global)
- l'analyse et discussions critiques des résultats obtenus – 20% (10% local, 10% global)
- la présentation orale : discours, slides, graphiques, ... – 30%

Annexe 1 – Données

Les données sont disponibles dans le fichier .xlsx *Données_Projet_Optimisation* à récupérer sur CAMPUS.

Annexe 2 – Rappels de fonctions MATLAB pouvant être utiles

repmat(A,n,m) : permet de dupliquer un scalaire/une matrice A , sur n lignes et m colonnes

zeros(n,m) : permet de créer une matrice n lignes et m colonnes de « zéro ».

ones(n,m) : permet de créer une matrice n lignes et m colonnes de « un ».

eye(n) : permet de créer une matrice identité de dimension n .

diag(x0) : permet de créer une matrice avec une diagonale principale composée des éléments de $x0$

diag(x0,1) ; **diag(x0,-1)** : permet de créer une matrice avec une diagonale supérieure, respectivement diagonale inférieure, composée avec les éléments de $x0$

diag(x0)+diag(x1,1)+diag(x2,-1) : permet de créer une matrice tridiagonale avec les éléments de x0, x1 et x2 (les dimensions respectives doivent être cohérentes entre elles)

tril(A) : permet de créer une matrice triangulaire inférieure à partir du tableau A (aussi : triu(A) pour une matrice triangulaire supérieure)

wblrnd(a,b,n,1) : permet de générer n valeurs aléatoires suivant une loi de Weibull avec des paramètres a et b (échelle et forme) (wblrnd nécessite la *statistical toolbox*).

Annexe 3 - liste non exhaustive d'hypothèses et de contraintes que vous pouvez prendre en compte

Le niveau de difficulté associé à chacune des hypothèses/contraintes est représenté par un nombre d'étoiles (de “* : assez facile” à “*** : plutôt difficile”).

Modélisation

- * Prise en compte d'un nombre limité d'unités de production,
- ** Prise en compte de toutes les unités de production,
- * Prise en compte d'un nombre limité d'intervalles de temps,
- ** Prise en compte de tous les intervalles de temps (24 heures),
- * Prise en compte d'un nombre limité de coûts,
- ** Prise en compte des émissions gazeuses,
- ** Prise en compte des énergies renouvelables
- *** Prise en compte de tous les coûts,
- *** Prise en compte des émissions gazeuses dans la/les fonction(s) objectif(s),

Contraintes sur l'historique

- * Prise en compte de la puissance initiale de chaque unité de production,
- ** Prise en compte de l'état initial de chaque unité de production,
- ** Prise en compte de l'historique de fonctionnement de chaque unité de production,

Contraintes en fonctionnement

- * Satisfaction de la demande à chaque intervalle de temps,
- * Satisfaction de la puissance maximale pour chaque unité de production,
- * Satisfaction des limites de variation de puissance pour chaque unité de production,
- ** Satisfaction de la puissance minimale pour chaque unité selon son état,
- *** Satisfaction du temps minimum en arrêt pour chaque unité de production,
- *** Satisfaction du temps minimum en fonctionnement pour chaque unité,

Contraintes sur les réserves

- * Satisfaction d'une réserve globale positive,
- ** Satisfaction d'une réserve globale négative,
- *** Satisfaction de la limite de réserve positive pour chaque unité de production,
- *** Satisfaction de la limite de réserve négative pour chaque unité de production,

Annexe 4 - Liste non exhaustive des représentations graphiques potentiellement intéressantes pour l'analyse des résultats obtenus (n'oubliez pas de définir des indicateurs quantitatifs pertinents également)

- Respect des contraintes : comparaison entre la demande et la production totale ;

- Respect des contraintes : visualisation des puissances entre les bornes des puissances minimales et maximales, et les rampes autorisées ;
- Respect des contraintes : visualisation des réserves ;
- Respect des contraintes : visualisation temporelle des états on/off de l'ensemble des centres de production ;
- Représentation des coûts ;
- Représentation des émissions gazeuses.
- ...

Annexe 5 – Exemple de modélisation pour la prise en compte des temps minimaux de fonctionnement et d'arrêt

Comme indiqué dans le tableau 2, il est possible de prendre en compte une contrainte sur les temps minimaux de fonctionnement (UT) et d'arrêt (DT). A titre indicatif et non exhaustif, un exemple de modélisation de ces contraintes est proposé ici.

Soit 3 variables binaires (pour l'unité i au temps t) :

$U_{i,t}^{run}$: 1 si l'unité i au temps t est en fonctionnement ; 0 sinon.

$U_{i,t}^{on}$: 1 si l'unité i au temps t a démarré ; 0 sinon.

$U_{i,t}^{off}$: 1 si l'unité i au temps t s'est arrêtée ; 0 sinon.

Les relations suivantes peuvent être définies :

- relation entre variables :
- contrainte sur la durée de fonctionnement :
- contrainte sur la durée d'arrêt :

$$U_{i,t}^{on} - U_{i,t}^{off} = U_{i,t}^{run} - U_{i,t-1}^{run}$$

$$\sum_{t_0=t-UT_i+1}^t U_{i,t_0}^{on} \leq U_{i,t}^{run}$$

$$U_{i,t}^{run} \leq 1 - \sum_{t_0=t-DT_i+1}^t U_{i,t_0}^{off}$$