Evaluation du potentiel de récupération de chaleur par refroidissement des câbles électriques

Autor(en): **Gaille, François / Gilst, John van**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **83 (1992)**

Heft 15

PDF erstellt am: **31.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-902848

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Evaluation du potentiel de récupération de chaleur par refroidissement des câbles électriques

François Gaille et John van Gilst

Cet article reporte les résultats d'une analyse mandatée et financée par l'Office Fédéral de l'Energie (OFEN), Berne, dont l'objectif fut de procéder, sur l'ensemble des réseaux électriques suisses, à une évaluation quantitative du potentiel de récupération de chaleur par refroidissement des câbles électriques. L'étude a montré que globalement une telle récupération de chaleur n'est pas énergétiquement intéressante; par contre localement, celle-ci pourrait s'avérer envisageable et rentable pour autant que certaines conditions spécifiques soient remplies.

Dieser Aufsatz berichtet über die Ergebnisse einer im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft (BEW) für die Gesamtheit der schweizerischen Elektrizitätsnetze durchgeführten quantitativen Studie zum Potential der Verlustwärme-Rückgewinnung bei gekühlten Energiekabeln. Sie zeigen, dass eine solche Wärmerückgewinnung im allgemeinen energiemässig nicht sinnvoll ist, dass sie aber in Einzelfällen wirtschaftlich sein kann und in Betracht gezogen werden könnte.

Adresses des auteurs

Dr. *François Gaille*, Physicien, Câbleries et Tréfileries de Cossonay S.A., 1305 Cossonay, et *John van Gilst*, Ing. EPFL, Argus Engineering S.A., 1007 Lausanne.

Le transport de l'énergie électrique est accompagné par des pertes ohmiques et diélectriques qui sont dissipées sous forme d'énergie thermique (chaleur). Habituellement, la chaleur est évacuée à l'environnement et est en général perdue.

La présente analyse trouve son origine dans une étude de l'un des auteurs, intitulée «Récupération de la chaleur des câbles? Critères d'évaluation» [1], qui fait de son thème central la possibilité de récupérer la chaleur dissipée avec comme critère la rentabilité économique, ceci à l'aide d'un exemple concret de liaison câblée. L'objectif de l'analyse a été d'étendre très largement cette étude et d'évaluer quantitativement le potentiel de récupération de chaleur dissipée lors du transport de l'énergie électrique dans l'ensemble des réseaux électriques suisses.

L'analyse repose sur des données qualitatives et quantitatives relatives aux transports et réseaux électriques. Les informations qualitatives concernant la technologie des câbles électriques, profils de charges, densités des réseaux, etc. ont été obtenues lors de discussions avec des spécialistes et des documents et statistiques qui ont été mis à disposition. La quantification de la dissipation de chaleur s'est effectuée par deux approches différentes:

1. Par calcul des pertes spécifiques électriques [W/m] étendues à l'ensemble des réseaux électriques. Grâce aux «Statistiques de l'UCS sur les perturbations, 1986» [2], une évaluation des pertes totales des réseaux électriques a été effectuée.
2. A partir de la «Statistique Suisse de l'électricité 1990» [3], l'énergie dissipée a été évaluée.

Les deux voies doivent en principe aboutir aux mêmes résultats finaux. Un élément reliant les deux approches est le profil de charge qui, a priori, n'est pas connu pour chaque réseau considéré. L'introduction d'un courant réel moyen a conduit à obtenir des résultats pratiquement identiques.

Finalement, la totalité de l'énergie thermique dissipée ne peut pas être intégralement réutilisée. En effet, cette réutilisation est subordonnée à un certain nombre de contraintes techniques qui ont dû être analysées et quantifiées. Pratiquement, l'énergie thermique réellement utilisable est beaucoup plus faible que l'énergie dissipée.

Informations techniques

Liaisons électriques

La figure 1 donne un résumé et les principales caractéristiques des liaisons suisses servant au transport de l'énergie électrique. Trois types de liaisons ont été définies, à savoir les lignes aériennes, les lignes souterraines (fourreau, fouille, caniveau, etc.) et liaisons par tunnels ou galeries techniques. Les niveaux de tension et longueurs sont extraites de [2].

Sous refroidissement, qu'il soit naturel ou forcé, est indiqué le milieu physique utilisé pour le transfert de l'énergie thermique dissipée par les liaisons. La situation actuelle de récupération de cette énergie est donnée ainsi qu'une indication qualitative (qui sera quantifiée par la suite) sur la potentialité de récupération.

Fluides caloporteurs et conditions thermiques de récupération

Dans le cas d'une récupération forcée de l'énergie thermique dissipée, les différents fluides caloporteurs envisageables (milieux servant au trans-

Types de liaisons	Niveaux de tension	Longueur	Refroidissement		Récupération	
	[kV]	[km]	naturel	forcé	naturelle	forcée
Lignes aériennes	≦ 1, 10, 20, 50, 150, 220, 380	85 188	air	non existant	non existante	non existante
Lignes souterraines	≦ 1, 10, 20, 50, 150, 220	183 977	air, béton, terre	air, eau, huile	non existante, très faible potentiel	non existante, faible potentiel
Tunnels, galeries techniques	a)	a)	air	air, eau, huile	non existante, très faible potentiel	non existante, faible potentiel

Figure 1 Liaisons électriques en Suisse
a) pas de statistique disponible

port de l'énergie thermique) sont donnés en figure 2. Deux modes de récupération de chaleur peuvent être considérés:

- par échangeur de chaleur ou récupération directe
- par thermopompe ou récupération indirecte.

Dans le cas d'une récupération directe, seules deux applications pratiques d'utilisation de l'énergie sont possibles: chauffage de locaux à basse température et de piscines.

Le mode de récupération de l'énergie met en évidence le problème complexe de l'utilisation de la chaleur disponible récupérée. En effet, si la demande de chaleur et la densité d'utilisation ne sont pas directement liées et compatibles avec la récupération, il faut alors envisager un stockage de l'énergie thermique qui représente un handicap sérieux pour la récupération.

Câbles et réseaux électriques

Les câbles à huile tendent à disparaître et à être remplacés au profit des câbles à isolation synthétique extrudée (PE, XLPE, EPR). La durée de vie d'un câble électrique est en moyenne égale à 30 ans. Les réseaux électriques suisses sont gérés par quelques 1200 entreprises (sociétés électriques, services industriels, etc.) mais environ 80% de l'énergie électrique est gérée par une dizaine seulement d'entre elles.

Les sociétés électriques s'occupent du dimensionnement des réseaux qui sont en constante évolution. La période sur laquelle on peut évaluer les charges de ceux-ci n'excède pas 10 ans et les conditions nominales ou optimales de fonctionnement des réseaux ne sont pas toujours atteintes. Les profils de charges peuvent être connus ponctuellement par les sociétés électriques, mais leurs statistiques ne sont pas sans autre à disposition dans une forme utilisable. Les concepteurs des réseaux limitent au maximum les pertes électriques si bien qu'une récupération forcée des pertes résiduelles n'est pas actuellement une priorité des exploitants. Il est prévu dans le futur et ceci pour une partie des réseaux, une surcharge de ceux-ci, avec augmentation de pertes.

Les galeries techniques se trouvent dans les grandes villes. En plus des liaisons électriques, elles contiennent souvent des canalisations d'eau et d'autres vecteurs énergétiques. A Zurich, la longueur des galeries est estimée à 10 km, Montreux à 1 km, Genève à 4 km et à Lugano à moins de 6 km. A l'étranger, le concept tunnel/galerie technique est parfois bien développé. On trouve également le chauffage à distance dans certaines galeries (Stockholm et Vienne). A noter que le refroidissement forcé par ventilation constitue un facteur potentiel de danger en cas d'incendie (propagation accélérée du feu).

Finalement en ce qui concerne les lignes aériennes pour des raisons esthétiques ou autres, il est observé une tendance à enterrer celles-ci [4]. Ce phénomène est accompagné par le fait que chaque liaison souterraine est en général plus longue que son équivalent aérien.

Figure 3 donne, par niveau de tension, un résumé des longueurs des lignes aériennes et souterraines. Longueur saisie et taux de saisie proviennent de [2]; les longueurs corrigées sont obtenues par le rapport longueur saisie/taux de saisie.

Types de liaisons	Air	Eau	Huile	Autres (N2, He, etc.)
Lignes aériennes	difficilement envisageable	non envisageable	difficilement envisageable	difficilement envisageable
Lignes souterraines	difficilement envisageable	envisageable	envisageable	envisageable
Tunnels, galeries techniques	envisageable	envisageable	envisageable	envisageable

Figure 2 Fluides caloporteurs pour une récupération forcée

Potentiel théorique de récupération

Pertes spécifiques et pertes calculées de puissance électrique

Les pertes spécifiques des liaisons électriques [kW/km] sont d'origines ohmiques et diélectriques. Les pertes ohmiques sont calculables par $\Sigma R_i I_i^2$ et dépendent fortement du profil de charge du réseau qui, a priori, n'est pas constant et pas donné. Pratiquement pour une liaison donnée, les pertes diélectriques sont constantes, relativement faibles comparées aux pertes ohmiques et ne dépendent pas du profil de charge.

Les pertes spécifiques (ohmiques et diélectriques additionnées) ont été calculées selon les niveaux de tension, en considérant pour une liaison donnée d'une part le courant admissible au conducteur et d'autre part un profil de charge théorique moyen et constant de 0,627. Les pertes globales de puissance électrique sont enfin calculées comme le produit des pertes spécifiques par les longueurs corrigées correspondantes et sont données en

Niveau de tension	Tension [kV]	Longueur saisie [km]	Lignes souterraines [km]	Lignes aériennes [km]	Taux de saisie [%]	Lignes souterraines corrigées [km]	Lignes aériennes corrigées [km]	Longueur totale [km]
BT	≦ 1	10 261	8 139	2 122	< 5	162 780	42 440	205 220
MT	10	2 442	1 526	916	33	4 624	2 776	7 400
MT	20	11 808	4 366	7 442	28	15 593	26 578	42 171
HT	50	4 142	521	3 621	75	695	4 827	5 522
HT	150	1 955	164	1 791	65	252	2 755	3 007
THT	220	4 771	33	4 738	100	33	4 738	4 771
THT	380	1 074	0	1 074	100	0	1 074	1 074
Total		36 453	14 749	21 704	15,54	183 977	85 188	269 165

Figure 3 Longueurs des liaisons électriques
BT basse tension
MT moyenne tension
HT haute tension
THT très haute tension

figure 4. Les pertes totales ainsi obtenues s'élèvent à 2016 MW et constituent de part l'hypothèse du courant maximum au conducteur, une valeur limite supérieure.

Pertes réelles de puissance électrique

Selon réf. [3], en 1990 la production totale brute et pertes de l'énergie électrique s'élèvent, respectivement, à 54074 et 3693 GWh. A ces deux énergies correspondent sur toute l'année (8720 h/an) des puissances électriques moyennes de 6201 et 423 MW.

Comparaison des pertes de puissance électrique

La comparaison entre pertes calculées et réelles de la puissance électrique indique un facteur de désaccord de 4,76 (2016/423), facteur tout à fait explicable par la considération, a priori, du courant maximum admissible du conducteur lors du calcul des pertes spécifiques.

En postulant, en absence de la connaissance exacte des profils réels de charge, que le courant réel moyen correspond à 50% du courant admissible au conducteur ($I_{réel} = 0{,}5\ I_{adm}$), les pertes calculées s'élèvent alors à 504 MW. Cette valeur calculée par notre modèle est proche et du même ordre de grandeur que la puissance réelle perdue de 423 MW.

Nous concluons que la méthode de calcul par les pertes spécifiques est cohérente et conduit à des résultats réalistes et acceptables. Par la suite, cette méthode est utilisée pour analyser les pertes en fonction des différents niveaux de tension des réseaux existants.

Energie potentielle réelle récupérable

Réseaux présentant une récupération potentielle

Pour des raisons d'ordre pratique et/ou technique, une récupération des pertes provenant des lignes aériennes et des réseaux BT (≦ 1 kV) n'est pas envisageable et ne sera plus considérée par la suite. Les pertes de puissance électrique provenant des réseaux souterrains et potentiellement récupérables, sont résumées en figure 5, colonne *A*. Différents facteurs pondérant la potentialité de récupération sont à considérer.

Efficacité de récupération

Dues à des irréversibilités thermodynamiques, la chaleur dissipée n'est pas récupérable à 100%. Ceci est notamment le cas pour les échangeurs de chaleur dont l'efficacité thermique est inférieure à 1. L'efficacité admise est comprise entre 80 et 90% (fig. 5, colonne *B*).

Réseaux

Une récupération pour les liaisons souterraines du type fourreau/fouille/caniveau n'est probablement pas rentable à grande échelle. La mise en œuvre des installations de récupération complexes et les modifications nécessaires des fourreaux influencent négativement la fiabilité et de par ce fait, risquent également d'influencer négativement les investissements.

La longueur cumulée des câbles souterrains par rapport aux câbles posés en galeries techniques n'est pas connu. Nous admettons les distributions suivantes:

- câbles MT : 10% du total souterrain
- câbles HT et THT : 20 à 30% du total souterrain (fig. 5, colonne *C*).

Niveau de tension	Tension [kV]	Lignes souterraines (tri-phasé) Pertes spécifiques [kW/km]	Lignes souterraines (tri-phasé) Pertes [MW]	Lignes aériennes (tri-phasé) Pertes spécifiques [kW/km]	Lignes aériennes (tri-phasé) Pertes [MW]	Total (tri-phasé) Longueur [km]	Total (tri-phasé) Pertes [MW]
BT	≦ 1	5	813	5	210	205 220	1 023
MT	10	8	37	8	22	7 400	59
MT	20	8	125	8	213	42 171	338
HT	50	20	14	20	97	5 522	111
HT	150	45	11	45	124	3 007	135
THT	220	60	2	60	284	4 771	286
THT	380	60	0	60	64	1 074	64
Total			1 002		1 014	269 165	2 016

Figure 4 Pertes spécifiques et pertes de puissance électrique

Niveau de tension	Tension [kV]	A Pertes réseau souterrain [MW]	B Efficacité de récupération [%]	C Part récupérable réseau souterrain [%]	D Facteur de densité [%]	E Facteur thermique [%]	F Facteur de simultanéité [%]	G Facteur global de récupération [%]	H Pertes récupérables [MW]
BT	≦1	–	–	–	–	–	–	–	0,00
MT	10	37	80	10	50	100	100	4,0	1,48
MT	20	125	80	10	50	100	100	4,0	5,00
HT	50	14	80	20	50	100	100	8,0	1,12
HT	150	11	90	30	50	100	100	13,5	1,49
THT	220	2	90	30	50	100	100	13,5	0,27
THT	380	0	90	30	50	100	100	13,5	0,00
Total									9,36

Figure 5 Pertes récupérables de puissance électrique (1990)

Coïncidence géographique (facteur de densité)

Il est estimé que seules les agglomérations à forte densité de population peuvent être prises en compte pour une éventuelle récupération de chaleur. La présence d'un réseau électrique doit coïncider avec la présence d'un utilisateur suffisamment important. Par manque de statistiques, nous admettons que tous les câbles souterrains se trouvent dans les agglomérations et que 50% de ces câbles coïncident avec la présence d'un utilisateur (fig. 5, colonne *D*).

Pertes thermiques (facteur thermique)

Pour des raisons de dissipation de l'énergie thermique dans l'environnement, il n'est pas possible de récupérer intégralement l'énergie électrique perdue. Bien que ces pertes thermiques existent et puissent être estimées (voir chapitre suivant), il est admis ici un facteur thermique de 100% (fig. 5, colonne *E*).

Simultanéité

Le profil de la consommation électrique et le profil de la consommation de l'énergie thermique ne se recouvrent pas entièrement (jour/nuit, semaine, saison, etc.). Le facteur de simultanéité tient compte de la superposition de ces deux profils. Néanmoins, dans notre cas, il est admis pour les puissances un facteur de simultanéité de 100% (fig. 5, colonne *F*). Par contre, pour la consommation énergétique de chaleur, nous comptabilisons une durée de 3000 h/an.

Pertes de puissance réelles récupérables

Le facteur global de récupération (fig. 5, colonne *G*) est le produit des facteurs $B \cdot C \cdot D \cdot E \cdot F$. Les pertes de puissance réelles récupérables sont données, selon les niveaux de tension, par le produit $A \cdot G$ (fig. 5, colonne *H*). Une puissance totale de 9,36 MW est trouvée; comme démontré plus haut, cette valeur doit être corrigée en tenant compte du courant réel moyen $I_{réel} = 0{,}5 \cdot I_{adm}$. La puissance totale réelle récupérable s'élève à $P = 2{,}5$ MW. Selon notre modèle, cette puissance représente un maximum.

Contraintes techniques

La récupération de chaleur dissipée est subordonnée à plusieurs contraintes techniques.

Niveau et pertes thermiques

La température maximale de sécurité admise autour des câbles est conditionnée par la température maximale de l'âme conductrice. Cette température peut selon les conditions de charge, se situer autour de 70 °C. Pour des câbles électriques en fourreau, un refroidissement forcé pourrait s'avérer nécessaire dans certains cas.

La température dans les tunnels et galeries techniques fluctue avec la température du terrain environnant.

Niveau de tension	Tension [kV]	A Pertes réseau souterrain [MW]	B Efficacité de récupération [%]	C Part récupérable réseau souterrain [%]	D Facteur de densité [%]	E Facteur thermique [%]	F Facteur de simultanéité [%]	G Facteur global de récupération [%]	H Pertes récupérables [MW]
BT	≦1	–	–	–	–	–	–	–	0,00
MT	10	37	90	20	50	100	100	9,0	3,33
MT	20	125	90	20	50	100	100	9,0	11,25
HT	50	14	90	30	50	100	100	13,5	1,89
HT	150	30	90	30	50	100	100	13,5	4,05
THT	220	30	90	40	50	100	100	18,0	5,40
THT	380	30	90	40	50	100	100	18,0	5,40
Total									31,32

Figure 6 Pertes récupérables de puissance électrique (2020)

Pour que l'application d'une pompe à chaleur (PAC) soit économiquement intéressante, il faudrait que la température ne descende pas en dessous de 15 à 16 °C.

Une partie de l'énergie électrique perdue est immanquablement dissipée sous forme de chaleur dans l'environnement et est, par conséquent, irrécupérable. Cette chaleur perdue dépend de 3 facteurs:

- Coefficient K de transmission de chaleur [W/m²°K]
- Surface F de l'enveloppe non isolée [m²]
- Différence de température ΔT entre la source et l'environnement extérieur [°K]

En considérant des dimensions géométriques et conditions de température réalistes, les pertes thermiques dissipées vers l'environnement s'élèvent, dans les cas de pose par fourreau et galerie, respectivement, à 2,0 et 3,4 kW/km. Ces pertes relativement importantes peuvent encore augmenter selon la valeur du produit $F \cdot \Delta T$. De ce fait, l'élévation de la température ambiante sera, en général, faible et ne dépassera pas 5 °C au-dessus de la température du terrain.

Il s'ensuit que la chaleur dissipée par les câbles (sauf cas exceptionnel) sera en général difficilement utilisable directement dans des échangeurs de chaleur, et qu'il sera nécessaire de recourir à une récupération indirecte par des pompes à chaleur. Une utilisation directe de l'énergie thermique pour le chauffage des piscines est ainsi pratiquement à exclure.

Lors de l'utilisation d'une pompe à chaleur pour le refroidissement d'une galerie, de part le fait que la perte de puissance électrique et donc de l'énergie thermique à évacuer varient avec la charge du réseau, il existe un danger de refroidir le milieu ambiant en dessous de la température du terrain environnant. Ceci conduirait à une inversion de flux thermique. Pour qu'une telle situation ne se présente pas, il sera nécessaire, dans des cas concrets dont les caractéristiques sont données, de procéder à des calculs précis.

Longueur minimale des galeries techniques

La longueur minimale utilisable d'une galerie technique est subordonnée d'une part aux pertes de puissance électrique et aux pertes thermiques d'autre part. Dans le cas par exemple du chauffage de 3 villas par une PAC, une puissance totale de 30 kW est nécessaire. De cette puissance, 10 kW sont fournis par le compresseur et 20 kW doivent provenir de la récupération de chaleur dans le tunnel ou galerie. La longueur de celle-ci avec un réseau MT (perte électrique de 8 W/m) doit être de 2500 m. Nous admettons qu'à partir d'une longueur $L = 1$ km, moyennant un transport électrique plus important, une exploitation pourrait être envisagée.

En 1990	Puissance [MW]	Energie [GWh]	Temps [h]
Puissance et énergie délivrées max.	9122	54074	
Valeurs délivrées moyennes	6201	54074	8720
Pertes de puissance calculées par les pertes spéc.	2016	–	–
Pertes de puissance calculées et pondérées par le courant moyen ($I_{réel} = 0{,}5 \cdot I_{adm}$)	504	–	–
Pertes techniques selon réf. [3]	423	3693	8720
Pertes réelles récupérables théoriquement	9,36	28	3000
Pertes réelles récupérables pratiquement	0,5–2,5	1,5–7,5	3000
Pertes récupérables/pertes totales	$(1-5)10^{-3}$	$(4-20)10^{-4}$	
Pertes récupérables/valeurs totales délivrées	$(0{,}8-4)10^{-4}$	$(2{,}8-14)10^{-5}$	
Villas à chauffer (Consommation: 30 MWh/an)	50–250		
Densité énergétique nécessaire	>10 W/m³		

Figure 7 Résumé des résultats clés

Section des tunnels ou galeries et densité énergétique

Les déperditions thermiques sont proportionnelles à la surface d'échange. En considérant une galerie type de 5 m² d'enveloppe et de 2 m² de section transversale, les déperditions sont de 3,4 W par mètre linéique ou de 1,7 W/m³. En supposant une dissipation électrique de 8 W/m, soit 4 W/m³ et par mètre linéique, la densité énergétique nette thermique n'est que de 2,3 W/m³. En considérant la longueur précédente $L = 1$ km, le volume de la galerie est $V = 2000$ m³, ce qui conduit à une puissance nette thermique de 4,6 kW. Ce résultat est très modeste.

Pour que l'on puisse rationnellement utiliser une longueur minimale de 1000 m, il faudrait au moins avoir une puissance de 20 + 3,4 = 23,4 kW. La densité énergétique nette devrait alors être de 23400/2000 = 11,7 W/m³. En conclusion pour qu'un tunnel ou galerie technique puisse être considéré pour une récupération de l'énergie dissipée, sa densité énergétique de dissipation devrait être de l'ordre de 10 W/m³ ou plus.

Energie utile récupérable des futurs réseaux

En admettant que la consommation de l'énergie électrique à l'encontre des dispositions légales, augmente de 100% dans les 30 années à venir et que la récupération soit plus efficace, un nouveau tableau, montré en figure 6, peut être établi.

Il est encore plus difficile et aléatoire d'établir des hypothèses pour les futurs réseaux que pour celui des réseaux existants. Les pertes de puissance ont été reprises de la figure 5 sauf dans le cas des réseaux THT dont la densité a été augmentée. Une puissance totale de 31,32 MW est trouvée qui doit aussi être corrigée par le facteur 0,25 tenant compte du courant réel moyen, soit finalement $P = 8$ MW. Cette valeur est environ 3 à 4 fois plus élevée que dans le cas des réseaux existants. De part les nombreuses hypothèses considérées et sur l'incertitude de l'évolution de la consommation électrique, nous hésitons à attacher une importance à ce chiffre.

Rentabilité et diagnostic

Certaines hypothèses utilisées dans la présente analyse ne sont pas vérifiables. Il est par conséquent difficile d'établir la rentabilité globale pour tout le potentiel de récupération. Un calcul économique tel qu'envisagé dans l'article en référence [1] qui se base sur un exemple concret et ponctuel de liaison électrique est à effectuer de cas en cas. Un résumé des

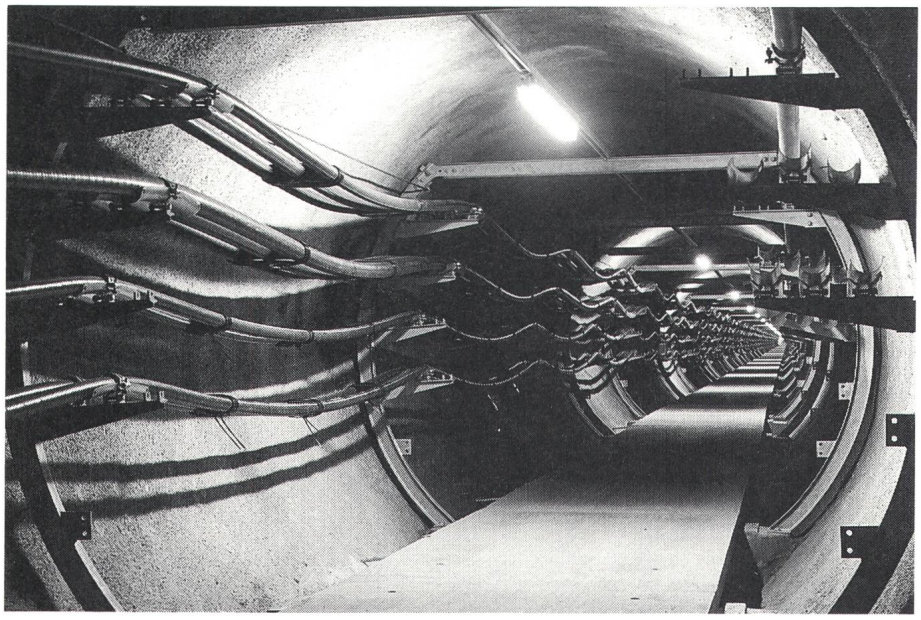

Figure 8 Câbles à isolation EPR 20, 60 et 150 kV installés dans une galerie technique
Exemple d'installation existante pour différents utilisateurs (Azienda Elettrica Ticinese AET; Aziende Industriali della città di Lugano AIL; les Chemins de Fer Fédéraux CFF)

résultats-clés de l'analyse est donné en figure 7. Seule une puissance maximum de 2,5 MW, soit 0,6% des pertes réelles de puissance électrique (ou encore 0,04% de la puissance moyenne délivrée), sont récupérables dans le meilleur des cas, ceci correspondant à 7500 MWh d'énergie réutilisable par an. Ces valeurs et pourcentages sont trop faibles pour pouvoir considérer cette «source de chaleur» comme exploitable économiquement à grande échelle. Par contre, une récupération de l'énergie dissipée est localement envisageable, si les conditions suivantes sont remplies:

- Longueur suffisante de galerie technique > 1000 m
- Une grande densité énergétique de dissipation > 10 W/m^3
- Plusieurs vecteurs énergétiques réunis dans une même galerie technique (transport électrique, chauffage à distance, etc.)
- Une coïncidence géographique et simultanéité doivent exister entre source de chaleur et utilisateur.

Mentionnons à titre d'exemple le cas de certaines jonctions électriques entre centrales productrices et réseaux où les conditions ci-dessus peuvent être satisfaites.

Une récupération de l'énergie dissipée n'est pas envisageable dans les cas suivants:

- Lignes aériennes et en fouille
- Réseaux BT dispersés.

Conclusions

La nécessité d'évacuer la chaleur dissipée par les câbles électriques est une évidence physique. Dans la plupart des cas, cette chaleur est directement transmise au milieu environnant. Les résultats quantitatifs de l'étude, accompagnés de considérations énergétiques et thermiques, conduisent aux deux conclusions suivantes:

I) Globalement, sur l'ensemble des réseaux électriques suisses existants, une récupération de la chaleur par refroidissement des câbles électriques n'est pas énergétiquement intéressante.

II) Localement, une telle récupération peut s'avérer intéressante pour autant que certaines conditions spécifiques soient remplies, notamment dans le cas où plusieurs vecteurs énergétiques seraient réunis en un même site. Une étude détaillée et spécifique devrait alors être conduite de cas en cas.

En guise de propositions quant à la suite de ce travail, certaines mesures pourraient être effectuées sur un site choisi existant afin de mieux cerner pratiquement les paramètres considérés dans l'étude.

Bibliographie

[1] *F. Gaille*: Récupération de la chaleur des câbles? Critères d'évaluation. Séminaire ETG, 6/7 mars 1990, EPFL, Lausanne.
[2] Statistiques de l'UCS sur les perturbations, UCS, Zurich, 1986.
[3] Statistique Suisse de l'électricité 1990, OFEN, Berne, 1991.
[4] *G. Bernard*: Enterrer plus de lignes électriques: mythe ou réalité? EDF, Epure, N° 22, avril 1989.
[5] *M. Hayashi et al.*: Development of water pipe cooling system for power cables in tunnels. IEEE trans., vol. 4, N° 2, April 1989.
[6] *W. Rasquin*: Einfluss der thermischen Kopplung bei Kabeln mit Eigenkühlung. etz Archiv Bd. 9, 1987.
[7] *E. Ball et al.*: UK requirements and future prospects for forced cooled cable systems. Proc. IEE, vol. 124, N° 3, March 1977.
[8] *S. Richter et al.*: Câble refroidi à l'eau pour le CERN. Le Trefile, N° 88, mars 1971.
[9] *K. Ogawa et al.*: Field test of 275 kV internally water cooled XLPE cable system. IEEE 88 WM 134-9, 1988.
[10] *C. Arkell et al.*: Conception et installation de câbles à refroidissement latéral par eau. Cigré 21-01, 1978.
[11] *W. Boone et al.*: Essais in situ de câbles à 400 kV à refroidissement latéral. Cigré 21-03.
[12] The calculation of continuous ratings for forced cooled cables. Cigré 21-08, March 1979.

Remerciements: La présente analyse a nécessité de nombreux contacts avec des représentants de plusieurs sociétés d'électricité afin d'établir l'état actuel de la situation. Nous avons pu nous appuyer sur l'expérience et la compétence de plusieurs spécialistes. Nous désirons vivement les remercier de leur collaboration. Nous tenons également à remercier tout particulièrement Monsieur *M. Levet* de l'UCS. Les dialogues très ouverts avec lui, nous ont fourni une aide précieuse et nous ont permis d'avancer substantiellement dans nos travaux.