



Queste de savoir

Le pourquoi du comment des lignes à
haute tension

1^{er} août 2022

Table des matières

	Introduction	1
1.	Le problème: la résistance des câbles	2
1.1.	Câble idéal	2
1.2.	Câble réel	3
2.	La solution: la haute tension	4
2.1.	La première raison	5
2.2.	La seconde raison	6
	Conclusion	7

Introduction

L'électricité qui arrive dans nos maisons respecte certaines normes: la tension prend notamment une valeur précise, qu'on appelle tension domestique. En Europe, par exemple, celle-ci vaut 230 volts. On pourrait croire que cette tension est présente de bout en bout du réseau électrique, mais ce n'est pas le cas. À quelques kilomètres de votre compteur, la tension n'est déjà plus de 230 volts, mais de 20 000 volts !



`/opt/zds/data/contents-public/le-pourquoi-du-comment-des-lignes-a-haute-ten`
:Lignes à haute tension (par Zonk43, [CC0 1.0](#) , [Wikimedia Commons](#)).

Quand il s'agit de transporter de l'électricité sur de longues distances, la tension est augmentée d'autant plus que la distance à parcourir est grande. Les câbles sont alors soumis à des tensions très fortes, plusieurs centaines voire milliers de fois supérieures à la tension domestique. On retrouve ces valeurs dans tous les pays, y compris ceux où la tension domestique est sensiblement inférieure (au Japon ou aux États-unis, par exemple).



Mais pourquoi utilise-t-on la haute tension sur les câbles de transmission à longue distance?

Dans cet article, vous découvrirez la réponse à cette question, qui repose seulement sur quelques notions élémentaires d'électricité (courant, tension, résistance, etc.). En avant!

1. Le problème : la résistance des câbles

Les câbles électriques ne sont jamais parfaits, loin de là. Comme ils ne sont généralement pas faits de matériaux supraconducteurs, ils possèdent tous les défauts des conducteurs ordinaires, et en particulier celui de résister au passage du courant. C'est en grande partie pour ça qu'il est techniquement plus avantageux d'utiliser une forte tension. Pour comprendre précisément pourquoi, nous allons comparer ce qu'il se passe avec un câble parfait, puis avec une approximation d'un câble réel.

1.1. Câble idéal

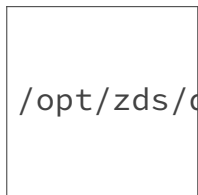
L'électricité est produite par différents générateurs, qui produisent une tension alternative d'amplitude constante: ce sont des **générateurs de tension** (à opposer aux générateurs de courant, qui produisent un courant alternatif d'amplitude constante). Ce sont les générateurs qui dictent la tension du réseau électrique.

Dans votre maison, vous allez brancher divers composants sur vos prises électriques, qui sont des **récepteurs**. Ceux-ci vont recevoir la tension présente sur le réseau électrique, et l'utiliser pour fonctionner. Un moteur électrique transformera l'électricité reçue en mouvement, un radiateur en chaleur, etc. La tension aux bornes de ces récepteurs est égale à la tension présente sur la prise, à savoir 230 volts (en Europe toujours).

Si l'on devait prendre en compte chaque récepteur de chaque maison, cela serait compliqué. Heureusement, un groupe de récepteurs peut-être modélisé par un récepteur plus gros, sans enfreindre les lois de l'électricité. Ainsi, du point de vue du réseau électrique, tout est plus simple: votre quartier, voire votre ville entière, peuvent être considérés comme un simple récepteur.

Avec des câbles idéaux, l'électricité serait transmise parfaitement entre le lieu où elle est produite (le générateur), et celui où elle est consommée (le récepteur). On pourrait alors utiliser des générateurs qui fournissent directement 230 volts, sans se soucier de quoi que ce soit. Dit autrement, la tension U_g produite par le générateur serait identique à la tension U_r présente sur la prise. La raison à cela est une loi fondamentale de l'électricité appelée **loi des mailles**: celle-ci dit que la tension produite par le générateur est égale à la somme des tensions des récepteurs placés en série.

$$U_g = U_r$$



:Situation avec un câble idéal.

1. Le problème: la résistance des câbles

1.2. Câble réel

Avec un câble réel, ce n'est pas ce qu'il se passe. Un vrai câble va se comporter comme un récepteur et on trouvera une tension à ses bornes. Tout se passe comme si le câble absorbait une partie de la tension destinée au *vrai* récepteur. On peut alors modifier le schéma vu plus haut pour rajouter l'effet du câble électrique, en rajoutant un récepteur placé en série avec le récepteur véritablement branché sur la prise. Dans ce cas, la tension aux bornes du générateur est égale à la tension aux bornes du récepteur à laquelle on ajoute la tension aux bornes du câble (simple application de la loi des mailles).

$$U_g = U_c + U_r$$



:Situation avec un câble réel.

Du point de vue du récepteur, la tension qu'il reçoit est *plus faible* que la tension fournie par le générateur. De manière imagée, le câble «vole» une partie de la tension fournie par le générateur et destinée au récepteur. La différence entre les deux est appelée **chute de tension**. Elle correspond simplement à la tension absorbée par le câble:

$$U_c = U_g - U_r$$

?

Mais en quoi cette chute de tension pose problème?

1.2.1. Premier problème: assurer un fonctionnement correct du réseau

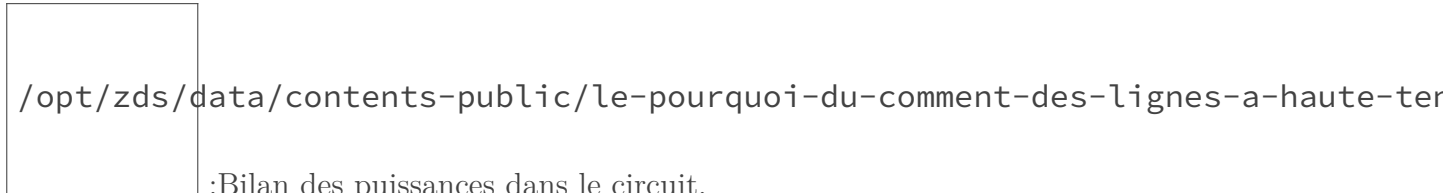
Premièrement, pour obtenir du 230 volts à la prise, il faudra que les générateurs produisent une tension plus élevée, afin de compenser la chute de tension. Ce phénomène devient plus problématique à mesure que la distance augmente, car la chute de tension est grossièrement proportionnelle à la longueur du câble. Avec un seul générateur et un seul récepteur, cela serait encore envisageable, mais pas dans un vrai réseau avec de multiples générateurs et récepteurs disséminés sur une grande zone.

En effet, dans un grand réseau, certains récepteurs sont connectés près des générateurs, avec de courts câbles, et d'autres plus loin, avec de longs câbles. Si l'on ne faisait rien, les récepteurs les plus lointains n'auraient pas une tension suffisante pour fonctionner à cause de la chute de tension; mais si l'on augmentait beaucoup la tension pour compenser, les récepteurs les plus proches seraient endommagés par une tension excessive! Il est donc nécessaire de limiter les chutes de tension pour que le réseau électrique fonctionne correctement pour tous les récepteurs.

2. La solution: la haute tension

1.2.2. Second problème : éviter des pertes inutiles

Deuxièmement, cette chute de tension est le signe que de l'électricité est transformée en quelque chose. Comme dit plus haut, un récepteur transforme une partie de l'énergie électrique qui le traverse en une autre forme d'énergie. Et si le récepteur branché sur la prise consomme une puissance P_r qui sert à quelque chose, ce n'est pas le cas pour le câble!



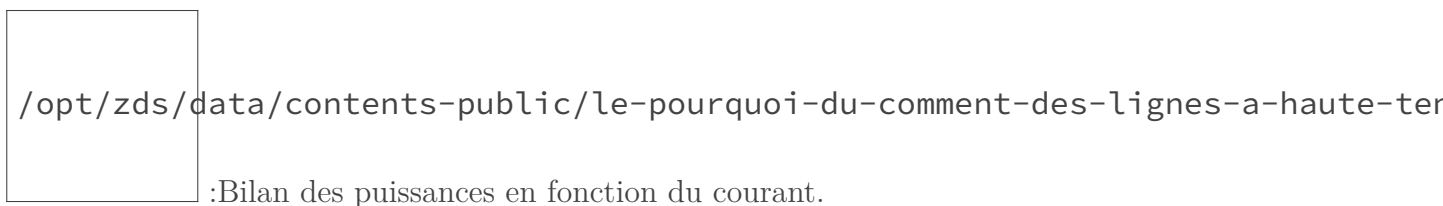
En effet, la totalité de la puissance P_c absorbée par le câble est transformée en chaleur. Il s'agit d'un phénomène général appelé **effet Joule**: tout conducteur transportant de l'énergie électrique va en transformer une partie en chaleur. Dans le réseau électrique, c'est un gaspillage d'énergie pur et simple! Pour éviter de générer de la puissance qui va finir en pertes, il faut réduire P_c , tout en gardant P_r constant. La chute de tension est liée directement à ces pertes, et c'est en la diminuant que l'on va pouvoir diminuer l'effet Joule et donc d'économiser de l'électricité.

2. La solution : la haute tension

Maintenant, il faut préciser quelque chose d'essentiel: diminuer la puissance (l'énergie consommée par unité de temps) au niveau du récepteur n'est pas une chose que l'on peut se permettre. En effet, les récepteurs ont besoin d'une certaine puissance pour faire correctement ce qui leur est demandé. Dans ce qui va suivre, nous allons ainsi postuler que la puissance du récepteur est fixée une fois pour toute et que l'on ne peut pas la modifier. Toute modification de la tension ou du courant devra laisser inchangée la puissance consommée par le récepteur. Or, les lois de électricité disent que, pour un récepteur quelconque, cette puissance est égale au produit de la tension à ses bornes et du courant qui le traverse. Si on note cette puissance P , la tension U et le courant I , on a alors:

$$P = U \times I$$

Dans le circuit composé du câble, du générateur et du récepteur, fixer la puissance pour le récepteur revient à fixer la tension à ses bornes, puis déterminer le courant nécessaire pour atteindre la puissance souhaitée. Une fois le courant dans le circuit connu, on peut en déduire la puissance dissipée dans le câble par effet Joule, ainsi que la puissance totale (somme des deux précédentes).



Si on regarde ce qui se passe dans le circuit, toute augmentation de U_r devra être compensée par une diminution de I dans les mêmes proportions pour conserver P_r . Et réciproquement, toute augmentation de I devra être compensée par une diminution de la tension U_r aux bornes

2. La solution: la haute tension

du récepteur. Cette augmentation de U_r ou de I aura évidemment des effets collatéraux sur la chute de tension dans le câble. Reste à savoir s'il vaut mieux baisser la tension et augmenter le courant, ou l'inverse. En effet, la chute de tension et les pertes par effet Joule ne seront pas les mêmes selon la solution adoptée.

2.1. La première raison

Pour diminuer la chute de tension, on doit déterminer comment se comporte le câble quand il est traversé par un courant. En particulier, il faut pouvoir calculer la chute de tension, ce qui est loin d'être trivial. Pour cela, nous allons devoir faire une simplification, qui colle relativement bien à la réalité: on va supposer que le câble se comporte comme une simple **résistance**.

Pour rappel, une résistance est un composant qui respecte ce qu'on appelle la **loi d'Ohm**, nommée d'après le physicien allemand [Georg Simon Ohm](#) qui l'a découverte. La loi d'Ohm est une égalité reliant la tension aux bornes d'une résistance au courant qui la traverse. Pour simplifier, une tension apparaît aux bornes d'une résistance traversée par un courant. De plus, cette tension est proportionnelle au courant, le coefficient de proportionnalité étant appelée la résistance. Ainsi, pour une résistance R , parcourue par un courant I , et aux bornes de laquelle il y a une tension U , la loi d'Ohm affirme que:

$$U = R \times I$$

Comme nous supposons que le câble se comporte comme une résistance, on peut lui appliquer la loi d'Ohm, et donc calculer la chute de tension U_c en fonction de sa résistance R et du courant I dans le circuit. On a le résultat suivant:

$$U_c = R \times I$$



La tension U dans l'équation est la tension aux bornes de la résistance. Dans le circuit vu au-dessus, cela correspond bien à la tension aux bornes du câble, et non la tension aux bornes du récepteur ou du générateur. Seules les variations de la résistance du câble ou du courant dans le circuit auront un impact sur la chute de tension.

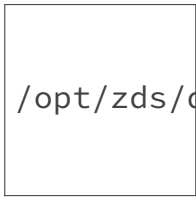
La loi d'Ohm montre que diminuer la résistance du câble ou le courant permet de diminuer la chute de tension. En effet, pour diminuer U_c , on ne peut que diminuer I ou R . Du point de vue mathématique, les deux se valent: seuls des facteurs purement techniques devraient jouer. Et diminuer la résistance est de fait plus compliqué que de diminuer le courant. En effet, la résistance R d'un câble dépend de plusieurs paramètres:

- la longueur l du câble;
- sa section A , c'est-à-dire la surface d'une rondelle de câble;
- et la résistivité, à savoir la résistance par unité de longueur et de section ρ .

Ces paramètres permettent de calculer R à l'aide de la formule suivante:

$$R = \rho \times \frac{l}{A}$$

2. La solution: la haute tension



:Calcul de la résistance d'un cylindre (d'après Defigoras, [Wikimedia Commons](#) ↗, [CC-BY-SA 3.0](#) ↗).

La longueur du câble étant fixe (on ne peut pas rapprocher les maisons du générateur en claquant des doigts), on ne peut jouer que sur la résistivité et la section. Dans les grandes lignes, la résistivité ne dépend que du matériau, mais les alternatives aux matériaux standards sont, en fonction des applications, soit trop chères soit trop fragiles. Augmenter la section posera aussi des problèmes: non seulement cela reviendrait plus cher, mais le poids des câbles augmenterait au point de ne plus être utilisable. La résistance ne peut donc pas être réduite simplement. Il ne reste plus que la diminution du courant, ce qui marche en pratique à la perfection. C'est à cela que sert la haute tension: en augmentant la tension, on peut diminuer le courant (et donc la chute de tension), sans toucher à la puissance du récepteur.

2.2. La seconde raison

Nous allons maintenant voir ce qu'il en est pour le second problème, à savoir les pertes par effet Joule, responsables d'un gâchis d'énergie. Dit simplement, toute la puissance électrique consommée par le câble est transformée en chaleur. Les pertes par effet Joule sont donc strictement identiques à la puissance électrique, c'est-à-dire P_c .

Pour trouver comment diminuer les pertes par effet Joule, il va falloir les calculer. Il faut donc exprimer P_c en fonction des autres paramètres du circuit (courant, résistance du câble, etc.). Pour ce faire, il suffit d'appliquer la formule générale $P = U \times I$ au câble:

$$P_c = U_c \times I$$

En clair, cette formule indique que diminuer le courant et diminuer la chute de tension permettent tous deux de diminuer les pertes par effet Joule. Mais quelle est l'influence de la résistance R du câble? Pour le savoir, on peut remplacer U_c par son expression (simple application de la loi d'Ohm):

$$P_c = U_c \times I = (R \times I) \times I = R \times I^2$$

En somme, on a:

$$P_c = R \times I^2$$

On en déduit qu'il vaut mieux diminuer le courant que de toucher à la résistance. En effet, diviser la résistance par deux divisera la puissance par deux. Mais diviser par deux le courant divisera la puissance non par deux, mais par son carré (quatre). De manière générale, diviser la résistance par x divisera la puissance par x , alors que faire la même chose sur le courant divisera la puissance par x^2 . Le gain est donc plus fort avec une diminution du courant.

$$P_c' = R \times \left(\frac{I}{x}\right)^2 = R \times \frac{I^2}{x^2} = \frac{P_c}{x^2}$$

Et c'est assez simple de comprendre pourquoi: si vous diminuez la résistance, vous diminuez la chute de tension sans toucher au courant. Par contre, diminuer le courant diminue à la fois

Conclusion

le courant lui-même, mais aussi la chute de tension (via la loi d'Ohm, $U_c = R \times I$). Diminuer le courant est donc à l'origine d'un double effet kiss-cool!

Conclusion

En bref, la haute tension est utilisée pour deux raisons fortement liées: en diminuant le courant nécessaire pour garder la même puissance, elle permet de réduire la chute de tension et les pertes par effet Joule. Sans ça, il serait impossible de transporter le courant sur de longues distances.

D'ailleurs, au début de l'ère électrique (fin du XIX^e siècle), les centrales se trouvaient au plus à quelques kilomètres des lieux de consommation, à cause de chutes de tension et de pertes dissuasives avec les niveaux de tension disponibles à l'époque. De nos jours, les lignes électriques s'étendent sur des centaines de kilomètres, avec des chutes de tension minimales (moins de 3%) et des pertes par effet Joule faibles (de l'ordre de 5% en France). Si l'on divisait simplement la tension par deux, la chute de tension atteindrait presque 5% et les pertes 20%!

Les avantages de la haute tension en font un choix technologique incontournable pour le transport d'électricité sur de longues distances, malgré toutes les précautions que son usage impose, notamment en matière de sécurité.

Je remercie Mewtow, pour son rôle significatif dans la rédaction de l'article, [Gabbro](#), [rezemika](#) et [Sanoc](#) pour leurs retours lors de la bêta, ainsi que [zeqL](#) pour la validation.