

Étude du comportement d'une roche volcanique en milieu alcalin

J.-S. GUÉDON-DUBIED
Docteur en géologie, ITPE

F. MARTINEAU
Technicien supérieur

Section Géologie, mécanique des roches et géotechnique
de l'environnement
Division de Mécanique des sols et des roches
et de géologie de l'ingénieur
Laboratoire central des Ponts et Chaussées

RÉSUMÉ

Les résultats présentés ici s'inscrivent dans un programme d'étude concernant la pétrographie appliquée à l'alcali-réaction. L'implication des granulats, tant du point de vue de leur nature que de leur proportion au sein d'une formulation de béton nécessite de mener une étude pétrographique précise accompagnée d'essais sur formules de béton. L'alcali-réaction peut se définir comme la réponse des minéraux des granulats du béton à un déséquilibre chimique avec le milieu ambiant faisant intervenir la solubilité de la silice lorsque l'on atteint des pH voisins de 13. Cette silice solubilisée combinée avec les alcalins du ciment, en milieu humide, peut donner naissance à des produits délétères préjudiciables à la pérennité des ouvrages.

La recherche de critères de réactivité passe par une étude fine au microscope optique polarisant avant la réalisation de tout essai de réactivité en milieu alcalin, de type stabilité dimensionnelle (suivant la démarche française des « Recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction »). Certaines divergences peuvent alors apparaître, elles ont été notamment constatées dans le cas d'une famille de roches riches en silice, contenant parfois une proportion vitreuse importante (les rhyolites).

MOTS CLÉS : 36 - Comportement - Roche - Volcanique - Granulat - Composition du mélange - Béton hydraulique - Ouvrage d'art (gén.) - Pétrographie - Essai - Microscope - Réaction (chim.) - Éprouvette - Base (chim.) - Rhyolite - Alcali-réaction.

Introduction

À l'occasion de la construction d'un ouvrage d'art, nous avons réalisé une étude pétrographique complète sur la roche sélectionnée pour constituer le granulat du béton, une rhyolite. Le diagnostic pétrographique étant délicat et les résultats des essais normalisés proches des seuils et divergents, nous avons mené des études expérimentales complémentaires, afin de reproduire le comportement de cette roche en milieu alcalin :

- un test classique de simulation du milieu liquide existant dans le béton par une solution alcaline à base de soude et d'eau de chaux ;
- un test que l'on pourrait qualifier de « naturel », utilisant une solution liquide interstitielle extraite d'une pâte de ciment au jeune âge.

Ces études ont montré :

- l'importance d'une étude microscopique fine (mais non classique), adaptée à la destination du granulat, qui quitte son milieu naturel pour être plongé dans un milieu alcalin et doit y demeurer le plus stable possible ;
- les avantages et inconvénients des simulations chimiques des solutions liquides interstitielles.

Le phénomène d'alcali-réaction

On a cru pendant longtemps que les granulats étaient chimiquement neutres dans le béton, jusqu'à ce qu'un phénomène d'expansion et de détérioration précoce du béton ait été identifié, en 1940, dans un ouvrage de Californie [1]. Depuis, le problème a été reconnu dans presque toutes les parties du monde. Toutefois, d'après un rapport de l'OCDE, l'alcali-réaction ne vient qu'au douzième rang sur une liste de seize causes de détérioration des ouvrages en béton. Elle doit néanmoins être prise très au sérieux car l'expansion qu'elle provoque dans les structures peut difficilement être stoppée.

L'alcali-réaction peut être définie comme la réponse des minéraux des granulats du béton à un déséquilibre avec leur milieu ambiant. Autrement dit, elle révèle une réactivité entre les granulats (ou plus exactement certains minéraux des granulats) et le liant, qui peut donner lieu à la formation de produits gonflants ayant la morphologie d'un gel. Cette réaction est favorisée par la teneur en ions alcalins disponibles, par le pH du milieu et par la solution interstitielle.

Lors de leur incorporation dans le béton, les granulats sont plongés dans un environnement hyperalcalin (pH voisin de 13), imposé par la portlandite mais aussi et surtout les alcalins, qui ne correspondent pas à leurs conditions de stabilité du milieu naturel dont ils sont issus. Il en résulte des réactions chimiques, qui peuvent être différentes suivant leur composition minéralogique.

La famille minérale la plus vulnérable en milieu alcalin est celle de la silice. Cette dernière correspond à la formule chimique SiO_2 , commune à de nombreux minéraux naturels, tant cristallisés qu'amorphes, comme le quartz, la tridymite, la cristobalite et l'opale. La solubilité de la silice amorphe augmente pour les pH supérieurs à 12 (fig. 1). La solubilité des autres minéraux est plus faible (fig. 2). Ceci implique qu'un granulat comportant de la silice amorphe présente un danger potentiel de libération de silice dans le béton. Cette silice solubilisée peut se combiner avec les ions alcalins et calcium du ciment pour constituer des produits pouvant prendre des formes variées, en particulier celle d'un gel contenant jusqu'à 600 % d'eau, ce qui lui confère des capacités de gonflement importantes.

L'alcali-réaction se déclenche lorsque la solution interstitielle contient simultanément de la silice facilement mobilisable et une solution interstitielle comportant des ions alcalins et de l'eau.

Les effets de cette réaction peuvent être atténués, voire annulés, en jouant sur ces trois facteurs. Pour cela, une méthodologie décrite dans le document « Recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction » [3] doit être mise en œuvre :

➤ l'apport en ions alcalins par les ciments peut être réduit tout en conservant les qualités mécaniques nécessaires ; une notion de seuil est introduite pour l'utilisation des granulats réactifs, la quantité d'ions alcalins totale autorisée incluant l'apport des ciments, des ajouts mais aussi des granulats ;

➤ l'eau disponible dans le milieu peut être réduite tout en conservant de bonnes conditions de maniabilité ;

➤ pour les granulats, la procédure utilisée pour déterminer la réactivité laisse une place prépondérante au diagnostic pétrographique, décrit dans le fascicule de documentation P 18-542 « Critères de qualification des granulats vis-à-vis de l'alcali-réaction » [4] et dont les principales phases sont décrites sur la figure 3.

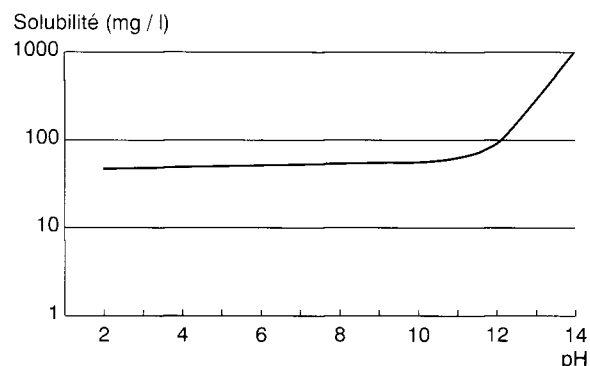


Fig. 1 - Solubilité de la silice amorphe en fonction du pH du milieu [2].

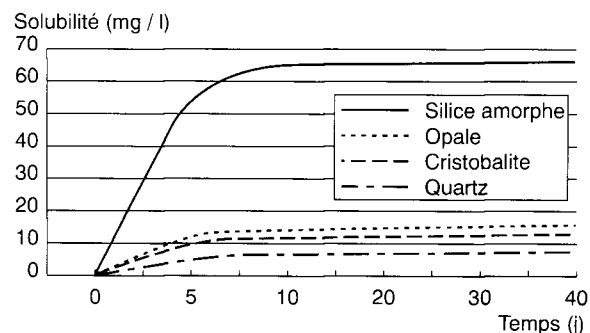


Fig. 2 - Dissolution des différentes formes de silice en fonction du temps [2].

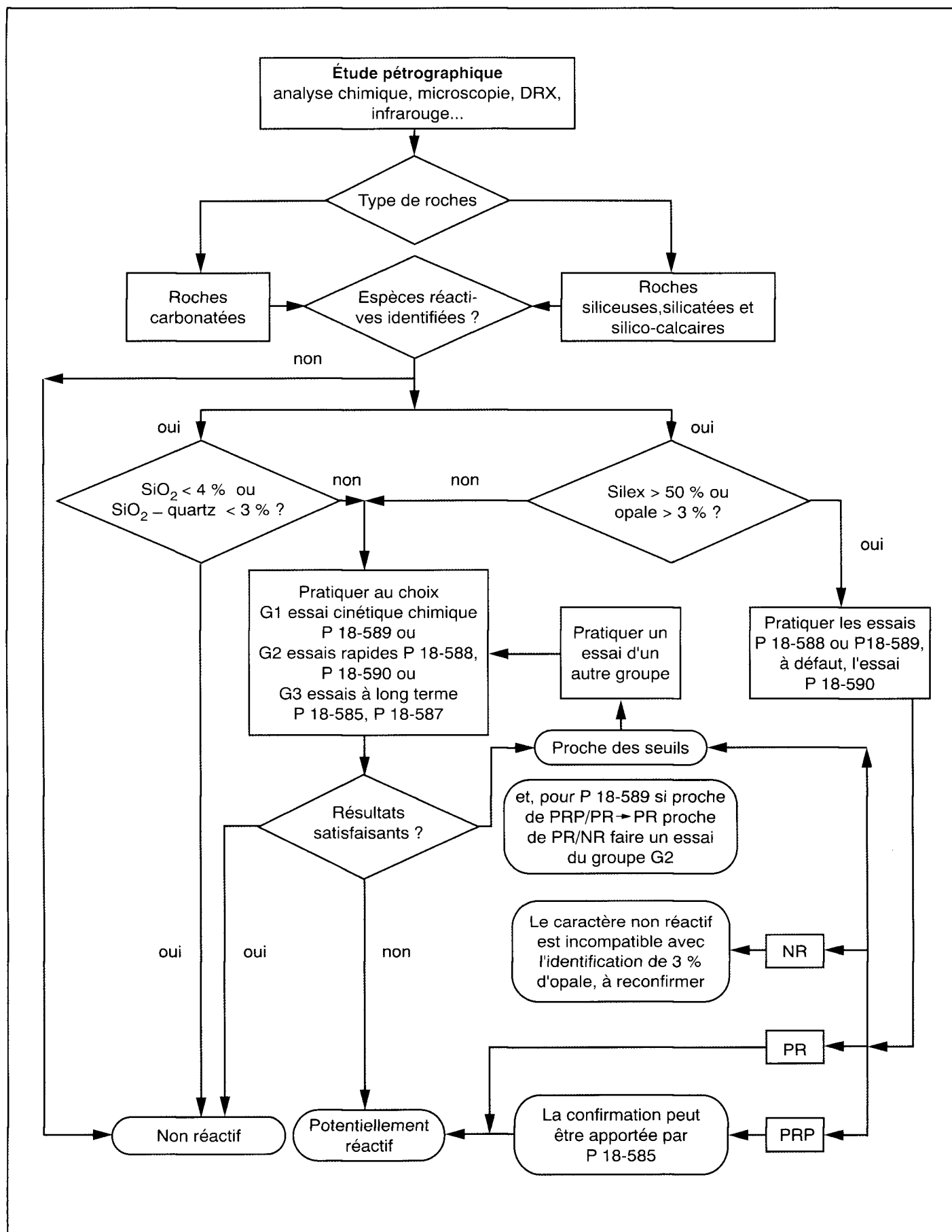


Fig. 3 - Caractérisation des granulats vis-à-vis de l'alcali-réaction selon le fascicule de documentation P 18-542 [4].

Étude pétrographique

L'examen pétrographique des granulats est indispensable à l'identification des espèces minérales susceptibles de provoquer des désordres dans le béton. En effet, les différentes espèces de silice se solubilisent différemment en milieu hyperalcalin, suivant leur nature plus ou moins cristallisée (fig. 2). La description de cette cristallisation ainsi que la quantité des espèces réactives sont des renseignements indispensables au diagnostic pétrographique orienté vers la prévention de l'alcali-réaction.

Le microscope optique polarisant est un outil indispensable pour ce travail car il permet de déterminer et de quantifier les espèces cristallisées aussi bien que les espèces amorphes (donc les plus réactives). Grâce à la rapidité de sa mise en œuvre et à son faible coût, ce microscope est l'outil de base du pétrographe. Les caractères optiques des minéraux étant étroitement liés à leurs propriétés chimiques et physiques, il est possible de les reconnaître dès lors qu'une préparation appropriée de l'échantillon a été réalisée. Les observations se font sur des lames minces de trente micromètres d'épaisseur, épaisseur nécessaire et suffisante pour rendre un matériau rocheux transparent aux rayons lumineux.

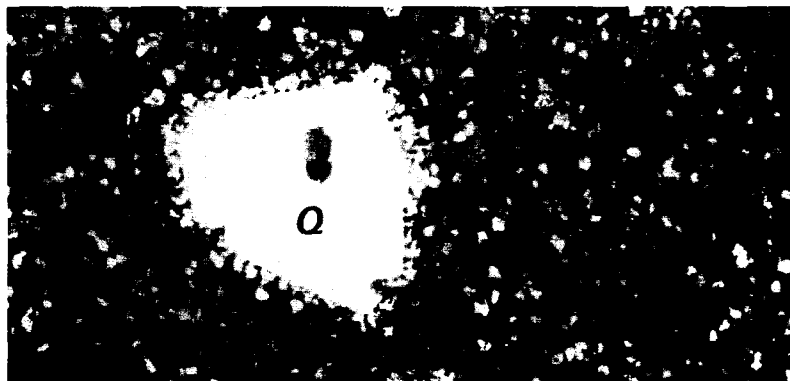


Fig. 4 - Cristal de quartz à auréole coronitique (Q).



Fig. 5 - Cristal de quartz (Q) sans auréole coronitique mais avec des golfes de corrosion.

La démarche de qualification des granulats vis-à-vis de l'alcali-réaction se fait en suivant le fascicule de documentation P 18-542 [4]. Ce document classe les granulats en trois catégories : non réactif (NR), potentiellement réactif (PR) et potentiellement réactif à effet de pessimum (PRP). Dans un granulat PRP, la proportion de silice réactive est située au-delà d'une plage de valeurs dites pessimales. Lorsque le granulat contient une proportion de silice suffisamment éloignée de cette plage, il ne se produit aucune réaction expansive.

Pour conclure sur la réactivité d'un granulat ou d'un mélange granulaire vis-à-vis des ions alcalins, on dispose de méthodes procédant par analyse pétrographique, par mesure de dissolution de la silice et par essais de stabilité dimensionnelle sur éprouvettes de mortier ou de béton. La procédure débute par une étude pétrographique et se poursuit par la réalisation d'essais dont le choix est régi par le diagnostic pétrographique.

Présentation de la rhyolite étudiée

La rhyolite a été choisie pour cette étude à cause de sa richesse en silice SiO_2 et des caractéristiques des cristaux de quartz qu'elle contient. Après un échantillonnage précis en carrière, deux faciès dominants ont été reconnus :

- un faciès rouge, où la matrice est composée de grains xénomorphes de 50 à 150 μm , quartzofeldspathiques et mal individualisés ;
- un faciès gris, où la matrice est composée de grains xénomorphes parfois arrondis, d'une cinquantaine de micromètres, sans phase vitreuse bien individualisée.

La composition minéralogique des phénocristaux (de 500 μm à plusieurs millimètres) est identique pour les deux faciès. Elle comprend :

- des feldspaths potassiques $[\text{Si}_3 \text{Al} \text{O}_8] \text{K}$ à sodi-potassiques automorphes, altérés en calcite,
- des feldspaths plagioclases $([\text{Si}_3 \text{Al} \text{O}_8] \text{Na} - [\text{Si}_2 \text{Al}_2 \text{O}_8] \text{Ca})$ automorphes altérés en calcite, incluant parfois des apatites,
- des chlorites, dont il persiste parfois un cœur de biotite, ou bien des reliques dans les clivages et qui peuvent aussi contenir de petites muscovites, des zircons ;
- ponctuellement, des vacuoles remplies d'épidote et de calcite.

La différence majeure entre les deux faciès se situe au niveau des cristaux de quartz. Dans le faciès rouge, les cristaux de quartz présentent des golfes de corrosion et une auréole coronitique dont l'épaisseur peut varier en fonction de la taille du cristal.

TABLEAU I
Résultats des essais réalisés sur les deux faciès de la rhyolite

Normes NF	P 18-587 [5]	P 18-588 [6]	P 18-590 [7]	P 18-589 [8]
Particularités de l'essai	Essai de stabilité dimensionnelle en milieu alcalin sur éprouvettes de béton	Essai de stabilité dimensionnelle en milieu alcalin sur micro-éprouvettes de mortier	Essai de stabilité dimensionnelle en milieu alcalin par autoclavage sur éprouvettes de mortier	Mesure de la dissolution de la silice
Fraction granulaire utile à l'essai	5 - 20 mm	0,160 - 0,630 mm	0,160 - 5 mm	0 - 0,315 mm
Temps de réponse	8 mois	3 jours	3 jours	3 jours
Résultats pour les deux faciès de la rhyolite	Non réactif pour les deux faciès	Réactif pour les deux faciès	Non réactif pour les deux faciès. Le faciès rouge présente une valeur proche du seuil de réactivité	Non réactif pour les deux faciès mais proche du seuil de réactivité

Cette auréole, constituée de micro-cristaux de quartz ayant une orientation cristallographique identique par rapport au cristal central, est bien visible lorsque l'on fait une observation en lumière polarisée analysée avec une lame teinte sensible : si le cristal central est de couleur jaune, les micro-cristaux de bordure sont tous jaunes (fig. 4). Cette auréole est visible autour de tous les cristaux de quartz observés dans le faciès rouge alors que, dans le faciès gris, seuls 6 % de ces cristaux possèdent une auréole (fig. 5).

La présence d'une auréole de micro-quartz semble créer un risque potentiel de réactivité pour ce faciès rouge, ce qui sera confirmé plus loin par les essais de variation dimensionnelle effectués séparément sur les deux faciès.

Dans un souci de bien cerner la réactivité de cette rhyolite, nous avons pratiqué tous les essais possibles dans le fascicule de documentation P 18-542 (ce qui n'est pas la démarche habituelle, puisque le diagnostic pétrographique sert justement à choisir l'essai le mieux adapté à la minéralogie de l'échantillon testé). Trois essais de variation dimensionnelle ainsi qu'un essai chimique ont donc été réalisés sur les deux faciès de cette rhyolite. Ils ont donné des résultats contradictoires et les valeurs obtenues sur le faciès rouge étaient systématiquement plus proches du seuil de réactivité que celles du faciès gris. Les résultats de ces essais sont rassemblés dans le tableau I.

Étant fermement convaincus de l'importance du diagnostic pétrographique et voulant contourner la subjectivité d'un tel diagnostic, nous avons recherché un test susceptible de révéler les potentialités de réactivité de ce granulat rhyolitique en le mettant dans des conditions de pH aussi proches que possible de celles qui existent dans le béton. Dans la bibliographie, de nombreux essais en milieu alcalin sont décrits, mais nous en avons imaginé un autre, qui a l'originalité d'utiliser la solution interstitielle d'une pâte de ciment comme milieu d'attaque, et non une solution fabriquée à partir de produits chimiques.

Essais de simulation du comportement de rhyolite en milieu alcalin

La libération de la silice à partir de granulats réactifs est considérée comme la première étape de la formation éventuelle d'un gel d'alcali-réaction susceptible d'induire des processus nuisibles pour le béton. La mise au point d'essais chimiques a été envisagée dès 1947 par Mielenz [9] et poursuivie depuis par l'établissement d'essais ayant conduit à des normes, comme la norme américaine ASTM C289 [10] et la norme française NF P 18-589 [8].

Bien que les processus de cette réaction soient complexes et que de nombreux mécanismes aient été décrits par différents auteurs, il semble que l'attaque d'un matériau siliceux en milieu alcalin commence par la rupture des groupements silanols puis des ponts siloxanes (grandement facilité par les défauts de cristallinités de la silice [11]), entraînant le passage de la silice en solution et la précipitation d'un composé siliceux amorphe plus ou moins gonflant. Le passage de la silice en solution et l'évolution de sa concentration en milieu hyperalcalin sont donc au cœur des recherches sur les mécanismes de cette réaction. Depuis de nombreuses années, des essais de simulation du comportement de granulats siliceux en milieu alcalin ont été menés et les recherches accordent généralement beaucoup d'importance à la concentration de la solution. La plupart des tests préconisent de travailler avec des solutions hyperalcalines de soude ou de potasse ou bien un mélange des deux bases, mais dans tous les cas un milieu très concentré (1N voire 2N). Certains tests sont menés en ne faisant intervenir que la soude, alors que le potassium est en proportion 4 à 5 fois supérieure à celle du sodium dans le ciment.

Nous avons abordé le problème de la façon suivante : les tests rapides de réactivité en milieu alcalin peuvent être conçus de deux manières différentes, résumées sur la figure 6.

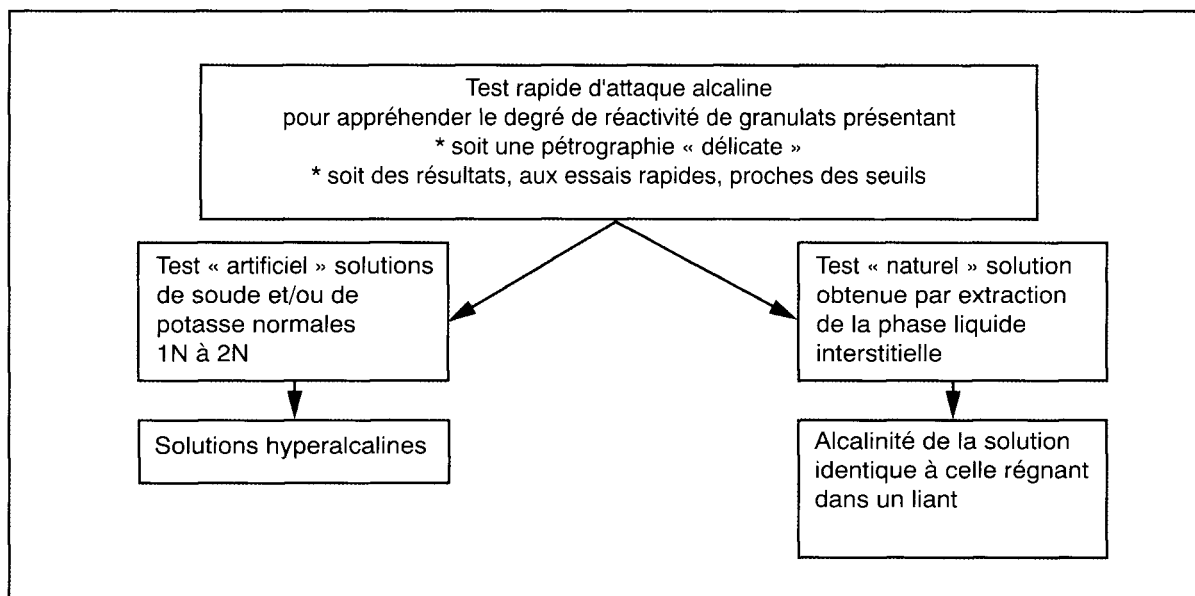


Fig. 6 - Classement des tests d'attaque alcaline.

Résultats d'attaque en milieu alcalin « artificiel »

Une attaque alcaline dans un mélange de soude 2N et d'eau de chaux a été réalisée par Richet [12] sur la rhyolite étudiée, pendant 72 heures, le résultat est présenté sur la figure 7. La section polie est recouverte d'un produit de réaction silico-calco-sodique présentant sur la quasi-totalité de sa surface des produits organisés.

En faisant varier le temps d'attaque, c'est-à-dire en le diminuant à 48 puis 24 heures, pour avoir moins de produits, on arrive à montrer que la réactivité des deux faciès de rhyolite est différente. Les produits de réaction commencent à se former dès 24 heures de cure alcaline sur le faciès rouge alors que, pour le faciès gris, il faut attendre

48 heures pour voir les produits commencer à se former. Néanmoins, on a l'impression que les morphologies les plus couramment observées sont tout de suite celles de produits organisés, sans que l'on voie nettement une phase moins organisée, qui pourtant est la plus répandue dans les ouvrages atteints d'alcali-réaction. Nous en avons déduit qu'il serait bon d'essayer de refaire ce même type d'attaque avec des solutions moins concentrées en alcalins et plus proches de la réalité pour voir si cette phase primaire de libération de la silice était susceptible d'apparaître. Nous avons donc choisi de nous placer dans un cadre plus « naturel » ? en mettant le granulat en présence d'une solution liquide interstitielle extraite d'une pâte pure de ciment, et donc représentative des concentrations des différents cations présents.

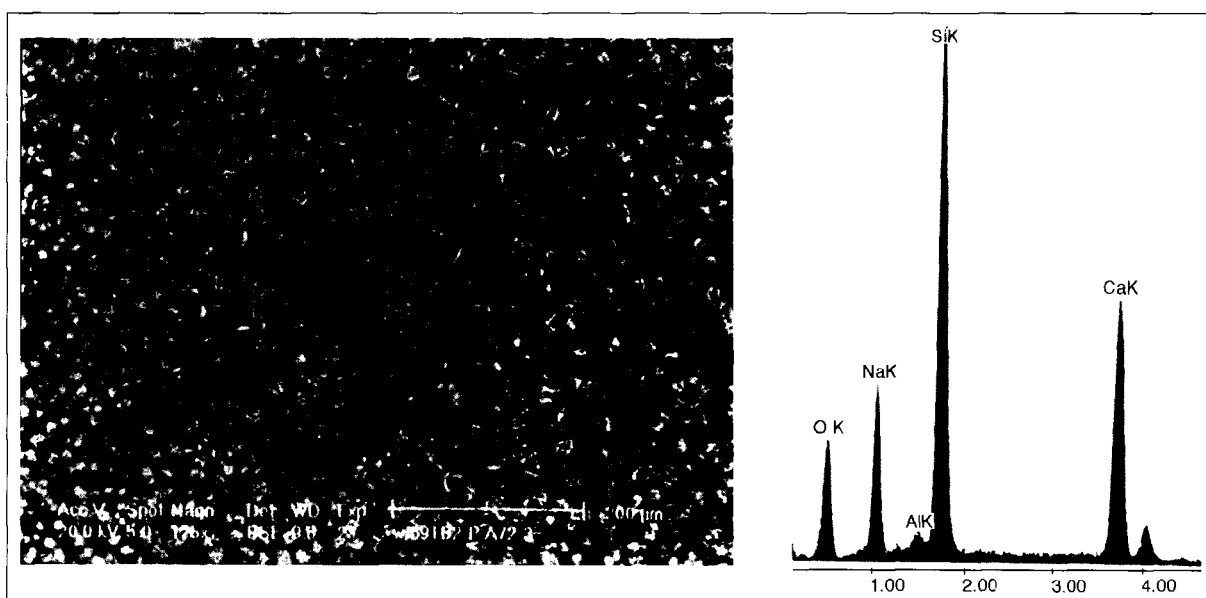


Fig. 7 - Produits développés à la surface de la section polie de rhyolite à l'issue d'une attaque à la soude 2N pendant 72 heures. Observations réalisées au microscope électronique à balayage.

TABLEAU II
Composition et propriété du béton frais

Échéances	SiO ₂ (mg/l)	CaO (mg/l)	Na ₂ O (mg/l)	K ₂ O (mg/l)	pH
1 heure	17,3	360,7	1 451	16 495	13,1
3 heures	21,8	447,9	1 572	17 177	13,1
5 heures	29,3	525,4	1 965	18 229	13,2
1 jour	27,1	135,9	3 391	19 913	13,7
7 jours	17,2	66,7	4 113	21 939	13,7
14 jours	17,1	52,0	4 712	15 500	13,7
28 jours	—	59,9	4 872	19 700	13,8
60 jours	—	50,5	4 560	21 770	13,8

Extraction de la phase liquide interstitielle d'une pâte de ciment

La quantité d'eau ajoutée initialement au mélange de granulats et de ciment pour obtenir un béton d'ouvrabilité convenable est toujours supérieure à la quantité d'eau nécessaire à l'hydratation complète de tout le ciment anhydre utilisé. Il existe donc à l'intérieur du béton une phase liquide appelée « solution interstitielle ». Pour extraire cette solution, nous avons utilisé la méthode mise au point par Longuet [13] qui consiste à comprimer une pâte pure durcie à l'aide d'une presse de forte capacité et à récupérer la solution qui sort. C'est cette solution que nous avons utilisée comme milieu d'attaque pour la rhyolite. Deux presses différentes ont servi au cours de cette étude, menée successivement par Laporte [14] et Borget [15] :

- une presse de petite capacité (12,5 t) pour les courtes échéances (1, 3 et 5 heures) ;
- une presse de grande capacité (500 t) pour les échéances plus longues (1, 2, 5, 7, 14, 28 et 60 jours).

Sur ces deux presses s'adapte une chambre de compression d'éprouvette qui permet de récupérer le liquide s'écoulant lors de la mise sous pression. Un système de filtration directement adapté à la sortie du flacon évite l'entraînement du solide dans ce dernier et le contact avec le gaz carbonique de l'air est limité au maximum. L'échantillon soumis à l'essai est une pâte pure (obtenue à partir d'un ciment à 1,1 % en Na₂O_{équivalent}) gâchée à l'eau distillée, avec un E/C de 0,6, mise en cure à 38 °C et 100 % d'humidité relative pendant 5 heures.

Pour choisir le moment auquel se fait l'extraction de la solution liquide interstitielle, nous avons pris en compte plusieurs facteurs : la facilité de la compression et une durée aussi courte que possible, sans oublier le besoin d'obtenir des concentrations représentatives des différents éléments indispensables. Un délai de 5 heures a été retenu,

pour ne pas avoir à mettre en œuvre la presse de 500 t et conserver un essai de réalisation facile.

Le tableau II résume les résultats des analyses effectuées sur les solutions interstitielles prélevées sur pâte pure à différentes échéances.

Ce tableau montre que la concentration de la solution obtenue en ions alcalins (à 5 heures) est d'environ 0,4N, ce qui est inférieur à la valeur de 0,7N habituellement admise pour les liquides interstitiels circulant dans un béton d'ouvrage mais nettement moins que les 1N ou 2N de certains tests de simulation « artificiels ».

Au bout de cette période de 5 heures, l'échantillon de ciment est démoulé et introduit dans la cellule d'extraction pour y être comprimé. Une fois l'extraction effectuée, la solution est récupérée et sert immédiatement à noyer des sections de roches préalablement polies, qui seront conservées dans des flacons en Téflon, dans une enceinte à 80 °C pendant 48 et 72 heures, temps retenus pour l'attaque alcaline.

Résultats de l'attaque alcaline « naturelle »

À 48 heures, on constate qu'une fine pellicule de silice s'est déposée à la surface de la section polie (fig. 8), correspondant probablement au début du passage en solution de la silice après rupture des ponts siloxanes.

À 72 heures, on voit nettement une sorte de réseau composé d'amas de composition siliceuse prédominante (accompagnée d'un peu de potassium) et dont la densité est plus importante sur le faciès gris que sur le faciès rouge (cette observation concorde avec les résultats du test « artificiel ») (fig. 9).

Cette germination est beaucoup plus intense si l'on pratique le même test sur un granulat très réactif de nature quartzitique : au bout d'un temps d'attaque de 72 heures, on obtient une quantité plus importante de produits (fig. 10).

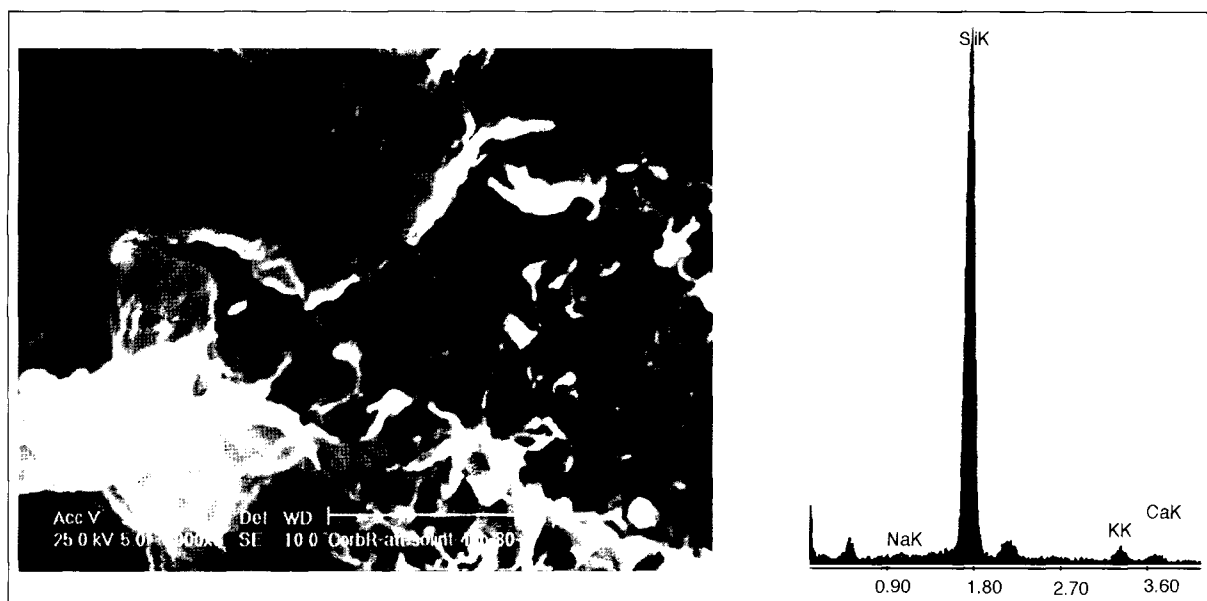


Fig. 8 - Pellicule siliceuse partielle développée à la surface de la section polie de rhyolite après 48 h d'attaque dans une solution issue de l'extraction du liquide interstitiel d'une pâte de ciment.

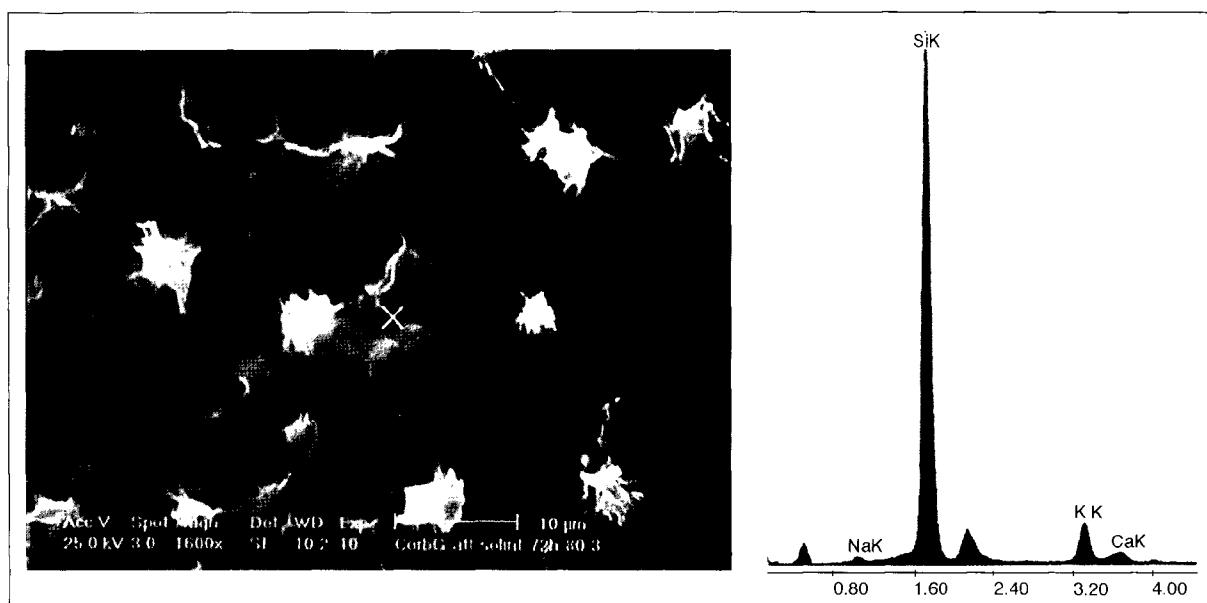


Fig. 9 - Réseau silico-potassique en cours de développement à la surface de la section polie de rhyolite après 72 h d'attaque dans une solution issue de l'extraction du liquide interstitiel d'une pâte de ciment.

Ces observations permettent de classer la réactivité des deux faciès de la rhyolite et d'avoir une idée de la plus ou moins grande réactivité associée à une pétrographie différente des cristaux de quartz (entourés ou non d'une auréole coronitique). Elles permettent aussi de déterminer, en fonction de la quantité de produit qui a pris naissance à la surface des sections polies, la cinétique de la réaction : la rhyolite a une cinétique plus lente que le granulat quartzitique très réactif testé (fig. 10).

Compte tenu des dosages chimiques effectués sur les solutions d'attaque utilisées, avant et après les tests, et en accord avec le travail

d'Adrover [16], le schéma général suivant peut être proposé pour décrire les phénomènes occasionnés par cette attaque alcaline « naturelle » :

- dissolution rapide de la matrice dans les premières 48 heures, avec augmentation de la teneur en silice de la solution d'attaque ;
- germination et précipitation d'embryons cristallins par sursaturation ;
- croissance progressive de produits organisés et ralentissement de la vitesse de passage de la silice en solution, pour atteindre une concentration voisine de celle d'un état stationnaire.

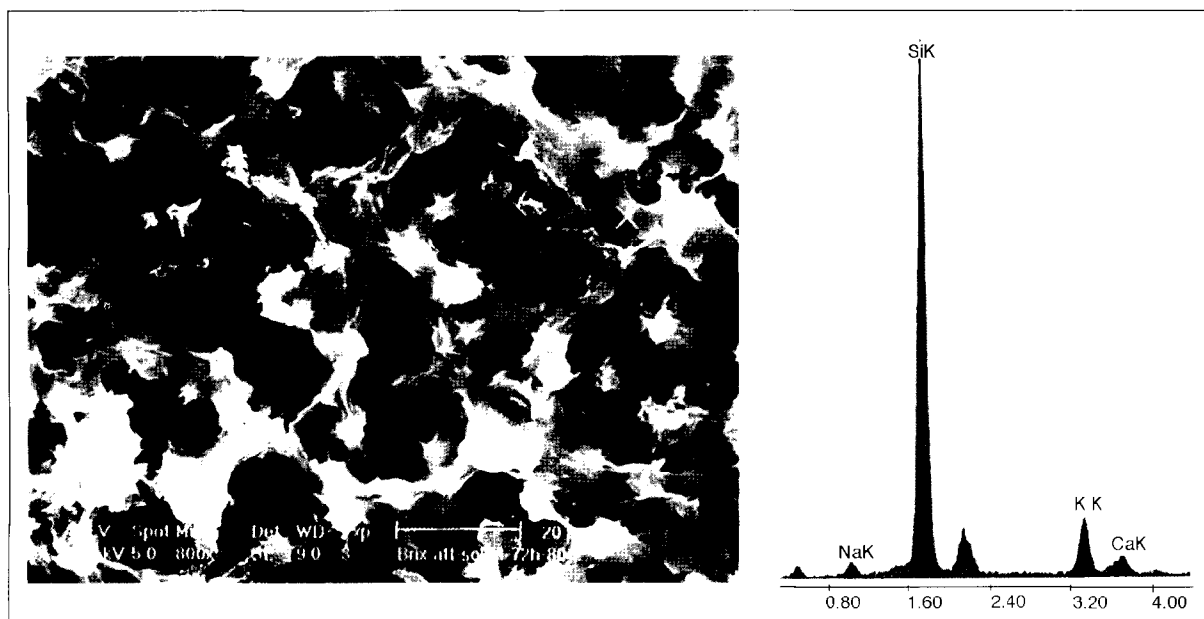


Fig. 10 - Classement des tests d'attaque alcaline.

Conclusions

Il ressort de ces essais que l'utilisation d'une solution liquide interstitielle comme solution d'attaque donne des indications sur la réactivité de certains matériaux ayant une pétrographie « délicate ». Elle permet de les différencier en fonction d'un degré de réactivité qui semblait, jusque là, être une notion empirique. En effet, on a beaucoup écrit dans la littérature que la rhyolite était une roche à cinétique lente sans pouvoir vraiment le prouver. L'exécution d'essais de

durées différentes a permis de montrer qu'en effet cette roche commençait à réagir à un moment où d'autres roches ont déjà développé des produits de réaction. Cette méthode s'avère, de plus, suffisamment fine pour différencier deux faciès pétrographiquement proches issus d'une même carrière. Notons enfin que, pour valider ce test, une roche non réactive a été soumise à ce protocole : la structure de la roche a été modifiée morphologiquement mais pas chimiquement en surface et sans que des produits de réaction s'y soient développés.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] STANTON T.E. (1943), Studies to develop an accelerated test procedure for the determination of adversely reactive cement-aggregate combinations, *ASTM Proceedings*, **43**, 875.
- [2] LE ROUX A., THIEBAUT J., GUEDON J.-S., WACKENHEIM C. (1999), *Pétrographie appliquée à l'alcali-réaction*, Collection « Études et Recherches des LPC », 98 pages, Édition LCPC.
- [3] LCPC (1994), « *Recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction* », 51 pages.
- [4] AFNOR (1994), Fascicule de documentation **P 18-542** : *Granulats naturels courants pour bétons hydrauliques*.
- [5] AFNOR (1990), Norme **P 18-587** : Granulats : Stabilité dimensionnelle en milieu alcalin - essai sur béton.
- [6] AFNOR (1991), Norme **P 18-588** : Granulats : Stabilité dimensionnelle en milieu alcalin - essai accéléré sur mortier MICROBAR.
- [7] AFNOR (1993), Norme **P 18-590** : Granulats : Stabilité dimensionnelle en milieu alcalin - essai accéléré sur mortier par autoclavage.
- [8] AFNOR (1992), Norme **P 18-589** : Granulats : Réactivité potentielle de type alcali-silice et alcali-silicate - test cinétique, méthode chimique.
- [9] MIELENZ R.C., GREENE K.T., BENTON E.J. (1947), Chemical test for reactivity of aggregates with cement alkalis; chemical process in cement aggregate reaction, *Journal of the American Concrete Institute*, **19**, 3, pp. 193-221.
- [10] ASTM (1987), Standard Test Method C 289 - Potential reactivity of aggregates (chemical method).
- [11] DENT GLASSER L.S., KATAOKA N. (1981), The chemistry of « alkali-aggregate » reaction, *5th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, Cape Town, South Africa, paper 252/23.
- [12] RICHET I. (1995), Mise en évidence du risque alcali-réaction par des méthodes pétrographiques d'attaques sélectives et évaluation de la cinétique de la réaction, Rapport de stage de DESS, université d'Orsay Paris XI.

- | | |
|---|--|
| <p>[13] LONGUET P. et al. (1973), La phase liquide du ciment hydraté, <i>Revue des Matériaux de Construction</i>, 676, pp. 35-41.</p> <p>[14] LAPORTE F. (1994), <i>Influence des additions minérales sur la composition de la phase liquide interstitielle de mortiers en relation avec la réaction alcali-silice</i>, Rapport de stage de DESS, université d'Orsay Paris XI.</p> | <p>[15] BORGET F. (1996), <i>Étude de deux additions minérales dans des mortiers à base de quartzite et de leurs influences sur la réaction alcali-granulat par l'analyse des solutions interstitielles</i>, Rapport de stage de maîtrise, université d'Orsay Paris XI.</p> <p>[16] ARDOVER V. (1995), <i>Contribution à l'étude de l'attaque de minéraux et de roches par des solutions hyperalcalines</i>, Thèse de doctorat, 256 pages.</p> |
|---|--|

ABSTRACT

Study of the behaviour of a volcanic rock under alkaline conditions

J.-S. GUÉDON-DUBIED, F. MARTINEAU

The results presented here were obtained in the context of a programme of petrography research into the alkali-silica reaction. Examining the role played by aggregate particles in a concrete mix, both as a result of their nature and quantity, demands a precise petrographic study together with tests using different concrete formulations. The alkali-silica reaction can be defined as the response of the minerals in the concrete to a chemical disequilibrium, with the ambient conditions leading to the silica to become soluble when a pH of about 13 is reached. Under moist conditions the dissolved silica can react with the alkalis in the cement and produce harmful substances which shorten the life of structures.

The attempt to identify reactivity criteria involves a detailed study with a polarizing optical microscope prior to the conduct of reactivity tests under alkaline conditions of the « dimensional stability » type (as laid down in the French document « Recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction »). This revealed some differences, particularly in the case of rhyolites, which are a group of rocks with a high content of silica and occasionally glassy material.

Torsion des câbles de téléphérique

Jacques DUBUISSON

Docteur de l'Institut national polytechnique de Grenoble

Service technique des remontées mécaniques

RÉSUMÉ

Le Service technique des remontées mécaniques assure, depuis 1987, un programme d'études et de recherches des phénomènes de torsion des câbles de téléphérique pour lequel une importante machine d'essais a été réalisée.

L'étude de l'équilibre en moment d'une portée de câble entre deux appuis montre que des déformations en rotation et en allongement sont associées au moment de torsion constant du câble.

Les études expérimentales et théoriques des contraintes des fils des câbles tracteurs des cabines de téléphériques montrent que des contraintes de flexion et de cisaillement, associées à la torsion du câble, s'ajoutent à la contrainte de traction habituellement prise en compte.

La résistance au glissement des attaches des véhicules des télésièges et des télécabines sur le câble porteur-tracteur s'oppose au poids du véhicule et au moment de torsion du câble. Une méthode de calcul du moment de torsion du câble porteur-tracteur et sa validation expérimentale sont en cours de réalisation.

MOTS CLÉS : Câbles - Torsion - Traction - Fil - Contrainte - Pylône - Moment (mec.) - Equipement - Résistance au glissement -/ TAD = téléphérique.

Introduction

Les câbles tracteurs des cabines des téléphériques et les câbles porteurs-tracteurs des télésièges et des télécabines sont composés de six torons de plusieurs dizaines de fils reposant sur une âme centrale.

Ces câbles utilisés sur de grandes dénivellations sont soumis à des phénomènes de tension parfaitement connus depuis environ trente-cinq années [1] et des phénomènes de torsion, étudiés principalement en Autriche et en Suisse [2].

Le Service technique des remontées mécaniques assure, depuis 1987, un programme d'études et de recherches des phénomènes de traction et de torsion des câbles de téléphérique, pour lequel une importante machine d'essais a été réalisée [3].

Après une description succincte des câbles de téléphérique et une présentation de l'étude de l'équilibre mécanique en traction et torsion d'une portée de câble, deux études en cours sont exposées.

L'une concerne les contraintes des fils associées à la torsion des câbles tracteurs des cabines des téléphériques, l'autre concerne le moment de torsion des câbles porteurs-tracteurs qui, en plus du poids du véhicule, sollicite la résistance au glissement des attaches des véhicules des télésièges et des télécabines.

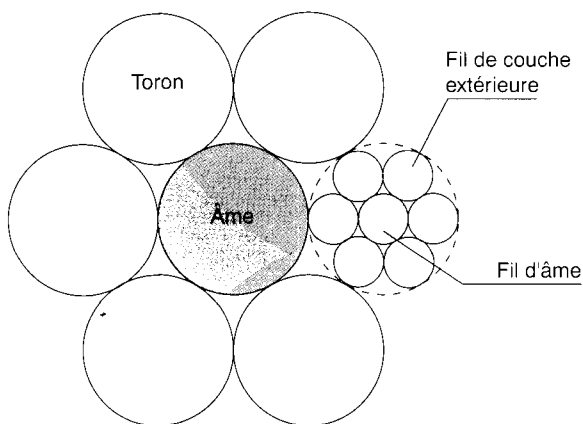


Fig. 1 - Section transversale d'un câble de 6 torons à 7 fils.

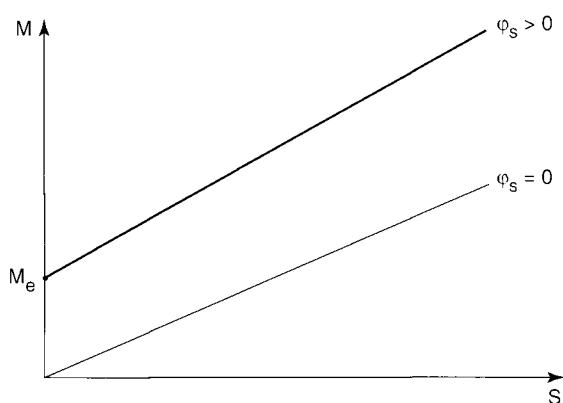


Fig. 2 - Schématisation du comportement d'un élément de câble en traction et en torsion.

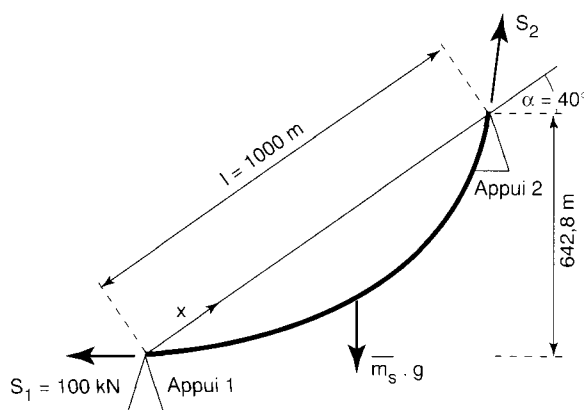


Fig. 3 - Schématisation d'une portée de câble entre deux appuis.

Description et comportement mécanique des câbles de téléphérique

Autour d'une âme centrale, sont enroulés six torons préformés sous la forme d'une hélice circulaire droite caractérisée par son pas de câblage.

Les torons sont composés d'une à quatre couches de fils préformés et enroulés autour d'un fil d'âme sous la forme d'une hélice circulaire droite caractérisée par son pas de toronnage.

En règle générale, les câbles de téléphérique sont de type parallèle ou Lang, c'est-à-dire que le signe de l'angle de câblage est identique au signe de l'angle de toronnage.

Un exemple d'une section transversale d'un câble est représenté sur la figure 1.

L'âme en matériau synthétique est soit câblée à partir de très nombreuses fibrilles, soit constituée d'un seul cylindre homogène et compact.

Les fils sont en acier, dont la résistance à la rupture peut varier entre 1 420 et 1 960 MPa et l'allongement à la rupture de 1,9 à 1 %.

Compte-tenu de sa structure en hélice, un élément de câble, tendu entre deux points de fixation où sa rotation est empêchée, développe un moment de torsion interne M proportionnel à la tension S [4].

$$M = C_s \cdot d \cdot S \quad (1)$$

où :

C_s est le coefficient constant associé à la tension, d est le diamètre du câble.

À tension nulle, ce moment de torsion interne peut être augmenté ou diminué par l'action d'un moment supplémentaire extérieur M_e , associé à la rotation φ_s d'une des extrémités de l'élément de câble [4].

$$M_e = \bar{C}_\theta \cdot G \cdot d^4 \cdot \frac{\varphi_s}{l_s}$$

où :

\bar{C}_θ est le coefficient constant associé au vrillage ou au dévrillage,

G est le module de cisaillement du matériau des fils du câble,

l_s est la longueur de l'élément de câble.

Pour une tension et une rotation données, le moment de torsion interne est une combinaison non linéaire des effets de la tension S et de la rotation φ_s d'une des extrémités de l'élément de câble [4].

$$M = C_s \cdot d \cdot S + C_s \cdot d \cdot \frac{\lambda_0}{2\pi} \cdot S \cdot \frac{\varphi_s}{l_s} + \bar{C}_\theta \cdot G \cdot d^4 \cdot \frac{\varphi_s}{l_s}$$

où :

λ_0 est la longueur du pas de l'hélice des fils extérieurs des torons du câble à l'état initial.

Le comportement d'un élément de câble en traction et en torsion, à l'état initial où $\varphi_s = 0$ et à l'état vrillé où $\varphi_s > 0$, est schématisé sur la figure 2.

Équilibre d'une portée de câble entre deux appuis

Considérons la portée de câble schématisée sur la figure 3.

Équation d'équilibre en tension

Le fondement physique de cet équilibre est très connu [1] et l'équation correspondante ne nécessite aucune présentation particulière.

$$S_2 = S_1 + q \cdot x \quad \text{avec} \quad q = \bar{m}_s \cdot g \cdot \sin \alpha$$

où :

S_1 est la tension du câble à l'appui 1,

S_2 est la tension du câble à l'appui 2,

x est l'abscisse suivant la corde,

\bar{m}_s est la masse linéique du câble,

g est l'accélération de la pesanteur,

α est la pente de la corde par rapport à l'horizontale.

Équation d'équilibre en moment

La tension du câble à l'appui amont S_2 est supérieure à la tension du câble à l'appui aval S_1 . Compte-tenu de ce que la rotation du câble est empêchée aux deux appuis, suivant l'équation (1) le moment appliqué au câble à l'appui amont est supérieur au moment appliqué au câble à l'appui aval et l'équation d'équilibre en moment n'est pas satisfaite.

Elle ne peut l'être que si l'on admet la possibilité d'une déformation en rotation de la section du câble φ et d'une déformation du pas de câblage, variables en fonction de l'abscisse x [5].

$$\varphi = l \cdot \frac{\pi}{\lambda_0} \cdot H \cdot \frac{x}{l} \cdot \left(1 - \frac{x}{l}\right) \quad \text{avec} \quad H = \frac{q \cdot l}{S^* + S_1} \quad \text{et}$$

$$S^* = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot \frac{\bar{C}_\theta}{C_s} \cdot G \cdot d^3$$

Le moment appliqué au câble à l'appui amont est alors égal au moment appliqué au câble à l'appui

aval et égal à M . L'équation d'équilibre en moment est satisfaite.

$$M = C_s \cdot d \cdot \left[S_1 + \frac{q \cdot l}{2} \right] \quad (2)$$

Application numérique

Considérons le cas d'un câble à six torons de 17 fils pour lequel $d = 40,45$ mm, le pas de câblage de 283,1 mm, l'angle de câblage de $16,86^\circ$, $\lambda_0 = 209,91$ mm, $\bar{m}_s = 5,46$ kg/m, $C_s = 0,1265$, $\bar{C}_\theta = 5 \times 10^{-4}$.

$$q = \bar{m}_s \cdot g \cdot \sin \alpha = 34,42 \text{ N/m}$$

$$S^* = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot \frac{\bar{C}_\theta}{C_s} \cdot G \cdot d^3 = 602,937 \text{ kN}$$

$$\text{avec } G = 7,7 \times 10^4 \text{ MPa}$$

$$H = \frac{q \cdot l}{S^* + S_1} = 0,048966$$

$$\varphi_1 = \frac{\pi \cdot l \cdot H}{4 \cdot \lambda_0} = 183,21 \text{ rd ou } 29,16 \text{ tours.}$$

La rotation φ de la section du câble, représentée sur la figure 4, est une courbe du second degré en fonction de l'abscisse x : elle est nulle aux appuis 1 et 2 et égale à 29,16 tours à la distance de 500 mètres.

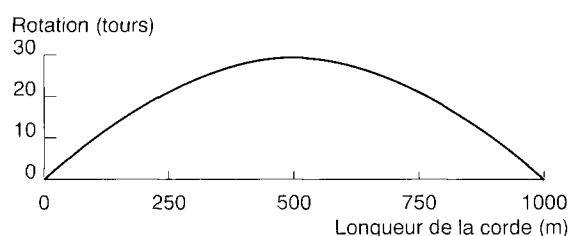


Fig. 4 - Représentation de la rotation φ de la section du câble.

En conséquence, le pas de câblage s'allonge de 3,4 % à l'appui amont, se raccourcit de 3,4 % à l'appui aval et reste inchangé à la distance de 500 mètres.

Contraintes dans les fils des câbles

Des mesures de l'effort de traction, du moment de torsion, de l'allongement et du diamètre du câble sont effectuées. Les contraintes des fils sont mesurées par des rosettes d'extensométrie électrique à trois jauges de déformation.

Les études théoriques sont réalisées au moyen d'un logiciel de calcul issu d'une adaptation d'un modèle mathématique aux caractéristiques potentielles importantes (comportement mécanique de l'âme, du frottement entre les fils, com-

portement linéaire et non-linéaire du câble) et dont les applications sont très nombreuses (flexion sur poulie, tension impulsienne en industrie du levage, calcul en fatigue, etc.) [6].

Dans ce modèle, chacun des fils du câble est une hélice circulaire droite. Un schéma de déformation, établi dans le cadre des petites déformations linéaires, permet le calcul des variations de courbure et de torsion de chaque fil en fonction de l'allongement et de la rotation imposés au câble.

Chacun des fils est soumis à un torseur d'effort interne et externe. Les équations d'équilibre et les lois de la résistance des matériaux permettent le calcul des éléments non nuls des torseurs représentés sur la figure 5 dans le repère \vec{n} , \vec{b} , \vec{t} , lié à l'élément du fil.

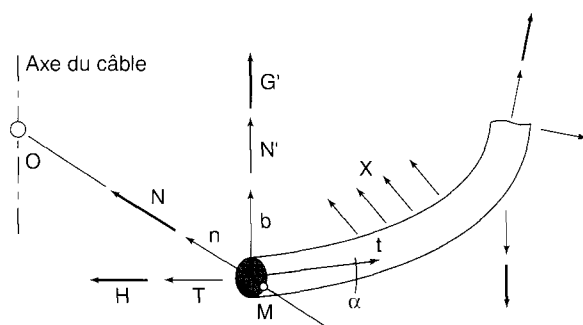


Fig. 5 - Éléments non nuls des torseurs appliqués à un élément de fil.

Chacun des fils est notamment soumis à un effort de traction T , un effort linéique de contact de la couche interne $-X$, un moment de flexion G' et un moment de torsion H .

Au point M de tangence de la section circulaire de rayon R du fil de la couche extérieure d'un toron et du cercle circonscrit au câble de rayon OM , le champ de contrainte Γ_M dans le repère \vec{t} , \vec{b} , est plan.

$$\Gamma_M = \begin{bmatrix} \frac{T}{\pi R_2} + \frac{4G'}{\pi R_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -\frac{2H}{\pi R_3} + \frac{4N'}{3\pi R_2} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Les études expérimentales et théoriques sont achevées sur des torons simples à une et deux couches de fils et sont en cours sur un câble Lang de diamètre 40,5 millimètres, composé de six torons de 17 fils.

Les études expérimentales ont validé la possibilité de simulation mathématique du comportement en traction et torsion des torons. Une interrogation demeure quant à l'effet du frottement entre les fils sur la valeur de la contrainte de cisaillement des fils des câbles et des compléments d'études sont d'ores et déjà programmés.

Ces études montrent que :

➤ En absence de torsion, la contrainte longitudinale de traction des fils associée à l'allongement du câble est la seule significative.

➤ En cas de vrillage du câble et de diminution du pas de câblage, une contrainte longitudinale de flexion des fils se cumule à celle associée à l'allongement du câble. Il s'y rajoute une contrainte de cisaillement issue de la torsion de chacun des fils.

Cette superposition de contraintes majeure fortement la contrainte longitudinale de traction associée à l'allongement du câble.

➤ En cas de dévrillage du câble et d'augmentation du pas de câblage, les fils de la couche extérieure des torons sont mis en compression.

Pour des dévrillages importants, il arrive que la couche extérieure des fils des torons ne soit plus en contact de la couche intérieure et que la valeur de la contrainte de plasticité, équivalente aux contraintes de compression longitudinale et de cisaillement, soit atteinte.

Les fils de la couche extérieure des torons restent alors décollés du cylindre circonscrit au câble et forment une structure particulière appelée « cage d'oiseau » [6].

Résistance des attaches des véhicules, des télésièges et des télécabines

Les mors des attaches des véhicules, des télésièges et des télécabines sont serrés sur le câble au moyen de ressorts. La résistance au glissement de l'attache, associée à l'effort de serrage des mors, s'oppose au poids du véhicule et aux moments de torsion des deux portées de câble à l'amont et à l'aval de l'attache.

Aussi pour un effort de serrage donné, le moment de torsion de l'attache, égal à la différence des moments de torsion des deux portées de câble à l'amont et à l'aval de l'attache, réduit la valeur maximale de la masse du véhicule transporté dans les conditions de sécurité au glissement imposées.

Le moment de torsion de l'attache dépend des moments de torsion imposés au câble par les pylônes et des moments de torsion associés à la tension des câbles à l'amont et à l'aval de l'attache.

Les moments de torsion imposés au câble par les pylônes mettent en jeux des phénomènes de frottement influencés, de manière aléatoire, par de nombreux paramètres : charge des véhicules, équipement des balanciers des pylônes, conditions de température et d'hygrométrie, etc.

Les moments de torsion associés à la tension des câbles ont été modélisés mathématiquement [5] en fonction de la position de l'attache dans les portées entre les pylônes, qui varie en fonction du temps.

Le principe de cette modélisation mathématique peut être présenté simplement dans l'exemple de la portée schématisée sur la figure 6, à l'instant t_{-1} où le véhicule -1 a terminé de franchir le pylône P_1 .

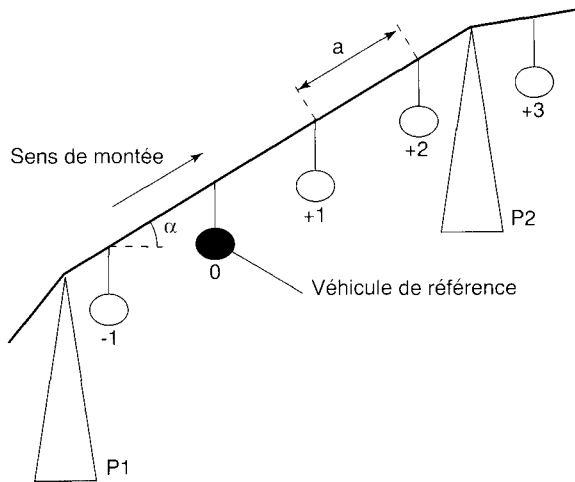


Fig. 6 - Schématisation d'une portée de câble, avec quatre véhicules, entre deux pylônes.

Le moment de torsion M_{inf} dans la travée de câble entre le véhicule -1 et le véhicule de référence 0 est suivant l'équation (2) constant.

$$M_{inf} = C_s \cdot d \cdot \left[S_1 + \frac{q \cdot a}{2} \right] \text{ avec } q = \bar{m}_s \cdot g \cdot \sin \alpha$$

où :

- C_s est le coefficient constant associé à la tension,
- d est le diamètre du câble,
- S_1 est la tension du câble à l'amont du véhicule -1,
- \bar{m}_s est la masse linéique du câble,
- g est l'accélération de la pesanteur,
- α est la pente de la corde par rapport à l'horizontale,
- a est la distance entre les cabines.

Le moment de torsion M_{sup} dans la travée de câble entre le véhicule de référence 0 et le véhicule +1 est, suivant l'équation (2), constant.

$$M_{sup} = C_s \cdot d \cdot \left[(S_1 + q \cdot a + P_f) + \frac{q \cdot a}{2} \right]$$

avec :

$$P_f = m_f \cdot g \cdot \sin \alpha$$

où :

m_f est la masse du véhicule de référence 0.

Le moment de torsion M_{att} de l'attache du véhicule de référence 0, associé au couple de rappel de la masse du véhicule écarté de la verticale, est la différence des moments M_{sup} et M_{inf} .

Dans l'exemple de la portée schématisée sur la figure 6, on peut remarquer que le moment de torsion M_{att} de l'attache est constant entre l'instant t_{-1} et l'instant t_{+1} où le véhicule +1 s'apprête à franchir le pylône P_2 .

$$M_{att} = M_{sup} - M_{inf} = C_s \cdot d \cdot [P_f + q \cdot a]$$

Le moment de torsion M_{att} de l'attache est proportionnel à la valeur du coefficient C_s , au diamètre d et à la masse linéique \bar{m}_s du câble, à la masse m_f et à la distance a des véhicules ainsi qu'à la pente α de la corde par rapport à l'horizontale.

Une étude expérimentale est en cours pour la mesure du moment de torsion des attaches de dix télésièges et télécabines, complétant des résultats de mesures antérieures sur quelques télésièges.

Les objectifs de cette étude sont de confirmer les ordres de grandeur des moments de torsion des attaches des télécabines performantes, de valider la modélisation mathématique du moment de torsion des attaches dans les portées et de définir une valeur approchée statistique du moment de torsion imposé aux câbles par les pylônes.

Le but ultime de ces études est d'aboutir à une méthode de calcul fiable du moment de torsion des attaches, en fonction du temps, prenant en compte les valeurs approchées statistiques des moments de torsion imposés au câble par les pylônes et les moments de torsion associés à la tension des câbles.

Deux capteurs de mesure du moment de torsion des câbles, à l'aval et à l'amont de l'attache, ont été développés en collaboration avec le Centre technique des industries mécaniques de Saint-Étienne.

Les moments de torsion des câbles sont mesurés en continu tout au long de la ligne, sans démontage des capteurs de mesure au passage des pylônes.

Trois allers et retours sont effectués afin de rendre compte des éventuelles variations dans le temps du moment de torsion du câble sur les pylônes.

Six mesures ont été réalisées sur un télésiège et cinq télécabines.

Ces études montrent que :

- le moment de torsion des attaches des télécabines performantes, en condition d'exploitation nominale, atteint une valeur de 280 N.m, alors qu'il n'est que de 50 à 80 N.m pour les télésièges traditionnels.

La valeur de 80 N.m confirme les valeurs de 50 N.m des mesures antérieures réalisées sur quelques télésièges ;

➤ la modélisation mathématique [5] de l'évolution du moment de torsion des câbles et des attaches dans les portées, entre chacun des pylônes, est d'ores et déjà validée expérimentalement. Le moment de torsion de l'attache est proportionnel à la valeur du coefficient de torsion du câble, au diamètre et à la masse linéique du câble, à la masse et à la distance des véhicules ainsi qu'à la pente de la corde par rapport à l'horizontale.

Conclusion

De la même façon que pour les câbles employés dans les mines [7] ou dans l'industrie de l'Off-shore [8], les câbles de téléphérique utilisés sur de grandes dénivellations sont sujets à des phénomènes de torsion.

Les phénomènes de torsion des câbles de téléphérique sont étudiés depuis 1987 au Service technique des remontées mécaniques, d'un point de vue théorique et expérimental, au moyen d'une importante machine d'essai [3].

La torsion des câbles tracteurs des cabines de téléphériques modifie notablement la valeur de la seule contrainte de traction prise en compte habituellement.

Un dévissage important peut avoir pour conséquence la mise en compression des fils extérieurs et leur décollement de la structure du câble. Un câble tracteur a été ainsi rendu impropre à l'utilisation après quelques semaines d'exploitation du téléphérique.

Un vrillage important peut modifier la durée de vie en fatigue des câbles tracteurs notamment à proximité de leurs points de fixation [9].

L'attache des véhicules des télésièges et des télécabines oppose une résistance au poids du véhicule et au moment de torsion du câble porteur-tracteur.

Des capteurs de mesure du moment de torsion du câble porteur-tracteur ont été développés et des mesures ont été engagées sur dix télésièges et télécabines.

Des valeurs de 280 N.m du moment de torsion du câble ont été relevées sur des télécabines performantes dont la résistance au glissement des attaches était ainsi réduite d'environ 20 %.

La modélisation mathématique [5] de l'évolution du moment de torsion du câble dans les portées, entre chacun des pylônes, est d'ores et déjà validée expérimentalement.

L'analyse statistique des moments de torsion imposés au câble par les pylônes devrait permettre d'aboutir à une méthode de calcul fiable du moment de torsion des attaches.

_____ RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES _____

- [1] LEHANNEUR L. (1962-1963), *Conférences sur les téléphériques à voyageurs*, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- [2] ENGEL E. (1959), *Phénomène de torsion dans les câbles de téléphériques*, Zeitschrift der Österreichische Ingenieur-Zeitschrift, **6**, pp. 215-220.
- [3] DUBUISSON J. et autres (1987), *Tenue des attaches des véhicules des installations monocâbles*. Présentation d'une plate-forme d'essais de glissement et étude statique préalable. Internationale Seilbahn-Rundschau, pp. 292-298.
- [4] KOLLROS W. (1974), *Zusammenhang zwischen Torsionsmoment, Zugkraft und Verdrillung in Seilen*. Internationale Seilbahn-Rundschau, pp. 49-58.
- [5] GASSMANN H.R. (1981), *Torsionsmomente in Förderseilen von Umlaufbahnen*. Mitteilungen aus dem Institut für Bau und Transportmaschinen, ETH, Zürich, VDI - Z - Reihe 13 Nr 19.
- [6] COSTELLO G.A. (1997), *Theory of Wire Rope*, Mechanical Engineering Series, Springer.
- [7] REBEL G., CHANDLER H.D., ODN H.D. - 0619 (1997), A machine for the tension-torsion testing of steel wire rope. OIPEEC, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **71**, pp. 55-74.
- [8] CHAPLIN C.R. (1998), Torsion problems caused by wire during mooring installation operations in deep water, OIPEEC, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **75**, pp. 47-60.
- [9] OPLATKA G., ROTH M. (1996), *Choix du pas de câblage des câbles tracteurs d'appareils à va-et-vient surmontant une forte dénivellation*, Internationale Seilbahn-Rundschau, pp. 4-9.

ABSTRACT

Torsion in cable lift cable

J. DUBUISSON

Since 1987 the Service Technique des Remontées Mécaniques has been conducting a programme of research into torsion in cable lift cables. A large testing machine has been constructed for this programme.

An investigation of the equilibrium of moments of a cable span between two supports shows that torsion and longitudinal strain are linked with the constant torsional moment of the cable.

Experimental and theoretical studies of the stresses in the wires of the cabin hauling cables show that the bending and shearing stresses, related to twisting of the cable, add to the tensile stress which is usually considered.

The sliding resistance of the fastenings of chairs and cabins to the carrying-hauling cable opposes the weight of the chairs and cabins and the torsional moment of the cable. A method for calculating the torsional moment in the carrying-hauling cable and checking the result experimentally is in the process of being developed.