Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 87 (1996)

Heft: 1

Artikel: Coût non négligeable des pertes en ligne : optimisation économique des sections de câbles électriques de moyenne et basse tension

Autor: Donati, Daniel

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902284

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 15.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

La procédure de calcul généralement utilisée pour le dimensionnement des sections de câbles MT ou BT conduit à ne retenir que la section minimale admissible selon les critères thermiques pour un courant donné. Cette approche ne tient absolument pas compte du coût capitalisé des pertes électriques intervenant pendant la vie de l'installation. Le coût non négligeable de l'électricité, venant s'ajouter aux pertes importantes provoquées par les températures de fonctionnement élevées possibles avec les nouveaux matériaux isolants, incite, voire même devrait imposer d'affecter le choix des sections de câbles de puissance en fonction de critères économiques.

Coût non négligeable des pertes en ligne

Optimisation économique des sections de câbles électriques de moyenne et basse tension

■ Daniel Donati

Au lieu de se concentrer uniquement sur la minimisation de l'investissement financier lors du dimensionnement des sections de câbles en moyenne (MT) ou basse tension (BT), il serait judicieux de prendre en compte également le coût actualisé des pertes électriques sur la durée de vie de l'installation. Nous démontrerons que la section d'âme la plus économique est obtenue en minimisant la somme des coûts des pertes électriques avec les coûts initiaux d'achat et d'installation.

Critère de dimensionnement des câbles d'énergie MT et BT – généralités

Le choix de la section d'âme des câbles d'énergie en moyenne et basse tension revêt plusieurs aspects qui, dans la réalité, s'enchevêtrent. Ce n'est que pour la clarté de cet article que nous les séparerons artificiellement. Il y a d'abord le fameux compromis de Kelvin «*coût de la ligne – coût des pertes en ligne*» et la notion de *densité de courant économique*, en régime normal, généralement très inférieure aux densités maximales que peuvent supporter les lignes et les ouvrages dimensionnés pour les fournitures d'énergie de pointe.

Il y a ensuite le comportement d'un ouvrage en «*n–1*», c'est-à-dire de l'éventuelle surcharge à laquelle il est soumis, du fait qu'un ouvrage voisin, plus ou moins en parallèle, est mis brutalement hors service, à la suite d'un incident. A ce moment-là, ce n'est plus tellement le coût des pertes dû à la surcharge qui compte (celle-ci se produisant pendant une proportion du temps en moyenne très faible) mais la nécessité de ne pas dépasser la limite thermique de l'ouvrage. Si cette limite était dépassée, on serait conduit à ne pas distribuer la totalité de l'énergie appelée ou, si cela est possible, à diminuer la puissance de certaines centrales de production, pour en augmenter d'autres, entraînant de la sorte une modification des transits en ligne, résorbant la surcharge, mais entraînant aussi certains surcoûts de combustibles. Le rôle du planificateur sera donc de dimensionner l'installation ou l'ouvrage de façon que son exploitation soit non seulement économique en régime normal, mais aussi techniquement fiable en comportement «n–1».

Adresse de l'auteur:
Daniel Donati, ing. dipl. EPFL/ETS/SIA, M. Sc., 5, chemin Louis-Dunant, 1202 Genève.

De surcroît, il faut replacer le problème du choix de la section dans un contexte dynamique (dynamique est entendu ici dans le sens de l'évolution au cours des années). Car généralement, s'agissant de transporter l'énergie d'un point *A* à un point *B*, le besoin de transport augmente, en fait chaque année (quelques exceptions peuvent être trouvées, comme les lignes d'évacuation de la puissance des groupes de production).

La solution de moindre coût actualisé, c'est-à-dire qui étale au mieux les investissements, consisterait à construire des lignes de section assez faible et à rajouter une ligne supplémentaire assez souvent. Il est de toute évidence que cette façon d'opérer ne constitue pas la meilleure stratégie. On arriverait ainsi à couvrir le territoire d'une multitude de petites lignes; ce qui ne va évidemment pas dans le sens de l'histoire. En fait la nécessité de développer toujours les transports d'énergie électrique, à l'intérieur de territoires de dimensions constantes (qui se surchargent par ailleurs d'une quantité d'autres infrastructures) pose un certain nombre de problèmes difficiles à résoudre. La tendance actuelle conduit plutôt à préférer, lorsqu'on installe une nouvelle ligne, à prévoir d'emblée de manière empirique une section assez forte, malgré l'anticipation d'investissement qui l'accompagne, de manière qu'elle repousse assez loin dans le temps la nécessité de construction de la ligne suivante. On remarque que le problème du compromis entre les dépenses immédiates et un encombrement ultérieur réduit, influence aussi le choix de la section et reflète une sorte de choix politique global.

Disons quand même que l'incitation vers les fortes sections comporte certaines limites techniques puisque les chutes de tension en ligne augmentent avec les puissances transitées et dépendent, entre autres, peu des sections. De sorte que les lignes de forte section, transitant des fortes puissances, entraîneront des consommations de puissance réactive importante et des chutes de tension pouvant être excessives. Est alors posé le problème de la compensation de ces lignes. Ce problème concernant surtout les transports à haute et très haute tension, ne sera pas développé dans le cadre de cet article.

En dernier lieu, rappelons la nécessité, dans un réseau maillé, de disposer de lignes dont les sections sont comparables, de telle manière que la répartition des transits entre les différentes lignes, qui se fait sensiblement au prorata des réactances, donc des longueurs, ne conduise pas, en certains endroits à des distorsions excessives de répartition de puissance.

Principe général d'approche du choix d'une section de câble

Objectifs et contraintes

Lorsque l'on choisit une section d'âme de câble plus forte que celle déterminée par les contraintes thermiques, nous allons démontrer que *l'économie sur le coût total est due principalement à une réduction considérable du coût des pertes par effet Joule comparée à l'augmentation des coûts d'achat et d'installation.* Mais il y a aussi des contraintes à respecter qui sont liées:

- à l'intensité maximale admissible dans une section donnée et pour une technologie donnée;
- à la chute de tension maximale admissible sur le réseau;
- à la tenue mécanique (cas des lignes aériennes), qui impose une section minimale.

Aspects généraux

Lors de la pose d'une nouvelle ligne MT ou BT ou lors du renforcement d'un réseau existant, la procédure d'approche purement technique appliquée par les Services Electriques de Distribution (SED) consiste à choisir une section d'âme minimale satisfaisant le critère de capacité de transport cyclique désiré. Cette procédure a l'avantage de minimiser le coût d'investissement financier mais, comme on l'a dit, ne tient pas compte du coût économique des pertes intervenant pendant la durée de vie économique du câble.

La nouvelle approche proposée dans cet article, celle du calcul économique des sections d'âme des câbles, permettra au planificateur d'avoir un outil supplémentaire d'aide à la décision. Le coût croissant de l'énergie et de la puissance, venant s'ajouter aux pertes d'énergie importantes provoquées par les températures de fonctionnement élevées possible avec les nouveaux matériaux isolants, nous incite à effectuer le choix des sections de câble en fonction de critères économiques plus large. L'optimisation financière d'un investissement ne suffit plus, il est nécessaire d'étudier aussi l'optimisation économique et de choisir le meilleur compromis entre les deux. De plus, le choix d'une section de câble plus élevée que celle déterminée pour obtenir un coût d'investissement minimal conduit à des pertes plus faibles pour un même courant de transit.

Problème du coût à attribuer aux pertes électriques

Les pertes électriques, dans les différents éléments du réseau, doivent non seulement être compensées par une production supplémentaire, par rapport à celle strictement nécessaire pour satisfaire la consommation proprement dite, mais également pouvoir être «acheminées» par le réseau depuis les centres de production jusqu'aux endroits où elles apparaissent. Le coût à attribuer aux pertes sur une période donnée, l'année par exemple, peut se décomposer en trois termes:

- un coût d'anticipation des moyens de production, nécessaires pour compenser les pertes (en puissance) pendant les heures de pointe. Si l'on raisonne à parc de production fixé, un coût correspondant aux risques de défaillance, au niveau de la production, associés à cette demande de puissance supplémentaire;
- le coût de la consommation de combustible correspondante;
- un coût d'anticipation d'investissement de réseau.

Ce dernier terme, qui peut être estimé à partir d'une analyse des coûts de développement des réseaux (en fonction de l'accroissement de la consommation), n'intervient en fait que pour une faible part dans le coût global des pertes, ce qui est normal compte tenu des coûts respectifs du réseau et des moyens de production.

Aux trois termes énoncés plus haut pourrait s'ajouter une composante supplémentaire appelée *externalité*, mais difficilement quantifiable, concernant tous les problèmes liés à l'environnement et à l'utilisation rationnelle des ressources énergétiques (Renewable Allocation Resources).

Comme on peut aisément le constater, le problème du coût à attribuer à l'énergie perdue par pertes, donc non distribuée, est particulièrement complexe. Dans les développements qui vont suivre, on ne tiendra compte que des pertes par effet Joule intervenant pendant la vie économique du câble ou de l'installation considérée. Les questions telles que la maintenance, les pertes d'énergie dans les systèmes de refroidissement forcé et les pertes additionnelles seront laissées de côté dans cet article pour ne pas surcharger la présentation de la méthode.

Une bonne approximation du coût des pertes électriques pour les SED peut être obtenue en appliquant le coût d'achat de l'énergie (ou de vente) et en y incluant le prix de la taxe de puissance. Cette dernière approximation n'est plus valable pour le producteur d'électricité qui est confronté à la situation suivante que la production d'un kilowatt supplémentaire correspond au prix à payer pour la construction d'une nouvelle centrale de production. Le prix de l'énergie, quant à lui, peut être calculé

selon le principe de tarification au *coût marginal* dans le meilleur des cas, c'est-à-dire en situation hors monopole.

Aspects économiques

Pour englober les coûts d'achat et d'installation aux coûts des pertes d'énergie intervenant pendant la durée de vie du câble, il est nécessaire de les exprimer en termes de valeurs économiquement comparables, c'est-à-dire en valeurs qui se rapportent à une même époque dans le temps. Il est d'usage pratique d'utiliser la date d'achat de l'installation comme point de référence et de s'y référer comme le «présent». Les coûts «futurs» des pertes d'énergie sont ensuite convertis en leurs «valeurs actuelles» équivalentes. On utilise pour cela le *processus d'actualisation*, le taux d'actualisation étant lié au coût des emprunts ou bien à la valeur de l'argent défini par le service financier de l'entreprise.

Dans la méthode de calcul qui va suivre, il a été fait abstraction de l'inflation car elle a une influence à la fois sur le coût des emprunts et sur le coût de l'énergie. Si ces paramètres sont considérés sur une même durée et que les effets de l'inflation soient approximativement les mêmes pour les deux, le choix d'une section d'âme économique peut être fait de façon satisfaisante sans y ajouter la complication de l'inflation.

Pour calculer la valeur actualisée du coût des pertes, il est nécessaire de faire un choix et de définir des valeurs appropriées pour l'accroissement futur de la charge et les augmentations annuelles du prix de l'énergie. Le taux annuel d'actualisation est considéré constant pendant la vie économique du câble qui peut être de 30 ans ou plus. Dans cet article, nous ne donnerons pas d'indications précises sur le choix et les valeurs à donner aux facteurs économiques, choix qui incombe au chef de projet ou au planificateur de l'installation.

Lors de l'application des formules proposées dans les pages suivantes, il convient de ne pas oublier qu'elles sont basées sur l'hypothèse d'une stabilité des paramètres financiers sur toute la durée de vie économique du câble. La prise en compte de l'instabilité des paramètres financiers et économiques conduirait à entrer dans le domaine des calculs en avenir incertain et n'apporterait pas de précision notable quant aux résultats (se reporter aux commentaires de la figure 1).

Autres critères

Les critères économiques ne sont pas les seuls à prendre en considération. On doit également considérer les critères techniques, tels les puissances et courants de court-circuit ainsi que leur durée, les chutes de tension, les réserves de puissance sur les lignes, les facteurs de sécurité, etc. Cependant un câble défini par la méthode de la section économique satisfait généralement ces divers points, de sorte que, lors de son dimensionnement, il est recommandé de suivre la séquence suivante:

- calculer la section d'âme économique;
- vérifier que la section déterminée ci-dessus est suffisante pour transporter la charge maximale prévue à la fin de la période d'étude, sans que la température de l'âme dépasse la valeur maximale admissible;
- vérifier que la section de câble choisie peut supporter en toute sécurité les critères techniques, les courants de court-circuit prévus et les courants de défaut à la terre;
- vérifier que la chute de tension à l'extrémité du câble reste dans les limites acceptables;
- vérifier que la section de câble satisfait bien aux autres critères propres à l'installation.

Pour compléter le domaine du choix économique, il convient d'accorder une importance suffisante aux conséquences des interruptions d'alimentation. Il peut s'avérer alors nécessaire d'utiliser une section d'âme plus forte que ne l'exigent les conditions de charges normales ou d'adapter le réseau en conséquence.

Les conséquences économiques et financières sur le coût global entraînées par des décisions en avenir incertain, peuvent être étudiées en pondérant les paramètres du problème par une fonction de probabilité et d'étudier leurs conséquences selon divers scénarios sur les résultats. Cependant, cela conduirait, comme cela a déjà été dit, à pénétrer dans le domaine de la théorie de la décision.

Il ne faut pas perdre de vue que l'approche économique du dimensionnement des câbles peut céder le pas aux facteurs prépondérants tels les facteurs de sécurité du réseau. Mais le critère d'économie reste important et chaque fois qu'une planification d'un réseau sera étudiée, si les facteurs de sécurité sont remplis l'approche économique restera prépondérante par rapport à l'approche purement technique.

Modélisation économique d'un câble de puissance

Pour simplifier le modèle mathématique présenté, nous ne nous intéresserons qu'aux pertes par effet Joule du câble ou de l'installation considérée. L'introduction des pertes additionnelles peut y être inclue sans problème. Le but de cet article étant de bien faire comprendre aux lecteurs la méthode d'approche économique sans inclure trop de complication technique, nous laisserons le soin aux lecteurs intéressés par ces pertes de faire les modifications nécessaires au modèle présenté.

La méthode développée pour le calcul de la section économique des câbles consiste à calculer la section optimale pour la charge requise et à choisir ensuite la section d'âme normalisée la plus proche.

Calcul du coût total

Pendant une durée de vie économique de N années, le coût total C_{tot} d'un câble à l'année zéro, c'est-à-dire à l'année de l'investissement, exprimé en valeurs actualisées se calcule comme suit:

$$C_{tot} = C_{inst} + C^*_{Joule} = C_{inst} + R \cdot I^2_{max} \cdot A \qquad (1)$$

C^*_{Joule} valeur actualisée du coût global des pertes pendant une durée de vie économique de N années [fr.] (notation: C_{Joule} pour 1 année, C^*_{Joule} pour N années)

A facteur tenant compte du taux d'actualisation, des frais d'énergie, de la capacité additionnelle de production (de la taxe de puissance pour le distributeur), de l'accroissement du courant et du coût de l'énergie

Calcul du facteur *A*

Coût des pertes par effet Joule

Le coût des pertes se compose de deux parties: les frais d'énergie et le coût associé à une puissance de pointe supplémentaire nécessaire pour couvrir les pertes (ou de la taxe de puissance pour le distributeur). Le coût des pertes d'énergie pendant la première année, C_E, est:

$$C_E = R \cdot I^2_{max} \cdot L \cdot N_P \cdot T \cdot P \cdot 1000 \qquad (2)$$

I_{max} intensité du courant à la charge maximale au cours de la première année, c'est-à-dire valeur moyenne horaire la plus élevée [A]

L longueur du câble [m]

R résistance linéique apparente de l'âme du câble en courant alternatif, tenant compte des effets de peau et de proximité (y_p, y_s) et des pertes dans les écrans métalliques et l'armature (λ_1, λ_2) [Ω/m]

N_P nombre de conducteurs de phase par circuit

T temps de fonctionnement à pertes maximales par effet Joule, c'est-à-

dire nombre d'heures par année de fonctionnement au courant maximal I_{max} qu'il faudrait pour produire les mêmes pertes totales annuelles d'énergie que le courant de charge variable effectif:
$T = \int_0^{8760h} [I(t)^2/I_{max}^2]\,dt$ [h/année]

P coût d'un kilowattheure au niveau de tension approprié [fr./kWh]

Coût de la capacité additionnelle de production

Le coût C_P, pendant la première année, de la capacité de production additionnelle nécessaire pour compenser ces pertes est:

$$C_P = R \cdot I_{max}^2 \cdot L \cdot N_P \cdot D \cdot 1000 \qquad (3)$$

D frais annuels de capacité de production annuelle pour couvrir les pertes électriques [fr./kW · an]

Le coût global des pertes au cours de la première année $C_{Joule} = C_E + C_P$ est obtenu par l'addition des formules (2) et (3). Si les coûts sont payés en fin d'année, leur valeur actualisée à la date d'achat de l'installation est:

$$C_{Joule} = [(T \cdot P + D) \cdot (R \cdot I_{max}^2 \cdot L \cdot N_P) \cdot 1000] / (1+i) \qquad (4)$$

i taux d'actualisation, en faisant abstraction de l'inflation

Pendant la vie économique du câble, nous ne pouvons négliger l'accroissement annuel de la charge (i.e. du courant) ainsi que l'augmentation annuelle du coût de l'énergie. Pour cela il nous faut introduire un facteur Q qui tienne compte de cet accroissement pendant les N années de vie économique du câble ou de l'installation considérée.

$$Q = \sum_{n=1}^{N} r^{n-1} = \frac{1-r^N}{1-r} \qquad (5)$$

$$r = [(1+a)^2 \cdot (1+b)] / (1+i) \qquad (6)$$

a accroissement annuel relatif du courant

b augmentation annuelle relative du coût de l'énergie, abstraction faite de l'inflation

Maintenant nous avons déterminé tous les facteurs et nous pouvons exprimer la valeur actuelle des pertes pendant les N années de vie économique, actualisée à la date d'achat de l'installation:

$$C_{Joule}^* = R \cdot I_{max}^2 \cdot [(T \cdot P + D) / (1+i)] \cdot Q \cdot L \cdot N_P \cdot 1000 = R \cdot I_{max}^2 \cdot A \qquad (7)$$

Remarque: Lorsque l'utilisation de différentes sections d'âme de câble nécessite plusieurs calculs, il est avantageux d'exprimer tous les paramètres, à l'exception du courant et de la résistance linéique apparente de l'âme, par ce seul coefficient A.

Résumé

Comme nous l'avons vu par la formule (1), le coût total actualisé d'un câble C_{tot} s'exprime par:

$$C_{tot} = C_{inst} + C_{Joule}^* = C_{inst} + R \cdot I_{max}^2 \cdot A \qquad (8)$$

avec:

$$A = [(T \cdot P + D) / (1+i)] \cdot Q \cdot L \cdot N_P \cdot 1000 \qquad (9)$$

La figure 1 est une représentation de la formule (8). On y exprime le coût total des câbles GKT-F tripolaires 20/12 kV, âme en aluminium, parcouru par une intensité I_{max} de 160 A pendant une durée d'une année. Nous avons choisi un prix de pose du câble de 130 francs par mètre linéaire et supposé indépendant des sections d'âme de câbles à poser.

Ce graphique met en évidence un point important: *les économies possibles ne dépendent pas de façon critique de la section d'âme lorsqu'elle se situe dans la zone des valeurs économiques* (point B). Cela entraîne deux implications:

- L'impact des erreurs sur les données financières, particulièrement celles qui déterminent les coûts futurs, est faible. Alors qu'il est avantageux de rechercher des données aussi précises que possible, on peut réaliser des économies considérables en utilisant des données basées sur des estimations raisonnables.
- Il est possible, sans perdre une trop grande partie des bénéfices réalisés en choisissant une section d'âme économique, d'accorder l'importance qui convient à d'autres considérations sur le choix des sections d'âme qui entrent dans le coût global d'une installation, telles que les courants de défauts, les chutes de tension et les sections d'âme normalisées.

Cette figure nous montre une réduction du coût total de près de moitié pendant la première année en faveur de l'approche économique (point B) en comparaison avec l'utilisation d'une section d'âme thermique (point A) de 50 mm² pouvant transporter l'intensité spécifiée de 160 A.

Remarque importante:

Si les coûts de pose du câble augmentent avec les sections d'âme des câbles (problème du tirage des câbles de fortes sections, largeur de tranchées plus grande, terrains en pente, etc.) on doit s'attendre à une remontée importante du coût total pour des câbles de fortes sections. Il est donc de première importance de bien évaluer le prix de tirage et de génie civil lors de l'étude d'un projet.

Développement économique

Nous allons nous baser sur la relation générale de la formule (8) pour proposer aux lecteurs deux méthodes de calcul pour la détermination de la section économique des câbles. Il s'agit des méthodes suivantes:

- méthode du calcul de la section économique pour une intensité donnée;
- méthode de la fourchette d'intensité économique pour des valeurs de section discrètes.

1re méthode: calcul de la section économique pour une intensité donnée

Exprimons tous les termes de la formule (8) en fonction du paramètre de la section du câble S à déterminer:

$$C_{tot}(S) = C_{inst}(S) + R(S) \cdot I_{max}^2 \cdot A \qquad (10)$$

L'équation donnant la relation entre $C_{inst}(S)$ et la section d'âme peut être obtenue à partir des coûts des câbles de sections normalisées, coûts fournis par les câbliers.

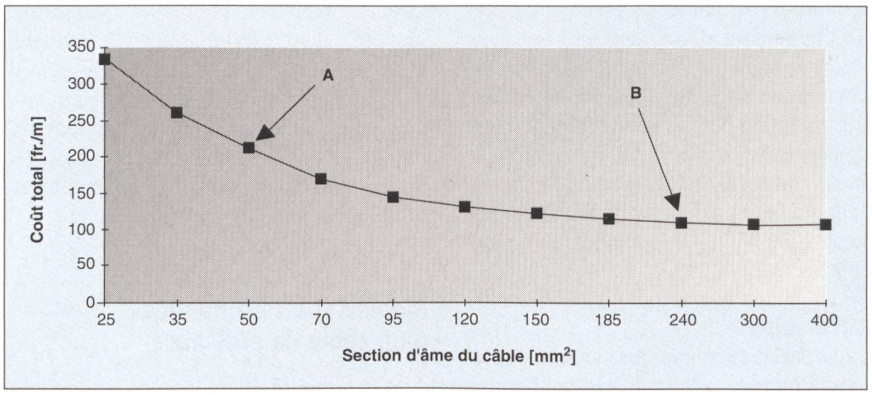

Figure 1 Variation du coût total en fonction des sections d'âme des câbles

A calcul selon section thermique *B* calcul selon section économique

En général, s'il est possible d'adopter une relation approximativement linéaire aux coûts, éventuellement sur une gamme réduite de sections d'âme, il convient de l'utiliser. Cela peut conduire à des erreurs qui sont minimes dans les résultats; eût égard aux incertitudes éventuelles sur les paramètres financiers adoptés pendant la période de vie économique choisie, on a alors:

$$C_{inst}(S) = L \cdot (C_{var} \cdot S + C) \qquad (11)$$

$C_{inst}(S)$ coût après installation d'un câble en fonction de sa section [fr.]
C_{var} composante variable du coût liée à la section d'âme [fr./m · mm²]
C composante constante du coût indépendant de la section d'âme du câble [fr./m]

La résistance linéique apparente de l'âme du câble peut aussi être exprimée en fonction de la section par la formule suivante:

$$R(S) = \{\rho_{20} \cdot B \cdot [1 + \alpha_{20}(\theta_m - 20)] / S\} \cdot 10^6 \qquad (12)$$

avec:

$$B = (1 + y_p + y_s) \cdot (1 + \lambda_1 + \lambda_2) \qquad (13)$$

ρ_{20} résistivité de l'âme à 20 °C [Ω/m]
y_p facteur d'effet de proximité
y_s facteur d'effet de peau
λ_1, λ_2 rapport des pertes totales dans les gaines métalliques et armures respectivement aux pertes totales des âmes (ou pertes dans une gaine ou armure aux pertes dans une âme)
α_{20} coefficient de variation de la résistance électrique de l'âme en fonction de la température, pris à 20 °C [1/K]
θ_m température moyenne de service de l'âme du câble [°C]

Remarques: Il est peu probable que la section d'âme économique calculée soit identique à une section normalisée; il est donc nécessaire de fournir une relation continue entre la résistance et la section. Pour cela, il faut émettre une hypothèse quand à la valeur de la résistivité pour chaque matériau de l'âme. Les valeurs recommandées ici pour ρ_{20} sont: $8{,}35 \cdot 10^{-9}$ Ω/m pour le cuivre et $30{,}3 \cdot 10^{-9}$ Ω/m pour l'aluminium. Ces valeurs ne sont pas les valeurs exactes prévues pour ces matériaux, mais il s'agit là de valeurs moyennes choisies de manière à calculer directement les résistances de l'âme à partir des sections nominales, plutôt qu'à partir des sections réelles effectives.

Pour les basses tensions (jusqu'à 1000 V), les valeurs de λ_1 et λ_2 peuvent être négligées. En moyenne tension, le facteur correctif $(1+y_p+y_s)$ vaut de 1,01 pour les petites sections à 1,04 pour les grandes sections et pour des câbles tripolaires.

Introduisons dans un premier temps les équations (11) à (13) dans l'équation (10). Calculons ensuite la dérivée de l'équation (10) par rapport à (S), puis égalons à zéro la dérivée obtenue afin d'obtenir la section qui minimise la fonction du coût total:

$$S_{ec} = 1000 \cdot \sqrt{\frac{I_{max}^2 \cdot A \cdot \rho_{20} \cdot B \cdot [1 + \alpha_{20}(\theta_m - 20)]}{C_{var}}} \qquad (14)$$

S_{ec} section économique de l'âme [mm²]
I_{max} intensité du courant à la charge maximale au cours de la première année, c'est-à-dire valeur moyenne horaire la plus élevée [A]
C_{var} composante variable du coût liée à la section d'âme [fr./m · mm²]
A grandeur auxiliaire définie par l'équation (9) [fr./W]
ρ_{20} résistivité de l'âme à 20 °C [Ω/m]
B grandeur auxiliaire définie par l'équation (13)
α_{20} coefficient de variation de la résistance électrique de l'âme en fonction de la température, pris à 20 °C [1/K]
θ_m température moyenne de service de l'âme du câble [°C]

Il est peu probable que la section économique calculée selon la formule (14) soit une section d'âme normalisée. Nous préconisons la procédure suivante consistant à calculer le coût pour les sections de l'âme immédiatement supérieure et immédiatement inférieure et choisir la section de l'âme la plus économique. En effet, si la section économique S_{ec} calculée n'est pas une section de câble normalisée, la formule (14) ne nous renseigne pas s'il faut prendre la section directement supérieure ou inférieure. Seul un calcul supplémentaire des coûts totaux selon la formule (1) en prenant successivement la section directement supérieure et directement inférieure nous renseignera sur le bon choix.

Remarques: Pour pouvoir utiliser initialement la formule (14), il faut émettre une hypothèse quant à la valeur de la section de l'âme qui va être calculée. En effet, pour commencer le calcul, il nous faut définir les valeurs des paramètres y_p, y_s, λ_1 et λ_2. Une fois cette hypothèse faite, on calcule une première fois la section économique. Si la section ainsi calculée s'avère être très différente de la section probable, il est recommandé d'introduire alors dans l'équation (13) les valeurs des paramètres relatifs à la section calculée et de recommencer le calcul pour vérifier si la nouvelle section ne s'écarte pas trop du premier résultat.

Section d'âme nominale [mm²]	Fourchette d'intensité économique [A]	Capacité de transport [A]
25	...– 13	120
35	13– 20	140
50	20– 25	165
70	25– 35	205
95	35– 48	245
120	48– 62	280
150	62– 71	310
185	71– 93	365
240	93–122	420
300	122–168	475
400	168–	535

Tableau I Fourchettes d'intensité de courant économique pour les sections d'âmes de 25 à 400 mm²

2e méthode: calcul de la fourchette d'intensité économique pour des valeurs de section discrètes

Cette seconde méthode se base sur la relation (10), dont on exprime le courant I_{max} en fonction des autres paramètres de la relation, eux-mêmes exprimés en fonction de la section qui prend ici des valeurs discrètes. On détermine ainsi ce que l'on peut appeler une fourchette d'intensité de courant économique pour chaque section de câble S_k:

$$I_{max,inf}(S_k) = \sqrt{\frac{C_{inst}(S_k) - C_{inst}(S_{k-1})}{A \cdot L \cdot [R(S_{k-1}) - R(S_k)]}} \qquad (15)$$

$$I_{max,sup}(S_k) = \sqrt{\frac{C_{inst}(S_{k+1}) - C_{inst}(S_k)}{A \cdot L \cdot [R(S_k) - R(S_{k+1})]}} \qquad (16)$$

S_k section d'âme considérée [mm²]
S_{k-1}, (S_{k+1}) section d'âme immédiatement inférieure (supérieure) à S_k [mm²]
$I_{max,inf}(S_k)$ limite inférieure de I_{max} pour la section S_k
$I_{max,sup}(S_k)$ limite supérieure de I_{max} pour la section S_k
$R(S_k)$ résistance linéique en courant alternatif de l'âme de section S_k [Ω/m]

But de la méthode: les limites supérieures et inférieures de l'intensité de courant économique de chaque section d'âme sont calculées pour définir le choix de la section la plus économique pour une intensité particulière. La limite supérieure de l'intensité de courant économique pour une section d'âme est égale à la limite inférieure de l'intensité économique pour la section d'âme immédiatement supérieure.

A titre d'exemple, nous avons calculé les fourchettes d'intensité économique pour des câbles GKT-F tripolaires 20/12 kV, âme en aluminium (tableau I). Les sections en gras sont des sections de câbles normalisées.

On remarque dans le tableau que les fourchettes d'intensité de courant économique s'écartent sensiblement des valeurs des capacités de transport données par les câbliers. Les relations entre l'intensité maximale et le coût linéique total (fr./m) pour trois sections d'âmes de type GKT-F tripolaires 20/12 kV, 3×95 mm², 3×185 mm² et 3×300 mm², sont données à la figure 2. Dans cette représentation le prix de pose du câble par mètre linéaire est choisi constant et indépendant des sections d'âme de câble afin de bien faire ressortir les fourchettes de courants économiques associées aux sections.

La figure 2 représente le coût total en fonction de l'intensité maximale pour trois sections de câbles GKT-F tripolaires 20/12 kV pendant une année. On y remarque que pour un câble d'une section de 3×95 mm², la fourchette de courant économique se situe entre 20 et 60 A, alors que ce dernier permet une capacité de transport jusqu'à 245 A. Pour une fourchette d'intensité de 60 à 105 A, c'est le câble de section 3×185 mm² qui réalise la meilleure minimisation du coût linéique global. Pour une intensité supérieure de 105 A, c'est le câble de 3×300 mm² qui est le plus économique.

Limite de la méthode de la fourchette d'intensité de courant économique

Dans les formules (15) et (16), les limites inférieures et supérieures de I_{max} sont calculées au moyen de deux racines carrées. Les fractions contenues dans ces deux racines doivent impérativement être positives sinon il est impossible d'obtenir une valeur réelle. Pour cela il faut qu'à chaque augmentation de la section des câbles corresponde aussi une augmentation du prix des câbles. Or il arrive que dans certains types de câbles, les sections non normalisées soient plus chères que les sections normalisées qui les suivent et/ou les précèdent, ce qui donne une différence de prix négative entre la section immédiatement supérieure et inférieure. Si l'on se trouve dans un tel cas de figure, la solution pour résoudre ce problème est de laisser de côté la méthode de la fourchette d'intensité économique (formules (15) et (16)) et d'utiliser la méthode de la section économique (formule (14)). Cette dernière méthode est basée sur une dérivée, ce qui lui confère une insensibilité aux variations négatives de prix des câbles entre les sections normalisées et non normalisées. En pratique, on utilise surtout la méthode de la section économique (formule (14)) pour définir la section économique d'un câble; l'autre méthode, celle de la fourchette d'intensité économique, étant plutôt de caractère académique.

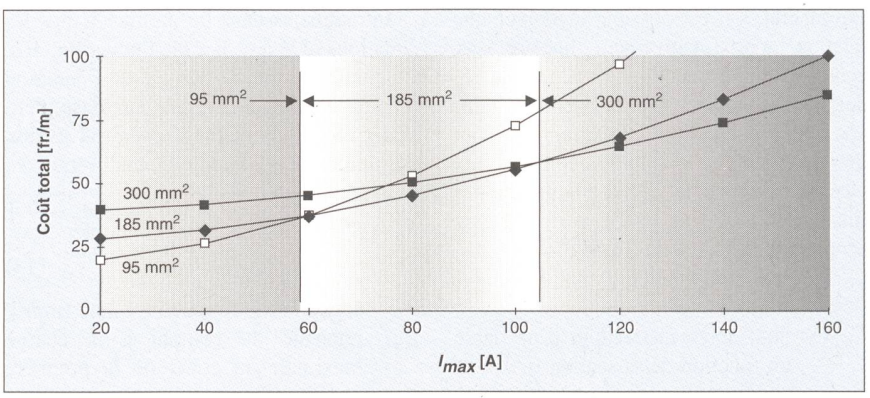

Figure 2 Coût total linéique en fonction de l'intensité maximale transitée I_{max}

Conclusions

Ces deux méthodes de calcul économique ont été appliquées à plusieurs reprises pour le dimensionnement de nouvelles installations et dans des renouvellements de lignes électriques. Ces méthodes nous ont permis d'effectuer des économies financières non négligeables sur la différence de coût entre l'approche purement technique (capacité thermique de transport) et l'approche purement économique (capitalisation des pertes par effet Joule). Ces économies se situaient entre 50 et 75% du coût total de l'installation. Ceci démontre le postulat énoncé en début d'article, que l'économie sur le coût total est due principalement à une réduction considérable du coût des pertes par effet Joule comparée à l'augmentation du coût d'achat et d'installation.

Nous espérons que ce court article a permis de mettre en évidence l'importance de l'approche économique qui apporte une aide à la décision supplémentaire à la détermination de la section optimale des conducteurs. Cette section devant réaliser le meilleur compromis entre le coût d'achat et le coût des pertes engendré pendant toute la durée de fonctionnement de l'installation.

Die Kosten der Leitungsverluste sind nicht vernachlässigbar

Optimierung der Leiterquerschnitte von MS- und NS-Kabeln nach wirtschaftlichen Kriterien

Üblicherweise werden die Querschnitte von MS- und NS-Kabeln primär nach thermischen Kriterien dimensioniert. Tendenziell setzt man dabei möglichst niedrige Leiterquerschnitte ein und sorgt nur dafür, dass unter normalen Betriebsverhältnissen die Grenzen der erlaubten Kabeltemperaturen nie überschritten werden. Auf diese Weise wird aber den Kosten der Energieverluste, welche während der gesamten Lebensdauer der Kabelanlage anfallen, nicht Rechnung getragen. Diese sind aber – speziell bei den modernen Kabeln mit Isolationen, die immer höhere Betriebstemperaturen ertragen – alles andere als vernachlässigbar und sollten bei der Dimensionierung der Kabelquerschnitte berücksichtigt werden. Der Artikel zeigt einen Weg, wie die Kabelquerschnitte auch nach wirtschaftlichen Kriterien dimensioniert werden können.

Im beschriebenen Rechenmodell werden die totalen Kosten einer Kabelanlage (Investitions- und Betriebskosten), welche während einer Lebensdauer von N Jahren anfallen, im Jahre Null (Jahr der Investition) kapitalisiert (Formeln (8) und (9), Figur 1). Das Modell berücksichtigt sowohl die Leitungsverluste als auch Leistungskosten für die Stromspitze I_{max}. Ebenfalls berücksichtigt wird eine jährliche Zunahme des übertragenen Stromes (Faktor a) und der Energiekosten (Faktor b). Aus den totalen Kosten C_{tot} als Funktion des Leiterquerschnittes S lässt sich ein wirtschaftlich optimaler Leiterquerschnitt S_{ec} ableiten (14). Da in der Praxis nur diskrete, standardisierte Leiterquerschnitte zur Verfügung stehen, wird in einem weiteren Teil des Artikels gezeigt, wie unter diesen der wirtschaftlich optimale Leiterquerschnitt ausgewählt wird (Formeln (15) und (16), Figur 2 sowie Tabelle I).