

Projet : Réseau de distribution d'électricité (partie 1)

I Problématique

Les réseaux électriques modernes intègrent de plus en plus de sources de production distribuées (panneaux solaires, éoliennes locales, générateurs). Ces sources ont des capacités différentes et doivent alimenter un ensemble de consommateurs (maisons, bâtiments, petites usines). Une répartition efficace des consommateurs sur les sources électriques est cruciale pour éviter les surcharges, améliorer l'équilibre global et minimiser les pertes. Une entreprise chargée de construire ces réseaux électriques nous demande de l'aider, en développant un logiciel qui permet de :

- 1) représenter un réseau simplifié avec uniquement des générateurs et des maisons;
- 2) simuler les connections possibles entre les générateurs et les maisons;
- 3) calculer le coût d'une solution et le minimiser.

Nous réaliserons ces tâches de façon incrémentale, afin d'avoir à la fin du semestre un logiciel fonctionnel.

II Modélisation

Une instance du problème est composée d'un triplet $S = \langle M, G, C \rangle$ où :

- M représente l'ensemble des maisons (ou consommateurs), chacune avec une demande électrique donnée (en kW). Une maison fera forcément partie d'une de ces trois catégories : basse consommation (10 kW), normale (20 kW) ou forte consommation (40 kW);
- G représente l'ensemble des générateurs avec leurs capacités maximales (en kW);
- $C \rightarrow M \times G$ représente l'ensemble des connections entre une maison et un générateur. Chaque maison doit obligatoirement être alimentée par un unique générateur. Aucune contrainte par contre sur les générateurs, i.e., un générateur peut n'être connecté à aucune maison, une maison, deux maisons ou toutes les maisons.

Le réseau $S = \langle \{(M1,40),(M2,40),(M3,20),(M4,10)\}, \{(G1,60),(G2,60)\}, \{(M1,G1),(M2,G2),(M3,G1),(M4,G2)\} \rangle$ est un exemple comprenant 4 maisons (2 à forte consommation, 1 normale et 1 faible consommation) et 2 générateurs de 60kW. Les connections peuvent être représentées graphiquement (voir par exemple la Figure 1). Cette figure est une instance possible d'allocations, i.e., de connections entre maisons et générateurs. Bien entendu, il en existe beaucoup d'autres.

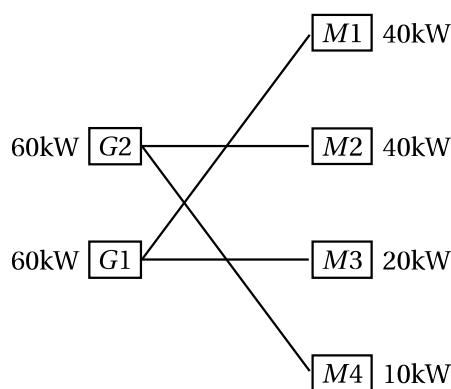


FIGURE 1 – Exemple de réseau électrique

Comme expliqué dans l'introduction, le but est de réussir à trouver une instance « efficace » pour un réseau donné. Une instance est considérée comme efficace si elle :

- respecte autant que possible les capacités maximales des générateurs;
- équilibre au maximum la charge normalisée entre les générateurs.

Afin de quantifier ces critères, et ainsi pouvoir comparer plusieurs instances, il existe plusieurs formules. Dans le cadre de ce projet, les calculs effectués pour quantifier ces critères seront basés sur le taux d'utilisation de chaque générateur normalisé par sa capacité maximale. Étant donnée un générateur $g \in G$, son **taux d'utilisation**, noté u_g , est calculé de la manière suivante :

$$u_g = \frac{L_g}{C_g}$$

avec :

- L_g la charge actuelle du générateur g qui correspond à la somme des demandes électriques des maisons connectées à ce générateur;
- C_g la charge maximale du générateur g ;

Maintenant que le taux d'utilisation d'un générateur est calculable, nous pouvons définir une formule permettant de mesurer l'efficacité d'une instance en prenant en compte les deux critères décrits un peu plus haut. Le **coût** d'une instance $S = \langle M, G, C \rangle$, noté $Cout(S)$, est calculée comme suit :

$$Cout(S) = Disp(S) + \lambda \times Surcharge(S)$$

avec :

- $Disp(S) = \sum_{g \in G} |u_g - \bar{u}|$ qui représente la **somme des écarts de chaque générateur par rapport à la moyenne** avec $\bar{u} = \frac{1}{|G|} \sum_{g \in G} u_g$ avec $|G|$ correspondant au nombre de générateurs. En d'autres termes, c'est une mesure d'équilibre qui évalue dans quelle mesure les générateurs partagent la charge de façon proportionnelle à leur capacité. On compare le taux d'utilisation de chaque générateur (charge / capacité) et on calcule l'écart entre ces taux. Plus les écarts sont faibles, plus le résultat est petit et signifie que la solution est équilibrée.
- $Surcharge(S) = \sum_{g \in G} \max\left(0, \frac{L_g - C_g}{C_g}\right)$ qui représente la **pénalisation des surcharges**. Celle-ci consiste à ajouter un coût supplémentaire chaque fois qu'un générateur dépasse sa capacité maximale. Concrètement, on mesure de combien un générateur est surchargé (par exemple, s'il doit fournir 55 unités alors que sa capacité est de 50, il y a 5 unités de surcharge), et on additionne ces excès pour tous les générateurs. Plus la surcharge est grande, plus le coût est élevé. À l'inverse, si aucun générateur n'est en surcharge alors $Surcharge(S) = 0$.
- $\lambda \in \mathbb{N}^*$ est un paramètre qui contrôle la **sévérité de la pénalisation** en cas de dépassement de la capacité maximale d'au moins un des générateurs;

Plusieurs exemples de calculs vous sont donnés dans la sous-section suivante.

Nous sommes maintenant capable de calculer le coût d'une instance. Cela implique la possibilité de pouvoir comparer plusieurs instances et, ainsi, de pouvoir trouver la (ou les) plus efficace en sélectionnant celle(s) ayant obtenu le coût le plus faible. Trouver une instance ayant un coût minimal est une tâche complexe car l'espace des solutions possibles peut être immense et croît de façon exponentielle avec la taille du problème (i.e., le nombre de maisons et de générateurs). Chaque choix local influence l'ensemble du système, ce qui rend difficile l'évaluation immédiate des conséquences globales. De plus, plusieurs critères de coût entrent souvent en compétition (par exemple minimiser une surcharge tout en maintenant un bon équilibre), ce qui crée des compromis difficiles à gérer. Enfin, la présence de nombreuses solutions proches les unes des autres complique l'identification de la meilleure : il faut ainsi explorer intelligemment l'espace de recherche pour éviter de se bloquer dans des solutions locales sous-optimales.

1. Exemples

Dans cette section, nous allons calculer le coût de plusieurs instances de réseaux électriques.

Reprenons l'instance $S = \langle M, G, C \rangle$ vue au début de la section (voir Figure 2 pour un rappel).

Commençons par calculer le taux d'utilisation des deux générateurs $G1$ et $G2$: $u_{G1} = \frac{40+20}{60} = 1$ et $u_{G2} = \frac{40+10}{60} = \frac{5}{6} \approx 0.8333$.

Calculons maintenant les différents éléments nécessaires au calcul de la dispersion des taux d'utilisation :

- $Surcharge(S) = 0$ car aucun des générateurs n'est en surcharge.
- $Disp(S) = \frac{1}{6} \approx 0.1666$ car la moyenne des taux d'utilisation des générateurs est $\bar{u} = \frac{u_{G1} + u_{G2}}{2} = \frac{1 + \frac{5}{6}}{2} = \frac{11}{12} \approx 0.9166$. De ce fait, nous avons : $Disp(S) = |u_{G1} - \bar{u}| + |u_{G2} - \bar{u}| = |1 - \frac{11}{12}| + |\frac{5}{6} - \frac{11}{12}| = \frac{1}{12} + \frac{1}{12} = \frac{1}{6}$.

Donc, avec $\lambda = 10$ par exemple, nous obtenons $Cout(S) = \frac{1}{6} + 10 \times 0 = \frac{1}{6}$.

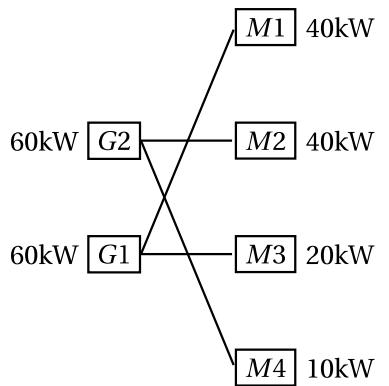


FIGURE 2 – Instance 1

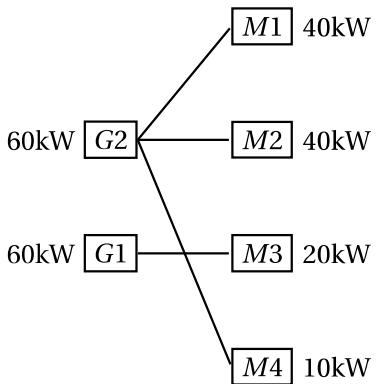


FIGURE 3 – Instance 2

Afin de pouvoir comparer deux instances possibles, nous gardons les mêmes maisons et les mêmes générateurs mais nous allons changer les connections entre eux. Nous obtenons ainsi le réseau électrique $S_2 = \langle M, G, C_2 \rangle$ illustré par la Figure 3 où la maison $M1$ n'est plus connectée à $G1$ mais à $G2$ (ce qui provoquera une surcharge du générateur $G2$). Calculons le coût de cette instance :

- Taux d'utilisation de $G1$ et $G2$: $u_{G1} = \frac{20}{60} \approx 0.333$ et $u_{G2} = \frac{40+40+10}{60} = 1.5$;
- $Surcharge(S_2) = \max(0, \frac{20-60}{60}) + \max(0, \frac{90-60}{60}) = 0 + 0.5 = 0.5$;
- $Disp(S_2) \approx 6.16$ avec $\bar{u} = \frac{u_{G1} + u_{G2}}{2} \approx 0.917$. Cela nous donne donc $Disp(S_2) = |u_{G1} - \bar{u}| + |u_{G2} - \bar{u}| \approx |0.333 - 0.917| + |1.5 - 0.917| \approx 0.584 + 0.583 \approx 1.167$;

Avec $\lambda = 10$, nous obtenons $Cout(S_2) \approx 1.167 + 10 \times 0.5 \approx 6.167$.

Nous pouvons maintenant comparer les deux instances S_1 et S_2 . Vu que $Cout(S_1) = 0.167 < 6.167 = Cout(S_2)$, nous pouvons dire que S_1 est une meilleure instance que S_2 .

2. Remarques et Restrictions

Concernant les restrictions, il est important de noter que dans le cadre de la réalisation de ce projet :

- Le réseau électrique contient toujours au moins une maison et un générateur, i.e., $M \neq \emptyset$ et $G \neq \emptyset$.
- La somme des charges de demande électrique des maisons doit être inférieure ou égale à la somme des capacités maximales des générateurs.
- Une maison doit obligatoirement être raccordée à un unique générateur.

Et quelques remarques supplémentaires :

- Pour certaines configurations de maisons et de générateurs, il sera impossible de trouver une affectation avec un coût de 0. Dans ce cas, la solution optimale sera la (ou les) instance(s) qui minimisera ce coût.
- Il existe forcément une solution minimale (i.e., instances qui minimisera le coût) pour une configuration donnée.
- Pour une configuration de maisons et de générateurs donnée, le coût minimal peut être obtenu par une ou plusieurs instances.

III Instructions

1. Tâches à réaliser

Pour la première étape du projet, vous devez développer un programme qui permet à un utilisateur de configurer manuellement le réseau électrique (i.e., maisons, générateurs et connexions).

Au démarrage du programme, un menu s'affiche avec 4 options possibles :

- 1) ajouter un générateur;
- 2) ajouter une maison;
- 3) ajouter une connexion entre une maison et un générateur existants;
- 4) fin.

Dans le cas où l'*option 1* est retenue, le programme demande à l'utilisateur le nom du générateur et sa capacité maximale sur la même ligne (e.g., « G1 60 » pour créer le générateur nommé G1 ayant une capacité maximale de 60kW), puis on revient au menu principal. Si le générateur a déjà été créé plus tôt, alors sa consommation maximale est mise à jour (en avertissant l'utilisateur de cette MAJ).

Dans le cas où l'*option 2* est retenue, le principe est le même que pour la création d'un générateur. Cependant, comme la consommation d'une maison est prédéfinie, il suffit de mettre le nom de la maison suivie de « BASSE », « NORMAL » ou « FORTE » pour préciser qu'il s'agit d'une maison à consommation basse, normale ou forte respectivement. Par exemple, « M1 NORMAL » permet de créer une maison nommée M1 ayant une consommation normale. Si la maison a déjà été créée plus tôt, alors sa consommation est mise à jour (en avertissant l'utilisateur de cette MAJ). Une fois la maison créée, on revient au menu principal.

Dans le cas où l'*option 3* est retenue, l'utilisateur peut créer une connexion entre un générateur et une maison. Pour ce faire, l'utilisateur doit préciser sur une même ligne le nom du générateur et celui de la maison (ou inversement) séparés par un espace. Par exemple, « M1 G1 » (ou « G1 M1 ») permet de créer une connexion entre la maison M1 et le générateur G1. Il faut bien entendu que le générateur et la maison aient été créés au préalable (message d'erreur si ce n'est pas le cas et on revient au menu). Une fois la connexion créée, on revient au menu principal.

Dans le cas où l'*option 4* est retenue, cela signifie que l'utilisateur a terminé de créer son réseau électrique. Dans ce cas, vous devez vérifier que chaque maison est connectée à un unique générateur. Si ce n'est pas le cas, vous donnerez le nom des maisons pour lesquelles il y a un problème (i.e., pas de connexion ou trop de connexions) avant de revenir au menu principal.

L'utilisateur peut maintenant calculer le coût du réseau qu'il ou elle vient de créer, modifier les connexions existantes afin d'éventuellement obtenir une meilleure instance ou afficher le réseau actuel. Pour cela, il fait face à un menu qui propose les 4 options suivantes :

- 1) calculer le coût du réseau électrique actuel;
- 2) modifier une connexion;
- 3) afficher le réseau;
- 4) fin.

Quand l'option 1 est sélectionnée, le programme calcule le coût du réseau électrique actuel $S = \langle M, G, C \rangle$ en précisant également la somme des écarts de chaque générateur par rapport à la moyenne ($Disp(S)$) et la pénalisation des surcharges ($Surcharge(S)$). **Pour cette première phase, la valeur de la sévérité de la pénalisation λ sera fixée à 10.**

Quand l'option 2 est sélectionnée, l'utilisateur à la possibilité de modifier une connexion existante. Pour cela, l'utilisateur doit d'abord saisir une connexion existante avant de saisir la nouvelle connexion. Par

exemple, si l'utilisateur souhaite connecter la maison M1 au générateur G2 plutôt qu'au générateur G1 alors il pourra le faire de la manière suivante :

Veuillez saisir la connexion que vous souhaitez modifier : M1 G1

Veuillez saisir la nouvelle connexion : M1 G2

Si l'utilisateur avait saisi « G1 M1 » puis « G2 M1 », le résultat aurait été identique. Bien entendu, il faut vérifier que les informations données soient correctes et, si ce n'est pas le cas, le programme doit préciser l'erreur à l'utilisateur et revenir au menu.

Quand l'option 3 est sélectionnée, le programme affiche l'ensemble du réseau (générateurs, maisons et connexions) de façon claire et lisible. Vous êtes libre de l'affichage mais il faut qu'une personne n'ayant jamais fait d'informatique puisse comprendre le réseau électrique actuel.

Enfin, si l'option 4 est sélectionnée, le programme s'arrête.

Pour le moment, il n'est pas demandé (du moins pour cette première partie) de gérer les erreurs dues à l'entrée d'une information de mauvais type (par exemple si l'utilisateur entre le nombre 1,5 au lieu d'un nombre entier). Ce type d'erreur sera à gérer dans la seconde partie.

2. Remise du projet

Ce projet est à réaliser par groupes de **deux ou trois étudiants** à constituer vous-mêmes, issus du **même groupe de TD**. Votre code source de cette première partie (et uniquement de cette partie), correctement documenté, sera à remettre sur Moodle au plus tard le **14 novembre 2024**, sous forme d'une **archive jar ou zip (un seul dépôt par binôme/trinôme)**. Cette partie ne sera pas évaluée mais chaque groupe devra faire une démonstration de son programme à son chargé de TD durant la séance de TP la semaine du 17 novembre. Celui-ci vous donnera des conseils, si nécessaire, aussi bien sur le rendu du programme mais aussi sur les choix de conception faits et le code réalisé.