

Thème 2 - Le futur des énergies	Chapitre 3 - Optimisation du transport de l'électricité	1ère Enseignement scientifique
<u>Ce qu'il faut retenir ou savoir faire</u>		

Dans ce chapitre

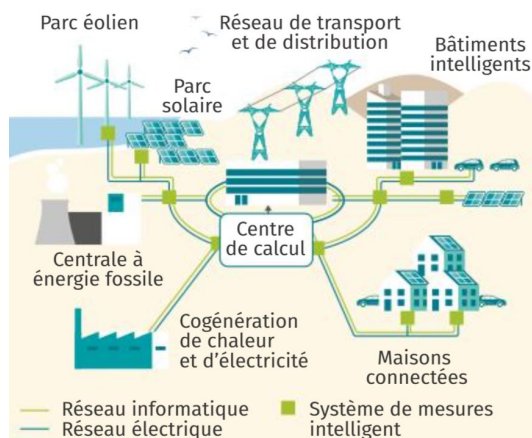
Le transport de l'électricité doit être effectué de manière réfléchi. En effet, tout fil possédant une résistance électrique non nulle, il faut penser aux valeurs des grandeurs électriques que l'on doit choisir pour une puissance électrique fournie donnée, afin de minimiser les pertes par effet Joule et en conséquence, le coût de son transport. Grâce à un graphe orienté, nous verrons comment modéliser un réseau de transport électrique, ce qui permettra ensuite de réfléchir à la minimisation des pertes électriques.

Vous trouverez dans ce polycopié :

- Le cours
- Fiche - Impacts environnements de la production électrique
- Feuilles d'exercices du chapitre

Ce qu'il faut savoir faire (partie physique chimie) :

Savoir-faire	Fiche	Exercice(s)
L'utilisation de lignes haute tension permet de minimiser les pertes par effet Joule.	Cours	
Faire un schéma d'un circuit électrique modélisant une ligne à haute tension.	Cours	1
Utiliser les formules littérales reliant la puissance à la résistance, l'intensité et la tension pour identifier l'influence de ces grandeurs sur l'effet Joule.	1	1
Modélisation d'un réseau de transport électrique par un graphe orienté dont les arcs représentent les lignes électriques et dont les sommets représentent les sources distributrices, les noeuds intermédiaires et les cibles destinataires.	1	2 3 et 7
Exprimer mathématiquement les contraintes à respecter puis la fonction à minimiser pour minimiser les pertes du réseau électrique par effet Joule.	1	5 et 7
Formuler le problème de minimisation des pertes par effet Joule sur l'exemple d'un réseau comprenant deux sources, un noeud intermédiaire et deux cibles destinataires.	1	2 et 5



Chapitre 3 - Optimisation du transport de l'électricité

I Réseau électrique

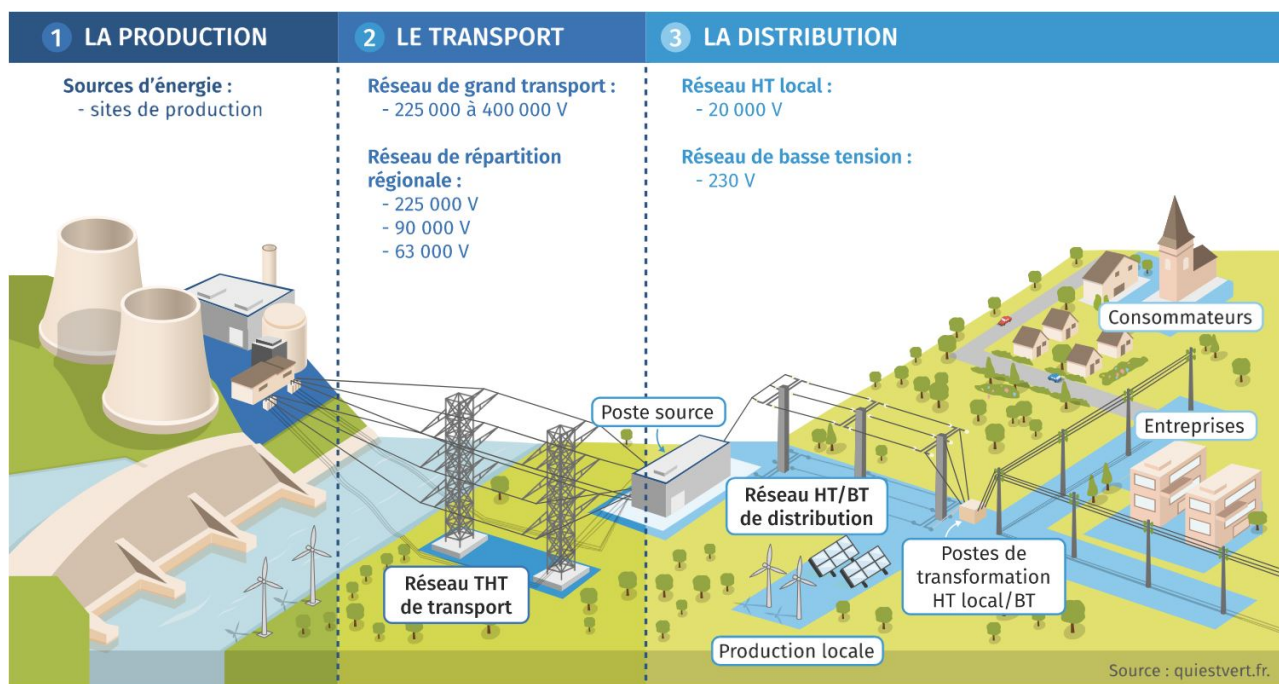
I.1 Organisation

I.1.1 Classification des tensions électriques

On peut classer une tension électrique en trois différents domaines selon le type d'utilisation; on parle alors de basse, moyenne et haute tension :

Basse tension	Moyenne tension	Haute tension
$50 \text{ V} < U \leq 1 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < U \leq 50 \text{ kV}$	$U > 50 \text{ kV}$
Habitation, petits commerces	Industries, hôpitaux, réseaux de transport ferroviaire	Transport de l'énergie

I.1.2 Modélisation d'un réseau électrique



Grâce au réseau électrique, l'électricité est acheminée à partir de lieux de production (centrales électriques, parcs éoliens, parcs solaires PV) jusqu'aux lieux de consommation (particuliers, professionnels, industries, collectivités). Le réseau électrique est contrôlé par des **smart grids** (voir vidéo à la fin) permettant de gérer les fluctuations de production et de consommation.

Avant le transport d'électricité, il est nécessaire d'augmenter la tension électrique alors qu'avant d'assurer la distribution d'électricité, il est nécessaire de l'abaisser. Ces opérations se font grâce à un _____ élévateur ou abaisseur de tension.

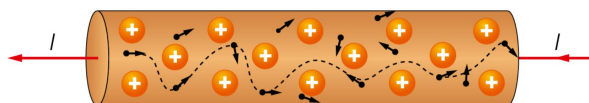
À partir d'une ligne, il est possible de diviser l'énergie électrique fournie vers plusieurs lignes électriques en utilisant un _____.

I.2 Résistance d'une ligne et pertes par effet Joule

I.2.1 Modélisation d'une ligne électrique

Pour un conducteur, les porteurs de charges (électrons) qui assurent la conduction du courant électrique ne se déplacent pas librement.

Lorsque l'on applique une tension entre les deux extrémités d'un fil conducteur, un courant électrique d'intensité I est créé.



La valeur de l'intensité dépend du déplacement des électrons et est d'autant plus élevée que les électrons se déplacent « _____ » dans le conducteur.

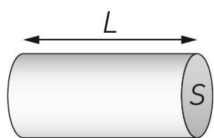
Divers phénomènes physiques peuvent limiter le déplacement de ces électrons, on dit alors qu'il existe une _____ à leur déplacement. Pour la quantifier, on introduit alors la résistance électrique R d'une portion de conducteur, qui s'exprime en _____. La résistance vérifie la **loi d'Ohm** :

Loi d'Ohm

Une ligne électrique pourra être modélisée électriquement par une résistance R , qui dépend à la fois de la _____ de la ligne considérée comme cylindrique et de sa _____ :

Résistance d'un conducteur cylindrique (ligne électrique)

L'expression de la résistance pour une ligne électrique est :



où ρ est la résistivité ($\Omega \cdot m$), L la longueur (m) et S la surface (m^2) de la ligne.

I.2.2 Pertes par effet Joule

La résistance au passage du courant électrique entraîne l'apparition d'un échauffement du conducteur ; c'est _____. Bien que parfois il soit recherché (résistances chauffantes, chauffage électrique) on cherche à le diminuer pour le transport électrique, car cet effet entraîne des pertes d'énergie importantes.

I.2.3 Minimisation des pertes

On donne ici l'expression de la puissance dissipée par effet Joule, que l'on peut écrire sous deux formes en utilisant la loi d'Ohm :

Puissance électrique dissipée par effet Joule

D'après $P_J = R \times I^2$, on peut constater que la puissance P_J dissipée par effet Joule est d'autant plus élevée que le courant qui circule est élevé.

Ceci veut dire que pour une puissance d'alimentation donnée égale au produit de la tension par l'intensité du courant parcourant la ligne. Pour limiter l'effet Joule, pour une puissance d'alimentation donnée, il faut donc utiliser un courant d'intensité _____ et une tension _____. C'est ce que l'on fait lorsque l'on utilise un transformateur _____ de tension.

II Modélisation d'un réseau électrique

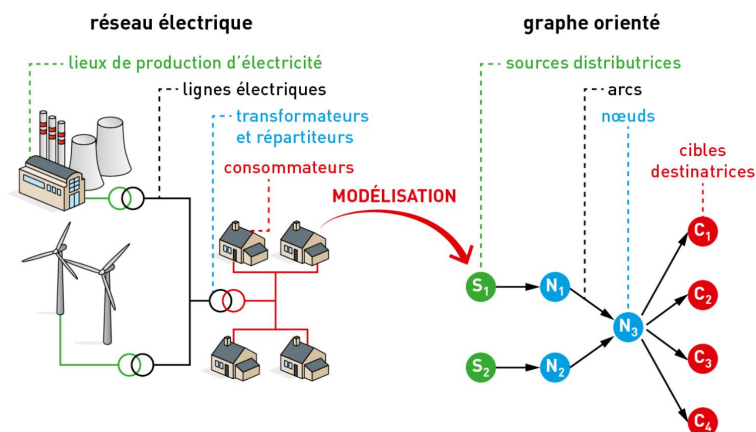
II.1 Graphe orienté

On peut modéliser un réseau de transport électrique grâce à :

- un circuit électrique
- un graphe orienté

Dans un graphe orienté, les arcs (arrêtes) représentent les _____ et on retrouve situées aux _____ :

- **les sources distributives (S)** (ex : centrale nucléaire, centrale solaire photovoltaïque).
- **les cibles destinataires (C)** (ex : industries, habitations)
- **des noeuds intermédiaires (N)** pour les transformateurs et les répartiteurs.

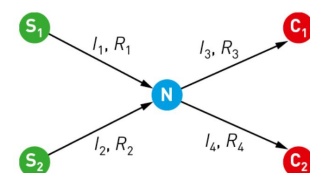


II.2 Contraintes pour un réseau électrique

II.2.1 Loi des noeuds

Au niveau d'un noeud, la loi des noeuds relie les intensités des courants électriques répartis. Exemple :

ici



II.2.2 Puissance maximale et intensité fournie par une source

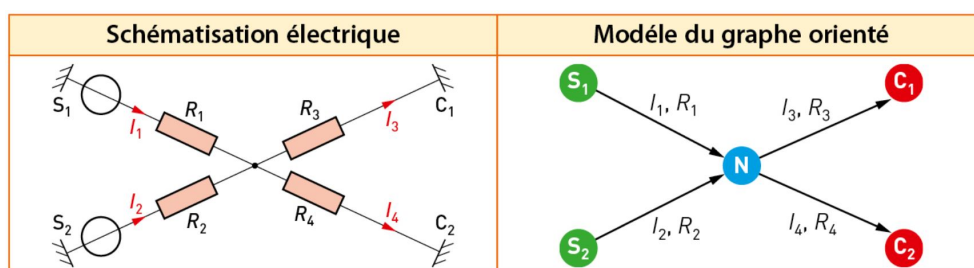
Il existe une relation entre l'intensité I_1 que peut fournir une source S_1 de tension électrique U et la puissance maximale $P_{\max}$ délivrable par la source :

où U représente la tension du réseau.

II.3 Minimisation des pertes électriques

II.3.1 Contraintes

On considère un circuit comportant deux sources, un noeud et deux cibles :



Il existe des contraintes pour ce circuit électrique :

1. Les intensités entrantes/sortantes en un noeud vérifient la loi des noeuds, ici appliquée en N :

De plus, la somme $I_3 + I_4 = I_{\text{tot}}$, est constante, car l'intensité requise par chaque cible est constante.

2. Les intensités I_1 et I_2 des sources sont limitées par les puissances maximales délivrables par les deux sources :

où U est la tension du réseau au niveau de la source.

3. L'intensité arrivant à chaque cible est imposée par la puissance utilisée par la cible (ex : $I_3^2 = P_3 / R_3$).

II.3.2 Minimisation

Pour minimiser les pertes par effet Joule dans le réseau électrique il faut :

1. Déterminer la puissance totale dissipée par effet Joule.
2. Utiliser les contraintes pour que seule une intensité variable soit présente dans l'expression (I_1 ou I_2).
3. Minimiser la puissance dissipée en la dérivant par rapport à l'intensité I_1 ou I_2 ou à partir d'un graphique.
4. En déduire la valeur de I_1 ou de I_2 qui minimise les pertes Joule.

Exemple : Dans le cas du circuit précédent (2 sources, 1 noeud intermédiaire et 2 cibles destinataires), on obtient une puissance dissipée par effet Joule égale à

$$P_J =$$

En utilisant les contraintes et informations sur le réseau électrique on va pouvoir exprimer la puissance dissipée par effet joule uniquement en fonction de I_1 ou I_2 :

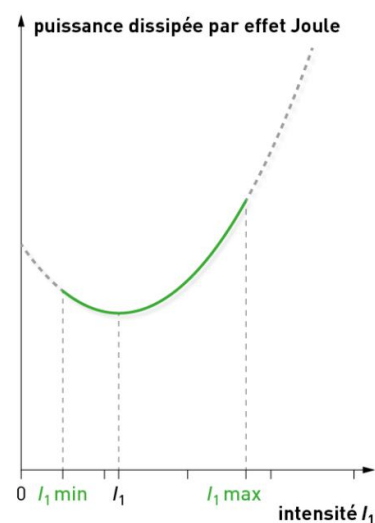
- Les intensités I_3 , I_4 et les résistances R_3 et R_4 étant constantes on peut dire que le terme $R_3 \times I_3^2 + R_4 \times I_4^2 = C$ est égal à une constante notée C .
- contrainte vue précédemment : $I_3 + I_4 = I_2 + I_1 = I_{\text{tot}}$, d'où $I_2 = I_{\text{tot}} - I_1$.

En modifiant l'expression de la puissance dissipée par effet joule en conséquence, on en déduit :

$$P_J =$$

Pour rechercher la valeur de I_1 qui minimise la puissance dissipée par effet joule par le réseau, on peut ensuite :

Méthode 1 : Déterminer graphiquement la valeur de I_1 qui minimise P_J (tracé sur calculatrice ou ordinateur).



Méthode 2 : Calculer la dérivée de P_J par rapport à I_1 notée $\frac{dP_J}{dI_1}$ et résoudre l'équation $\frac{dP_J}{dI_1} = 0$ pour trouver la valeur correspondante de I_1 .

À voir

- Smart grids : <https://www.youtube.com/watch?v=Gl1k-MoJNkk>,

Thème 2 - Le futur des énergies	Chapitre 3 - Optimisation du transport de l'électricité	1ère Enseignement scientifique
Fiche 1 - Minimisation des pertes en ligne		

Les aiguilleurs de l'électricité doivent tenir compte de nombreuses contraintes pour optimiser la distribution de l'électricité vers les consommateurs.

Comment gérer l'acheminement de l'électricité dans un réseau complexe afin de limiter les pertes d'énergie?

Document 1 - Le dispatching

L'électricité ne se stocke pas. Il faut donc constamment ajuster la production électrique à la demande.

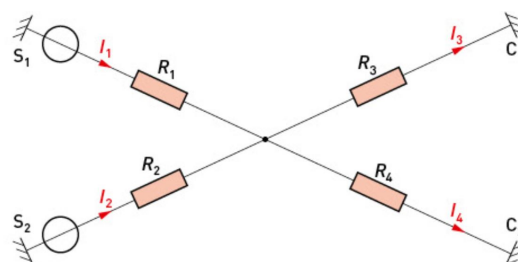
La répartition de l'électricité se fait dans des centres de gestion dédiés, les dispatchings, en se fondant sur des prévisions de consommations (en fonction de l'heure de la journée, de la saison, de la météo...) et sur le réseau lui-même afin de limiter les pertes en ligne par **effet Joule** et donc les coûts.



Document 2 - Prise en compte des contraintes

Afin de comprendre les contraintes à prendre en compte lors du transport de l'électricité, on peut se baser sur un cas simple.

On considère un réseau comprenant uniquement deux **sources distributives** (S_1 et S_2), par exemple deux centrales électriques, qui produisent du courant électrique d'intensité I_1 et I_2 .



Le courant doit être acheminé vers deux **cibles destinataires** C_1 et C_2 , par exemple deux villes, qui doivent être alimentées par des courants d'intensités fixées valant respectivement I_3 et I_4 .

Le réseau comporte un **noeud intermédiaire** (N).

On considère que le transport de l'électricité dans ce réseau se fait sous une tension U .

L'intensité du courant électrique que peut fournir une source distributive est liée à la puissance électrique qu'elle peut fournir. Ainsi les valeurs de I_1 et I_2 dépendent respectivement de celles des puissances maximales $P_{1\max}$ de S_1 et $P_{2\max}$ de S_2 .

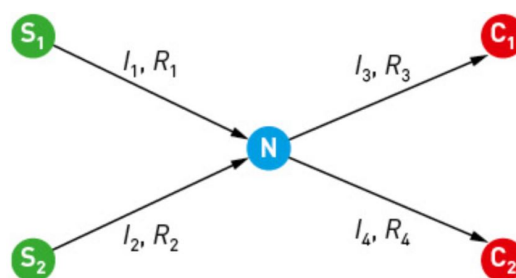
Au niveau d'un noeud du réseau, l'intensité électrique totale qui arrive est égale à l'intensité électrique totale qui en repart. On appelle cela la loi des noeuds. Comme la demande de chaque cible dessinatrice est constante, la valeur de l'intensité totale qui parvient à ces cibles est égale à une constante que l'on pourra appeler I_{tot} .

Document 3 - Fonction à minimiser

Une société électrique possède deux centrales électriques suffisamment puissantes pour fournir deux villes en électricité.

Le graphe ci-contre représente le flot dans le réseau considéré ainsi que les résistances des lignes électriques que l'on considère chacune de valeur constante.

On considère aussi que la demande de chaque ville est constante, de telle sorte que la valeur de l'intensité totale qui parvient à ces villes est égale à une constante que l'on pourra appeler I_{tot} .



Document 4 - Minimisation des pertes par effet Joule

On considère un réseau comprenant uniquement deux sources (S_1 et S_2), un nœud intermédiaire (N) et deux cibles (C_1 et C_2).

Production des sources	Consommation des cibles	Résistance des arcs
Panneau solaire 1 : 5 A maximum Panneau solaire 2 : 5 A maximum	Pompe 1 : 3 A Pompe 2 : 3 A	Ligne panneau solaire 1 - Nœud : 0,1 Ω Ligne panneau solaire 2 - Nœud : 0,2 Ω Nœud - pompe 1 : 0,1 Ω Nœud - pompe 2 : 0,1 Ω

À l'aide des documents ci-dessus et de vos connaissances, répondre aux questions suivantes :

- Doc.1.** Comment la gestion du réseau électrique est-elle optimisée?
- Doc.2.** Que représentent les résistances dans le schéma électrique du réseau?
- Écrire la relation existant entre les différentes intensités.
- Écrire les inégalités qui traduisent les contraintes sur I_1 et I_2 en fonction d'autres grandeurs électriques connues.
- Doc.3.** Quelle grandeur physique faut-il chercher à minimiser pour minimiser les pertes en ligne? Exprimez-la en fonction des différentes grandeurs.
- Dans l'expression précédente, on appelle C la constante qui est la somme des termes relatifs à l'acheminement aux cibles destinataires. Que vaut C ?
- Réécrire l'expression de la grandeur à minimiser en fonction de I_1 , $I_{\text{tot}} = I_1 + I_2$, R_1 , R_2 et de C . On doit trouver un polynôme du second degré en I_1 .
- Doc.4.** Quelles sont les contraintes à prendre en compte pour les sources du réseau étudié?
- Montrer que la puissance dissipée par effet Joule dans ce réseau peut se traduire par une fonction polynomiale du second degré en I_1 qui peut s'écrire :

$$P_J = 0,3 \times I_1^2 - 2,4 \times I_1 + 9$$

- Déterminer la dérivée de P_J par rapport à I_1 .
- Montrer que P_J admet un minimum pour une valeur de I_1 que l'on déterminera.
- Retrouver cette valeur en traçant P_J sur votre calculatrice, si elle le permet.
- Quelles valeurs I_1 et I_2 doit-on choisir pour minimiser les pertes par effet Joule dans le réseau étudié?

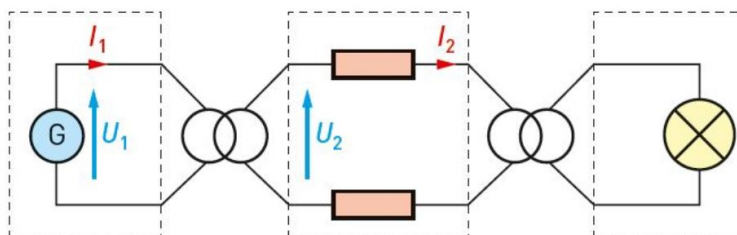
Thème 2 - Le futur des énergies	Chapitre 3 - Optimisation du transport de l'électricité	1ère Enseignement scientifique
<u>Fiche 1</u> - <i>Minimisation des pertes en ligne</i>		

Réponses

Thème 2 - Le futur des énergies	Chapitre 3 - Optimisation du transport de l'électricité	1ère Enseignement scientifique
Feuille d'exercices		

Exercice 1 - Modélisation du transport d'électricité

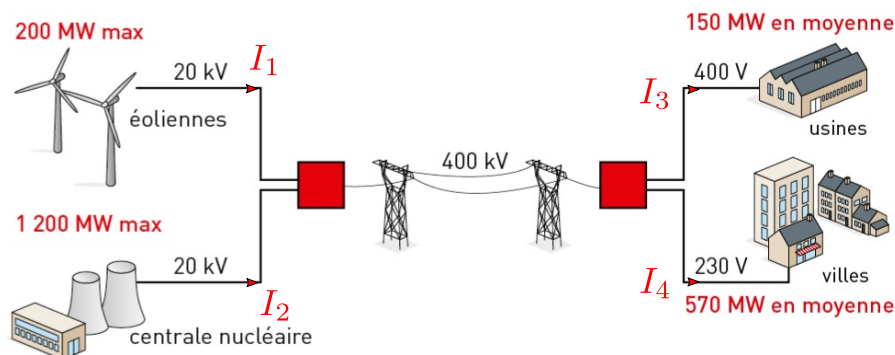
On considère le schéma électrique suivant qui modélise le transport de l'électricité :



- Reproduire ce schéma et identifier sur celui-ci les transformateurs et la ligne à haute tension.
 - Par quoi sont modélisés les câbles électriques? Pourquoi?
- Exprimer la puissance dissipée par effet Joule dans un câble électrique en fonction de l'intensité qui le traverse.
 - Expliquer comment le fait d'augmenter la tension au niveau de la ligne à haute tension parcourue par un courant d'intensité I_2 permet de diminuer les pertes par effet Joule.

Exercice 2 - Étude d'un réseau électrique

On considère le réseau électrique suivant :



- Identifier les sources distributives et les sources destinataires.
- Que représentent les carrés rouges?
 - Sous quelle tension l'électricité est-elle transportée? En donner l'intérêt.
- Quelles sont les valeurs des intensités moyennes $I_{3,\text{moy}}$ et $I_{4,\text{moy}}$ des courants qui doivent parvenir en sortie de ce réseau?
 - En déduire la valeur de l'intensité totale $I_{\text{tot,moy}}$ du courant qui doit être produit par les deux sources (en tout).
- Modéliser le réseau électrique par un graphe orienté?
 - Donner une expression générale de la fonction que l'on cherche à minimiser.

Exercice 3 - Gestion optimale d'un fournisseur d'électricité

Un fournisseur d'électricité possède un parc photovoltaïque (350 MW) et un barrage hydraulique (200 MW) pour fournir trois villes. Il utilise à cet effet des lignes haute tension (63 000 V) de résistance R chacune et un distributeur qui centralise l'ensemble de l'électricité produite avant la ventiler selon la demande.

1. Modéliser le réseau électrique décrit par un graphe orienté.
2. Si la demande d'électricité est telle qu'il faille produire 400 MW, expliquer comment doit se répartir la production, en justifiant, et donner l'intensité du courant produit.
3. Écrire l'expression de la fonction à minimiser et dire ce qu'elle représente.

Exercice 4 - Estimation des pertes dans une ligne haute tension

Pour une ligne « classique » de section de 500 mm^2 , la résistance d'un câble aérien est de l'ordre de $6,0 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{km}^{-1}$.

1. Calculer la puissance dissipée par effet Joule si un câble de 100 km est traversé par un courant électrique d'intensité égale à 50 A.
2. Pour un courant de même intensité, à partir de combien de kilomètres de fil, la puissance dissipée par effet Joule atteint-elle 25 kW (ordre de grandeur de la puissance d'une chaudière)?

Exercice 5 - Optimisation d'un réseau

On considère le graphe orienté ci-contre qui modélise un réseau électrique.

1. Déterminer l'intervalle des contraintes pour I_1 (en déterminant $I_{1\min}$ et $I_{1\max}$).
2. (a) Exprimer la fonction F à minimiser.
(b) Écrire cette fonction comme un polynôme du second degré en I_1 .
3. (a) Montrer que cette fonction présente un minimum pour une valeur théorique $I_{1\text{th}}$ que l'on déterminera.
(b) Cette valeur $I_{1\text{th}}$ peut-elle être retenue?
(c) Quelle valeur I_1 faudra-t-il retenir pour minimiser la fonction F ?
4. Représenter sur un graphique l'allure de F en fonction de I_1 et y repérer, sans souci d'échelle, la position de $I_{1\text{th}}$ ainsi que l'intervalle des contraintes pour I_1 .

