



HAL
open science

Matériaux pour câbles haute tension de nouvelle génération

Thierry Auger

► **To cite this version:**

Thierry Auger. Matériaux pour câbles haute tension de nouvelle génération. La Revue 3E.I, 2022, 110. <hal-03861717>

HAL Id: hal-03861717

<https://hal.science/hal-03861717v1>

Submitted on 20 Nov 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Matériaux pour câbles haute tension de nouvelle génération

THIERRY AUGER

PIMM, Arts et Métiers, CNRS, CNAM, HESAM Université, 151 Blvd. de L'Hôpital 75013 Paris (thierry.auger@ensam.eu)

Résumé : Les câbles haute tension actuels font toujours l'objet d'une recherche active pour optimiser leur comportement. Résultat d'un compromis entre une plus grande résistance mécanique tout en gardant une résistivité la plus basse possible, les matériaux des câbles sont en constante évolution. On décrit ici la recherche sur quelques nuances d'aluminium (alliages à précipitation ou composites métal-métal).

Mots clés : câbles haute tension, alliages d'aluminium, précipitation, limite d'élasticité, résistivité

I. Introduction

Les pertes par effet Joule jouent un rôle majeur dans la capacité d'un matériau à conduire un courant électrique. La résistivité augmente linéairement avec la température et il y a donc lieu de limiter drastiquement la résistivité du matériau conducteur pour limiter l'échauffement induit par le passage du courant. Seuls quelques matériaux métalliques ont alors une résistivité suffisamment basse pour permettre une conduction efficace sous l'action d'un champ électrique (Voir Table 1). On peut voir que les conducteurs les plus efficaces sont dans l'ordre l'argent, puis le cuivre, l'or et l'aluminium.

	Argent (Ag)	Cuivre (Cu)	Or (Au)	Aluminium (Al)	Calcium (Ca)
ρ (10^{-9} $\Omega \cdot m$) à 300 K	16,29	17,25	22,71	28,33	34,5

Table 1 : Résistivité des métaux purs pour des températures entre 273 et 300 K ($10^{-9} \Omega \cdot m$)

Pour des raisons liées à la disponibilité de la matière, au poids et au coût (26000 tonnes de production mondiale pour l'argent en 2020), l'utilisation des trois premiers comme milieu conducteur est maintenant exclue. Le cuivre, toujours utilisé pour les câbles électriques basse tension, ne peut être aujourd'hui envisagé pour les câbles des lignes haute

tension à cause de son coût prohibitif. L'aluminium est donc utilisé quasi-exclusivement comme base pour ces câbles. La résistivité augmente de façon importante avec le taux d'impureté et il serait favorable pour le transport d'énergie de l'utiliser dans un état de pureté élevée. On peut alors écrouir l'aluminium (l'écrouissage, déformation plastique irréversible, provoque un durcissement mécanique) permettant d'atteindre une contrainte à rupture jusqu'à 160 MPa. Ce traitement ne suffit malheureusement pas à assurer des propriétés mécaniques satisfaisantes pour couvrir toutes les conditions de sollicitations qu'un câble peut rencontrer (surcharge de poids due au givre, vent important). Certaines implantations (notamment les câbles situés en montagne) subissent des conditions telles que le chargement mécanique peut approcher la contrainte à rupture en condition extrême. La solution de référence consiste à créer un câble bi-métallique avec une âme en acier galvanisé à très haute résistance mécanique recouvert d'un câblage torsadé en aluminium obtenu par co-extrusion via le procédé Conklad (Voir Figure 1).

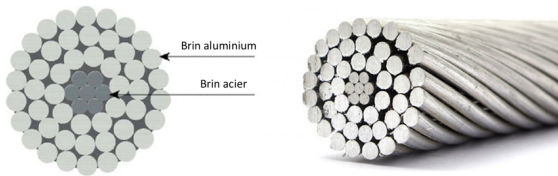


Figure 1 : section et vue globale d'un câble ACSR (Aluminum Conductor Steel Reinforced) [1].

Pour les zones géographiques les plus difficiles, l'aluminium pur est remplacé par un alliage d'aluminium plus résistant (Almélec) contenant de 0,6 à 0,8 % de magnésium et de 0,6 à 0,8 % de silicium. La présence de ces éléments se traduit lors des traitements thermiques initiaux par une précipitation de différents composés basée sur la séquence de précipitation du composé β -Mg₂Si (voir détails en section II). Les propriétés résultantes des matériaux de ces câbles sont données dans la table 2 ci-dessous :

Matériau	Module de Young (GPa)	Contrainte à rupture R _m (MPa)	Déformation max (%)	ρ (10 ⁻⁹ Ω.m) à 300 K
Aluminium	60	160	1%	28,33
Almélec	60	320 à 380	3%	36,6
Acier au carbone	185	1400	3%	150

Table 2 : Comparaison des propriétés des matériaux constituant les câbles conducteurs.

La comparaison entre l'aluminium pur et l'alliage Almélec indique que la résistivité et la résistance mécanique (R_m) sont antinomiques : un câble rendu plus résistant à la traction mécanique par précipitation sera moins conducteur. Cela résulte de la diffusion des électrons de conduction par les précipités nanométriques qui renforcent la microstructure. Le choix d'un matériau résulte alors d'un compromis entre la résistance mécanique et la conductivité électrique. Cette technologie est arrivée à maturité avec des produits bien établis comme l'alliage Almélec, un alliage d'aluminium de la série 6201.

L'augmentation attendue de la consommation électrique au niveau mondial met cependant ces solutions technologiques sous pression. Le développement des infrastructures de transport de courant requiert un accroissement de la part des transmissions à longue distance pour laquelle l'utilisation des câbles

bimétalliques n'est pas optimale. Des progrès sont souhaitables pour remplacer l'âme des câbles en acier par un câble tout aluminium qui soit renforcé sur le plan de la résistance mécanique tout en minimisant la résistivité pour limiter les pertes par effet Joule. C'est l'objet des développements récents sur le plan des matériaux que nous allons aborder dans les deux parties suivantes.

II. Renforcement des propriétés mécaniques par précipitation

En métallurgie, on distingue deux grandes classes d'alliages : les solutions solides et les alliages de stœchiométrie définie dont les intermétalliques sont la déclinaison pour les matériaux conducteurs. Dans le cas intermédiaire d'une solution solide concentrée, plusieurs phénomènes intéressants sont à noter comme la mise en ordre à courte distance ou la séparation de phase avec précipitation. Un des intérêts d'allier les métaux consiste à obtenir des améliorations importantes des propriétés d'usage (durcissement, amélioration de la corrosion ou de la résistance au frottement, etc.). On peut distinguer deux modes de renforcement mécanique d'un matériau :

- Le durcissement par solution solide : Les dislocations sont accrochées par les solutés et un durcissement important apparaît à des concentrations en soluté élevées (au-delà de quelques %). L'effet du soluté sur la résistivité devient cependant non négligeable et cette voie n'est pas utilisée (par exemple pour un alliage Al-Mg, Figure 2).

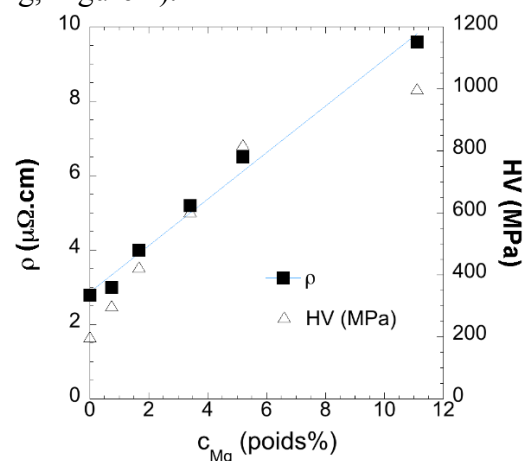


Figure 2 : évolution de la résistivité et de la dureté avec la teneur en élément Mg dans un alliage Al-Mg (adapté de [2]).

Par ailleurs, la solubilité dans l'aluminium d'autres métalloïdes fait qu'il ne s'allie que jusqu'à quelques % avec la plupart des éléments intéressants et donc dans la plupart des cas le durcissement obtenu sera limité.

- Le durcissement par précipitation :

Des précipités définis se forment lorsque la solubilité maximum pour un élément est dépassée (Figure 3) ; ces précipités constituent des obstacles pour le glissement des dislocations de la matrice.

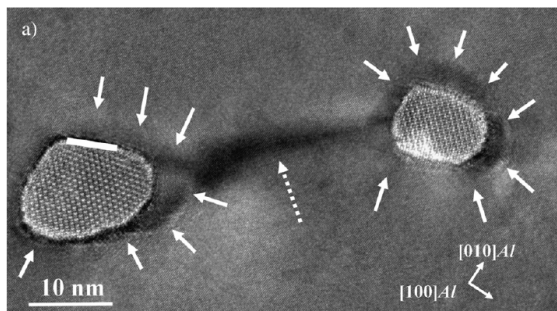
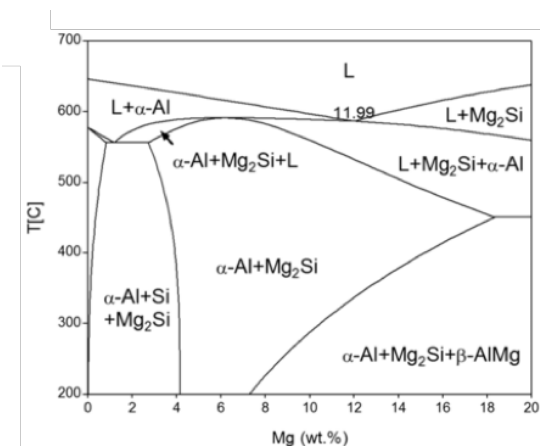


Figure 3 : Vue en microscopie électronique à transmission à haute résolution des précipités β' durcissant d'un alliage Al-Mg-Si [3].

Les précipités peuvent être soit cisailés soit contournés par les dislocations (voir Figure 4b) [5]. Quel que soit le mécanisme de contournement, un effet de durcissement important est alors obtenu au prix de la présence de sites diffusifs pour les électrons de conduction. L'effet sur la résistivité est alors proportionnel à leur fraction volumique.



a)

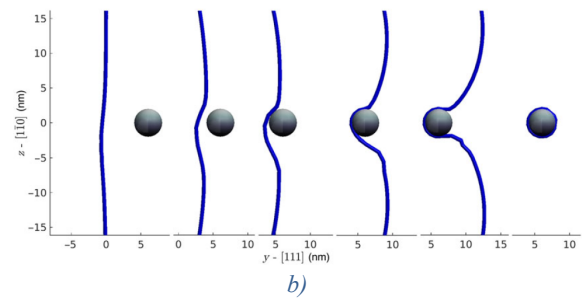


Figure 4 : a) Diagramme de phase Al-Mg-Si [4]. b) Mécanisme de durcissement par un précipité en dynamique des dislocations [5].

Les alliages Al-Mg-Si appartiennent au groupe des alliages qui se renforcent par la formation de précipités métastables au cours d'un traitement de recuit. Selon le diagramme de phase ternaire Al-Mg-Si (Figure 4a), l'état fondamental du système est une co-existence de la matrice d'aluminium avec le précipité Mg_2Si et ses précurseurs. La précipitation du magnésium et du silicium déplete (diminue de façon limitée) la concentration en soluté de la matrice et la résistivité retrouve des valeurs proches de l'aluminium. Selon certains facteurs comme la composition de l'alliage, la température de recuit, le temps de recuit, les précipités formés ont des structures atomiques différentes. La séquence de précipitation de l'alliage Al-Mg-Si peut être décrite par :

Amas atomiques \rightarrow zones de Guinier-Preston¹
 $\rightarrow \beta'' \rightarrow \beta' \rightarrow \beta (Mg_2Si)$

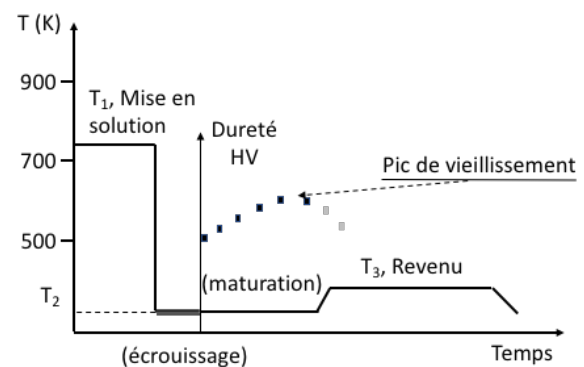


Figure 5 : Séquences des traitements thermiques d'un alliage d'aluminium.

¹ Une zone de Guinier-Preston est un précipité planaire du soluté qui crée une zone dure de franchissement par une dislocation

Une première séquence de précipitation se produit à la température ambiante et donne lieu à des conditions optimales de précipitation au bout de 4 h environ (pic de vieillissement, Figure 5). La microstructure contient alors généralement un grand nombre de précipités GP zones et de β'' fins et dispersés. C'est dans cet état intermédiaire de précipitation que l'effet durcissant est maximum.

Tous les précipités métastables se trouvent sous forme d'épingles, de lames ou de tiges et leurs plus grandes dimensions sont orientées le long d'une des trois directions cristallographiques de base de l'aluminium (Voir figure 6). La phase β' apparaît lorsqu'on applique à l'alliage un revenu complémentaire (T_3 , Figure 5).

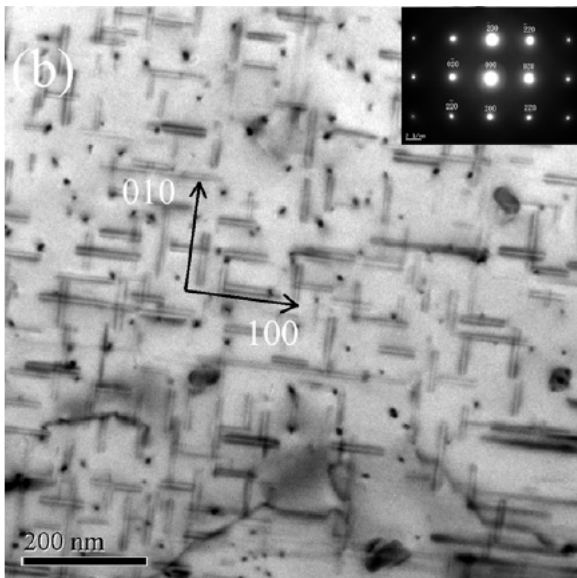


Figure 6 : Image en microscopie électronique en transmission de la précipitation d'un alliage renforcé par l'ajout de Zr, $190^{\circ}\text{C} \times 3\text{h} + 180^{\circ}\text{C} \times 50\text{h}$ [6].

Le matériau commercialement disponible sous le nom Almélec représente l'optimum pour cette stratégie d'alliage basée sur le système Al-Mg-Si. On peut voir dans la table 2 que la contrainte maximum à rupture atteint un niveau de l'ordre de 320 à 380 MPa (en fonction du traitement thermique). L'augmentation de résistivité induite par le schéma de précipitation est modérée puisque l'essentiel du magnésium et du silicium dissout se retrouve dans les précipités. Elle reste alors compatible avec une utilisation

pour le transport de courant. Il est malgré tout intéressant de tester d'autres compositions et d'autres microstructures.

L'ajout de Zr est une des voies étudiées pour améliorer les performances de ces matériaux tout en limitant l'effet sur la résistivité. Une optimisation intéressante des propriétés est ainsi obtenue par un meilleur contrôle de la microstructure et de la nature des précipités [6]. Des extensions de la durée de vie des câbles à 130°C par un facteur 4 ont pu ainsi être obtenues. Le rôle du Zr dans ces alliages se limite à permettre un affinage de la taille de grains sous la forme de précipités qui ancrent mieux les joints de grains et limitent la recristallisation du matériau.

Alliage	Dureté (Brinell)	Contrainte ultime (MPa)	Déformation max (%)	ρ ($10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$) à 300 K
Al-Mg-Si	72	220	14,7	31
Al-Mg-Si+Zr	83	265	20	31,9
Al-Fe-Si-Zr		226	4	29,5

Table 3: Effect of Zr content of Al-Mg-Si alloys on mechanical and electrical properties [6][7].

Des études sur le système Al-Fe-Si-Zr utilisent la formation de précipités nanométriques de type Al_3Zr avec un ordre chimique de type L1_2 [7]. L'amélioration en termes de propriété mécanique est faible mais le gain sur la résistivité du câble notable par une amélioration de la pureté de la matrice d'aluminium (il n'y a dans ce cas plus de magnésium résiduel en solution solide). Cette voie d'amélioration par une précipitation mieux maîtrisée et des traitements thermiques affectant la microstructure de façon encore plus fine continue de façon constante à faire progresser les propriétés des alliages d'aluminium.

On peut cependant remarquer que ces améliorations, bien que bienvenues, sont intrinsèquement incrémentales et ne permettent pas forcément d'envisager remplacer l'âme en acier d'un câble haute tension.

III. La voie des composites : Al-Ca

Une seconde voie prometteuse consiste en l'élaboration de composites métalliques d'un nouveau type. On peut d'abord remarquer que le calcium est le cinquième conducteur après l'aluminium. Une idée intéressante est de profiter de ce que dans le diagramme de phase Al-Ca (Figure 7), on observe en fait deux phases élémentaires immiscibles, l'aluminium et le calcium (à l'exception de précipités intermétalliques nanométriques qui se forment aux interfaces). La résistivité globale dépend alors de la fraction volumique de chacune des phases immiscibles. A cela s'ajoute des effets de textures très importants qui rendent la microstructure très anisotrope.

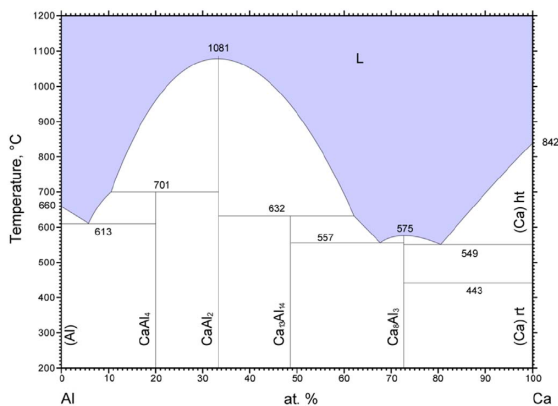
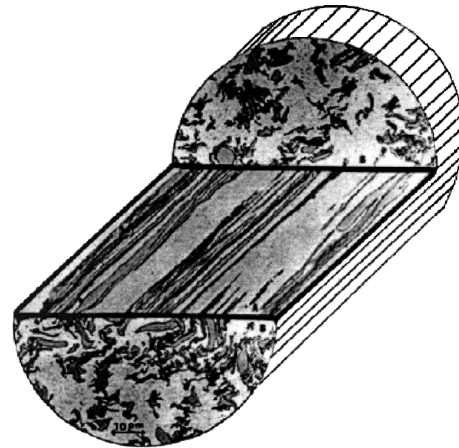


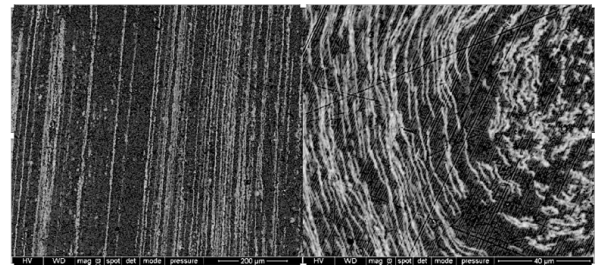
Figure 7 : diagramme de phase pour le système Al-Ca. ASM Diagram no. 1600365, Okamoto (2003) [8].

Cette nouvelle gamme de matériaux, nommée composites métal-métal, permet d'envisager à terme le remplacement du cœur en acier des câbles par un alliage beaucoup plus conducteur de l'électricité. L'obtention de ces matériaux se fait par des procédés d'extrusion ou de laminage sévères (déformation au-delà de 10 ou hyper-déformation) ce qui permet d'obtenir une microstructure de grains de calcium finement allongée orientée dans le sens de la conduction du courant (à l'image de ce que l'on peut obtenir pour le système Cu-Nb, Figure 8a). La résistivité est faiblement affectée par la présence d'une phase barrière de moindre conductivité puisque le câble acquiert alors une anisotropie dans la direction longitudinale (Figure 8b). En parallèle à l'obtention d'une résistivité relativement

faible, les propriétés mécaniques sont notablement améliorées.



a)



b)

Figure 8 : a) vue par coupe partielle de l'architecture obtenue par hyperdéformation sur un alliage Cu-Nb [9] b) Image en électron rétrodiffusé (BSE) de la microstructure (sens longitudinal et sens transverse) d'un alliage Al-20%Ca [10].

L'hyperdéformation que subit le câble permet d'affiner l'épaisseur des couches de calcium à des niveaux sub-microniques de l'ordre de 50 nm [11]. Les propriétés mécaniques obtenues sont très intéressantes puisqu'on observe presque un triplement de la contrainte ultime de traction pour une composition de type Al-20%Ca, soit bien plus que l'alliage Amélec, avec une résistivité significativement inférieure [10]. Les résultats sur trois compositions sont reportés dans la table 4 qui regroupe les performances des alliages Al-Ca pour une hyperdéformation d'environ 12. La contrainte ultime est très fortement augmentée par rapport à l'aluminium pur avec un accroissement très faible de la résistivité (encore une fois significativement en dessous à celle de l'Almélec). Il semble donc qu'il soit possible d'obtenir avec ce type de composites

métal-métal des performances mécaniques supérieures aux alliages standards tout en gardant la résistivité proche du plancher de l'aluminium.

Alliage	Contrainte ultime (MPa)	Déformation max (%)	ρ ($10^{-9} \Omega.m$) à 300 K
Al-9%Ca	197	16	30
Al-11,5%Ca	330	N.A.	31
Al-20%Ca	476	3	32

Table 4: Al-XCa% Maximum hardening and resulting electrical properties [10][11][12].

IV. Conclusion

Les câbles conducteurs, bien que très matures technologiquement, disposent encore d'une marge de progression importante qui vise à augmenter les propriétés mécaniques des alliages d'aluminium tout en limitant au minimum l'augmentation de la résistivité. Des améliorations sont possibles via des stratégies fines d'alliages avec le Zr notamment. En rupture avec ces améliorations incrémentales, une nouvelle génération de câbles basée sur la formation de structures composites métalliques ouvre des perspectives intéressantes pour le remplacement de l'âme du câble en acier par un matériau base aluminium avec des gains significatifs sur les pertes par effet Joule. Les recherches dans ce domaine sont donc toujours d'actualité.

Références bibliographiques

- [1] <http://www.hdcoverheadconductor.com/477-acsr-conductor/> (téléchargé en octobre 2022)
- [2] A. Gabera, N. Afify, S.M. El-Halawany, A. Mossad, Eur. Phys. J. AP 7 (1999) 103–109
- [3] K. Teichmann, C. D. Marioara, S. J. Andersen, K. Marthinsen, Materials Characterization 75 (2013) 1–7
- [4] X. Zhu, H. Yang, X. Dong, S. Ji, Journal of Materials Science 54 (2019) 5773–5787
- [5] I. Ringdalen, S. Wenner, J. Friis, J. Marian, MRS Communications 78 (2017) 1–8
- [6] W.H. Yuan, Z.Y. Liang, Materials and Design 32 (2011) 4195–4200

- [7] N. A. Belov et al., Metal Science and Heat Treatment, 54 (2012) 165-170
- [8] ASM-International, ASM Alloy Phase Diagram Database, Materials Park, OH, USA.
- [9] A. M. Russell, L. S. Chumbley, Y. Tian, Advanced Engineering Materials 2 (2000) 11-22
- [10] L. Tian et al., Materials Science & Engineering A 690 (2017) 348–354
- [11] L. Tian, H. Kim, I. Anderson, A. Russell, Materials Science & Engineering A 570 (2013) 106–113
- [12] C. F. Czahor, I. E. Anderson, T. M. Riedemann, A. M. Russell, Materials Science and Engineering 219 (2017) 012014