

CABLES D'ENERGIE : TRAVAUX PRATIQUES. APPROCHES DIELECTRIQUE, THERMIQUE, MECANIQUE ET ECONOMIQUE

Gilles BEAUFILS, Petru NOTINGHER, Thierry MARTIRE et Yves PATIN

Gilles.Beaufils@ies.univ-montp2.fr, Petru.Notingher@ies.univ-montp2.fr, Thierry.Martire@ies.univ-montp2.fr

Institut d'Electronique du Sud / Groupe Energie Matériaux
Université Montpellier 2, CC079, 34095 Montpellier Cedex 05

RESUME : Ce travail a pour but de faire appréhender les différents aspects liés à l'utilisation et à la conception des câbles d'énergie. Une approche pluridisciplinaire reliant les aspects électriques, thermiques, mécaniques et économiques est effectuée. Elle s'appuie sur des notions développées dans le cadre d'un cours portant sur les applications modernes de l'énergie électrique dispensé en 1^{ère} année de Master EEA. La mise en application de lois, modèles et formules est réalisée à travers le contact avec différents types de câbles et des documents constructeur. Le travail comprend des expérimentations diélectriques et thermiques permettant aux étudiants de mesurer les valeurs des différentes grandeurs caractéristiques d'un câble, dont certaines en régime nominal (courant, échauffement, chute de tension aux contacts...). Des parties du TP peuvent être adaptées à l'étude des capacités électriques, des matériaux ou des phénomènes thermiques en licence.

Mots clés : câble d'énergie, approche pluridisciplinaire, diélectrique, thermique, mécanique

1 INTRODUCTION

Si la fonction principale d'un câble est le transport d'énergie électrique, il n'en reste pas moins soumis à un ensemble de contraintes (diélectriques, thermiques, mécaniques, chimiques, environnementales...), que l'on ne peut ignorer si l'on veut quelques peu comprendre le câble tout au long de son existence (conception, fabrication, transport, installation, vieillissement, recyclage).

Les travaux pratiques décrits dans cet article ont ainsi pour but de faire appréhender aux étudiants quelques-unes de ces contraintes :

- d'une part, en instrumentant des câbles et en procédant à des mesures lors de la séance ;
- d'autre part, en exploitant les résultats des mesures à l'aide de documentations et des calculs réalisés avant et après la séance.

Le TP s'adresse à des étudiants en 1^{ère} année de Master EEA et s'appuie sur des notions développées dans un cours d'« Applications Modernes de l'Energie Electrique ». Il est censé faire acquérir les connaissances nécessaires à la définition d'un cahier de charges et au choix d'un câble de transport ou de distribution d'énergie.

2 APPROCHE DIELECTRIQUE

2.1 Justification. Objectifs

Le diélectrique est l'élément central du câble, puisque c'est lui qui véhicule l'énergie et assure l'isolation du conducteur. Les contraintes électriques subies par l'isolation (valeur et répartition du champ électrique) et les caractéristiques des divers matériaux

(résistivité, facteur de pertes...) doivent être connues et prises en compte à la conception. En même temps, la connaissance des modèles équivalents des câbles est indispensable lors de la conception des lignes (calcul des courants capacitifs à vide, couplages capacitifs...)

L'objectif de cette partie du TP est d'appréhender le modèle électrique équivalent d'un câble d'énergie et de comprendre le rôle des éléments constitutifs (âme, couches semi-conductrices, isolant, gaines...). Pour cela, il convient de disposer de plusieurs types de câbles (HTA, HTB, BT), avec des épaisseurs d'isolant, des longueurs et des sections différentes, ainsi que de la documentation associée et des indications sur les divers matériaux utilisés.

2.2 Préparation

Dans un premier temps, les étudiants doivent déterminer la permittivité relative de l'enveloppe isolante de câbles moyenne tension et calculer les variations de la capacité en fonction des tolérances de fabrication. Deux câbles de sections et épaisseur d'isolant différentes sont étudiés :

- un câble HTA 12/20 kV à âme en aluminium de section 150 mm²;
- un câble HTA 12/20 kV à âme en aluminium de section 630 mm².

Les étudiants disposent d'une documentation fournie par le constructeur dans laquelle différents types de câble sont répertoriés. Les éléments constitutifs de chaque câble et les dimensions associées, ainsi que des valeurs de capacité linéique y sont indiquées. Plusieurs expressions de la capacité selon le type de câble (à champ radial ou non radial) sont mentionnées dans le document. Les capacités linéiques données par le constructeur sont de l'ordre de 0,25 $\mu\text{F}/\text{km}$ et 0,47 $\mu\text{F}/\text{km}$ pour les câbles étudiés.

En utilisant soit l'expression de la capacité linéique d'un câble coaxial vue en cours :

$$C = 2\pi\epsilon_0\epsilon_r/\ln(r_2/r_1) \text{ [F/m]}$$

(avec ϵ_0 permittivité du vide ($8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m), ϵ_r permittivité relative de l'isolant, r_2 rayon externe de l'isolation et r_1 rayon interne de l'isolant), soit l'expression donnée par le constructeur :

$$C = \epsilon_r/(18\ln(r_2/r_1)) \text{ [\mu F/km]}$$

les étudiants trouvent des valeurs de ϵ_r comprises entre 2,4 et 4,5 pour une isolation en polyéthylène réticulé. Ils calculent des tolérances de l'épaisseur isolante comprises entre 19% et 42%, pour une épaisseur moyenne de l'isolation de l'ordre de 5,5 mm.

Les étudiants doivent faire le lien avec le cours et utiliser la bonne expression parmi celles données par le constructeur.

La deuxième phase de la préparation porte sur la détermination de la capacité qu'on mesurerait entre deux câbles placés dans différentes configurations. Le but est de faire la différence entre la capacité propre d'un câble C_p , la capacité entre écrans C_{me} , la capacité entre l'écran et le sol (ou plan de référence) C_s et la capacité entre deux conducteurs C_m . Plusieurs cas sont étudiés :

- capacité mesurée entre les âmes de deux câbles monophasés moyenne tension posés sur un plan ;
- capacité mesurée entre les âmes de deux câbles monophasés moyenne tension posés sur un plan avec les écrans semi-conducteur reliés ;
- capacité mesurée entre les deux conducteurs de phase d'un câble triphasé basse tension, tous les conducteurs de phase étant séparés ;
- capacité mesurée entre les deux conducteurs de phase d'un câble triphasé basse tension, deux conducteurs de phase étant reliés.

Dans chaque cas, les étudiants doivent déterminer l'expression de la capacité équivalente inter-câbles $C_{\text{équi}}$ (fonction de C_p , C_m , C_{me} et C_s), qui vaut $C_p C_{me} / (C_p + 2C_{me})$ pour le cas a), $C_p/2$ pour le cas b), $3C_m/2$ pour le cas c) et $2C_m$ pour le cas d).

2.3 Expérimentation

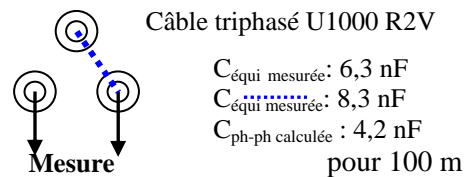
Les expériences sont effectuées à l'aide de :

- trois câbles moyenne tension HTA 12/20 kV à âme en aluminium : deux câbles de section 150 mm^2 et de longueurs 1 m et 0,8 m, et un câble de section 630 mm^2 et de longueur 37 cm ;
- un câble triphasé basse tension (BT) U1000 R2V, de longueur 100 m, enroulé sur un touret ;
- un multimètre RLC type Escort ELC 131D muni de sondes pour mesurer les différentes capacités des câbles présentés précédemment ;

- un pied à coulisses ;
- diverses longueurs de câbles HTB 225 kV de différentes sections, afin d'illustrer les parties constitutives.

2.3.1 Manipulations

Dans un premier temps, les étudiants doivent identifier les différentes parties constitutives des câbles. Ils s'appuient pour ceci sur les notions du cours (étude de cas de l'interconnexion Espagne/Maroc, 4 câbles sous-marins 230 kV de 26 km chacun, puissance totale transportée 700 MW) et sur la documentation constructeur. Ils mesurent ensuite les capacités propres des câbles moyenne tension à l'aide du capacimètre. Ils doivent calculer la capacité linéique de chaque câble et, en faisant un dessin en coupe longitudinale, indiquer entre quelles parties ils ont effectué les mesures.



Par la suite, en prenant les deux câbles de section identique (dont on a déjà mesuré les capacités propres), ils doivent mesurer la capacité entre les âmes des câbles jointifs placés dans les conditions précisés dans les cas a) et b) de la préparation, puis déterminer l'évolution de cette capacité lorsque la distance entre les câbles varie.

Dans le cas des câbles BT, ils doivent mesurer les capacités équivalentes entre conducteurs (cas c) et d) de la préparation).

2.3.2 Résultats

On mesure des capacités propres de 210 pF (câble HTA 150 mm^2 de longueur 1 m), 160 pF (câble HTA 150 mm^2 de longueur 0,8 m) et 170 pF (câble HTA 630 mm^2 de longueur 0,37 m). Il en résulte des capacités linéiques proches de celles données par le constructeur (aux tolérances près).

Pour les deux câbles 150 mm^2 jointifs, on trouve des capacités de l'ordre de 90 pF lorsque les écrans ne sont pas reliés et de 100 pF lorsqu'ils sont reliés. En écartant les câbles, on observe une forte diminution de la capacité mesurée (~50 pF pour une distance de 30 cm et ~40 pF pour 1 m).

Quelques résultats obtenus sur le câble basse tension sont indiqués dans la figure précédente.

2.4 Exploitation

Les étudiants doivent comparer les mesures aux valeurs calculées et à celles indiquées par le fabricant pour les câbles moyenne tension, ou aux calculs pour les câbles basse tension. Une discussion des résultats est exigée.

On leur demande également de calculer le courant « de fuite » d'un câble de 630 mm² et de 10 km de long et de discuter les conséquences sur la protection électrique et sur l'environnement. Enfin, le rôle de l'écran en aluminium doit être précisé et discuté.

2.5 Retour d'expérience

Cette partie du TP nécessite peu de matériel de mesure (un RLC-mètre et un pied à coulisses). Les câbles et la documentation peuvent être obtenus auprès des câbliers (Nexans, Prysmian, Sagem...). Une préparation des câbles afin de mettre en évidence leurs parties constitutives est nécessaire. Elle ne pose pas de problème particulier, puisqu'on peut la réaliser avec des outils ordinaires. L'investissement financier est donc minime.

Le temps nécessaire aux manipulations demandées est réduit, l'accent étant posé sur l'exploitation des mesures. Les points qui posent le plus souvent des problèmes aux étudiants sont : la manière d'effectuer les mesures géométriques et électriques (où mesurer ?), la conversion des capacités mesurées en capacités linéiques et les modèles équivalents des capacités inter-câbles.

Cette partie du TP présente les intérêts pédagogiques suivants :

- la lecture d'une documentation industrielle, la compréhension et l'utilisation correcte des expressions qui y figurent ;
- l'identification et la compréhension du rôle des parties constitutives d'un câble d'énergie ;
- l'étude d'un condensateur cylindrique. Ceci oblige les étudiants à réfléchir à la définition d'une capacité électrique et des grandeurs associées, ainsi qu'à la manière dont on fait la mesure ;
- l'établissement de schémas électriques équivalents d'un système en identifiant et en prenant en compte les différents éléments rencontrés ;
- la familiarisation avec des aspects tels les courants de fuite et leur impact sur la protection électrique, le rôle des écrans...

3 APPROCHE THERMIQUE

3.1 Justification. Objectifs.

La thermique occupe une place importante dans la phase de conception, design et choix des câbles d'énergie, car elle est à la base du dimensionnement au travers du courant, de la température et de la section. Il y a un couplage avec l'électrotechnique, car les échauffements sont directement liés aux pertes électriques. Les aspects thermiques sont également importants durant l'exploitation du câble : son vieillissement et sa durée de vie sont, entre autres, liés à sa température et à ses régimes d'évolution. « Last but not least », la température maximale des câbles HTA à isolation synthétique (90°C pour l'âme avec un isolant PR en régime permanent) est l'une des butées ou limites techniques de ces composants.

L'objectif de cette partie du TP est de prévoir et mesurer la température d'un câble HTA en régime nominal (200A), les contraintes étant la température de 90°C de l'âme qu'on désire atteindre (et ne pas dépasser) et la sécurité. Pour cela, il convient d'une part de disposer d'un câble HTA de section minimale (50 mm²), avec un courant nominal significatif (de l'ordre de 100 A) qui puisse être obtenu avec le matériel disponible en plate-forme. D'autre part, il ne sera pas appliquée la tension nominale de 12 kV pour des raisons évidentes de sécurité et matérielle.

3.2 Préparation

Durant cette phase, les étudiants doivent prédéterminer, pour un câble HTA donné de 50mm², l'échauffement en régime permanent. Par simplification, les régimes discontinus, cycliques, de secours et transitoires (le plus sévère étant le court-circuit de plusieurs kA) ne sont pas abordés.

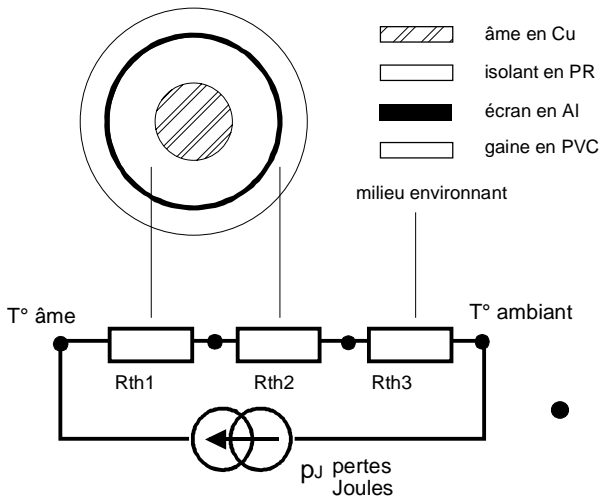
Une première réponse peut être obtenue avec la documentation du constructeur (doc technique du câble) : la température de l'âme $T_{\text{âme}} = 90^{\circ}\text{C}$ pour un courant de 205 A en hiver et 190A en été, avec une température respective de l'air T_{air} de 20°C et 30°C.

La réponse complète est construite à partir d'une série de questions qui portent sur :

- a) la justification des hypothèses de calculs de température d'âme constante, flux thermique radial ;
- b) le calcul de la détermination de la résistance thermique R_{th} que les étudiants doivent reprendre et vérifier ;
- c) la répartition des températures dans le câble.

Les pré-requis sont le cours de l'unité d'enseignement où les bases de la thermique (grandeurs et lois) sont traités en géométrie plane.

Ce travail se conclut avec le modèle thermique suivant :



L'étudiant fera le lien avec la formule vue en cours tirée de la norme CEI 60287 (« Intensité admissible dans les câbles en régime permanent – facteur de charge 100%. Câble unipolaire »)

$$I = \sqrt{\frac{\Delta T}{R \left(\frac{p_{diél}}{R_{th1}} + \frac{0,5 R_{th1}}{R_{th2}} + \frac{R_{th2}}{R_{th3}} + \frac{R_{th3}}{R_{th4}} \right)}}$$

I : intensité admissible. ΔT : écart de température âme – milieu environnant. R : résistance de l'âme conductrice à 50Hz à la température de service.

$R_{th1,2,3,4}$: résistances thermiques de l'isolant, de la gaine intérieure, de la gaine extérieure, entre la surface du câble et le milieu environnant.

$p_{diél}$: pertes diélectriques. λ_j : facteur de pertes dans l'écran métallique.

Pour le câble étudié, avec les expressions des résistances thermiques de l'isolant en PR et de la gaine en PVC, et de l'échange convectif avec le milieu ambiant :

$$R_{th} = \frac{1}{2} \frac{1}{L} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad \text{ou} \quad \frac{1}{h S}$$

en prenant pour les conductivités thermiques $\lambda_{PR} = 0,28 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ et $\lambda_{PVC} = 0,17 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ à 20°C, et un coefficient de convection $h = 10 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, les résistances thermique linéiques ont pour valeurs (en mKW^{-1}): $R_{th,PR} = 0,55$, $R_{th,PVC} = 0,3$, $R_{th,conv} = 1$.

Les pertes linéiques du câble à 90°C avec 200 A sont de 32,8 W/m. L'échauffement de l'âme ($T_{âme} - T_{air}$) atteint 60,7°C, soit une âme à 80,7°C pour l'air ambiant à 20°C. La gaine PVC en surface est à 52,7°C.

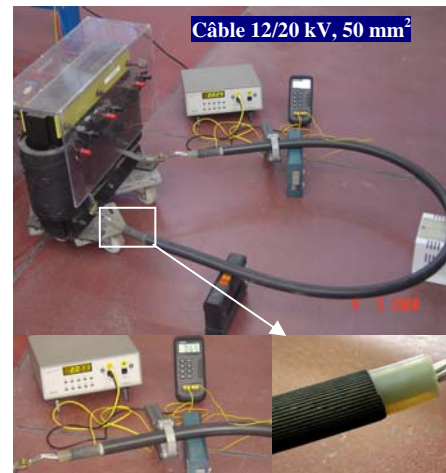
Nota : Les résultats de ces calculs présentent une incertitude en raison des valeurs non connues des conductivités thermiques des matériaux à 90°C et du coefficient de convection h . C'est une estimation des températures qu'on obtient.

3.3 Expérimentation

Avec les contraintes mentionnées au § 3.1, l'expérience comprend : (cf. photo)

- 2 m de câble 12/20 kV de 50mm² en court-circuit comme secondaire d'un transformateur, connecté par des cosses à sertir à œillets boulonnés. La gaine, l'écran et l'isolant sont percés radialement à 2 mm en 6 points pour le passage de thermocouples. Une tresse est utilisée pour fermer la boucle.
- Un autotransformateur 1 kVA, 0/280 V et un (vieux) transformateur triphasé 127V/220V sur lequel on puisse monter le câble en court-circuit.
- Les instruments de mesure : thermocouples type K et afficheur de température ITT 245 à 2 entrées ; transformateur de courant ouvrable 100 : 1 (qui ne sature pas pour un courant de 200A) ; multimètre Voltech 1000.

3.3.1 Manipulation

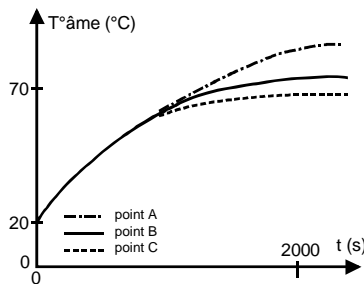


Les étudiants montent le câble en court-circuit en soignant les contacts ; cela leur montre les contraintes mécaniques de connexion pour des courants importants de 200 A. Ils ont le choix de la colonne sur laquelle ils disposent la boucle de court-circuit, ce qui influe sur la valeur du courant de court-circuit en raison de la valeur maxi du flux d'induction. Si le montage est réalisé sur l'une des colonnes à flux minimum, le courant de 200 A ne peut être atteint. La disposition de la boucle peut influencer le couplage (inductance de fuite).

Ils mesurent la chute de tension aux bornes du câble et l'évolution des températures à divers endroits du câble (âme, isolant, gaine...), tout en maintenant un courant de 200 A jusqu'à l'atteinte du régime permanent (~30 min). Ils observent les évolutions de la résistance du câble et de l'isolant qui devient souple, mou, translucide.

3.3.2 Résultats

Le relevé de la température de l'âme du câble en 3 points est le suivant :



L'échauffement près de la connexion est plus élevé en raison des pertes supplémentaires dans la résistance de contact.

Mesures de U : 0,44 V à 0,77 V lors de la manip (Inclus $R_{\text{câble}}(\text{température}) + R_{\text{contact}}$).

3.4 Exploitation

Les étudiants doivent comparer prédictions, mesures et données constructeurs, et conclure, expliquer l'évolution de la tension, enfin exploiter la courbe d'élévation de la température en fonction du temps. On leur demande d'indiquer l'épaisseur idéale d'isolant (sur le plan strictement thermique), de justifier le tableau des intensités admissibles du constructeur, et des divers éléments composants le câble, quel est celui qui limite le courant admissible.

3.5 Retour d'expérience.

Le matériel est facile à monter et économique si on utilise des contacts professionnels tels que eRDF, installateurs, industriels... (il y a toujours des stocks ou un chantier de câble HTA à proximité). Le sertissage de la cosse sur l'âme de 50 mm^2 , ou de sa réfection, est un peu plus compliqué, car cela exige un outillage pas toujours disponible.

La manipulation n'est pas longue et laisse le temps à l'exploitation. Elle peut être contrariée et modifiée à l'usage par des brins cassés de l'âme conductrice au niveau des cosses par pliages successifs.

Les intérêts pédagogiques pour les étudiants sont :

- l'observation de l'évolution et du comportement d'un câble qu'ils n'ont pas l'habitude de voir en conditions nominales à près de 90°C . Ils comprennent et mesurent les changements avec les conséquences possibles ;
- la compréhension du phénomène thermique et des grandeurs, lois et modèles vus en cours ;
- le montage du câble en court-circuit avec une forte intensité ;

- la liberté de la colonne du transfo sur laquelle ils montent le câble en essai, avec l'influence sur la valeur maximale du courant qui puisse être atteint. Ceci peut les obliger à réfléchir au fonctionnement du transformateur ;
- la mesure du courant avec le transformateur de courant 100:1 et un affichage de 2A qui interpelle les étudiants. En effet, contrairement aux sondes à effet Hall, les transformateurs de courant ne sont plus beaucoup utilisés dans nos TP.

4 APPROCHES MECANIQUE ET ECONOMIQUE

4.1 Justification. Objectifs.

Cette partie complète le volet électrique et thermique et relève d'une approche systémique ou globale par les volets technologique (domaine mécanique) et économique.

Dans toutes ou presque toutes liaisons d'énergie, l'économie guide et fixe beaucoup de choix. Les objectifs visés sont une sensibilisation des étudiants :

- au monde socioéconomique des entreprises de câbles : fabricant, distributeur, installateur, exploitant (Nexans, Prysmian, Rexel, Spie, Cégélec, erdf, industriels...)
- au marché des matériaux et matières premières,
- à la notion de coûts, prix, de leur variation et fixation (notion offre /demande).

4.2 Approche mécanique

Cette partie succincte pose aux étudiants le problème du transport de 300 m de câble, et leur fait dimensionner un touret en s'aidant de la documentation du constructeur. Ils découvrent un volet technique, celui du conditionnement et du transport terrestre avec leurs limites. Il a été vu en cours le transport maritime dans l'étude de cas Espagne/Maroc (26 km ou 1456 t de câble 230/400kV).

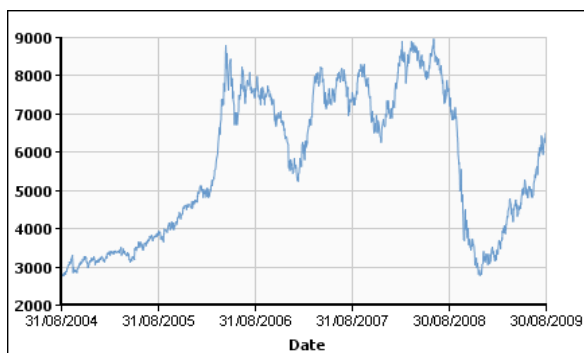
4.3 Approche économique

Il est demandé aux étudiants d'analyser les conditions générales de vente du câblé et de relever 5 éléments qui lui semblent le plus significatif. Ils sont sensibilisés à l'aspect juridique de la vente (contrat entre un vendeur et un acheteur), aux questions de prix, de garantie face à des défauts, de paiement, d'emballage (consignation du touret). La photo illustre un défaut répétitif tous les 3 m sur le câble, blessure causée lors de son enroulement sur le bord du touret.



Enfin, ils doivent évaluer le prix de 300 m de câble HTA et réfléchir aux facteurs qui le déterminent : les matériaux conducteurs Cu ou Al, et ne pas oublier ou négliger les matériaux isolants PR ou PE, dont les prix peuvent se rapprocher de l'Al, voire même le dépasser pour un matériau très pur (cas du THT).

Nota : Dans les câbles HTA du nouveau palier technique d'EDF (mis en service après 2002), l'épaisseur de l'isolant a été ramenée de 5,5 à 4,5 mm. On imagine l'économie d'échelle pour des dizaines de milliers de km de câble du réseau moyenne tension (192.720 km en 2001).



Prix du cuivre à la bourse des métaux de Londres (London Metal Exchange) en US \$/tonne.

Source: <http://www.lme.co.uk>

Une réflexion sur les coûts (achat + usage) est initiée sur la base du choix des conducteurs en cuivre ou aluminium, et de la section économique.

4.4 Retour d'expérience

Cette partie ne pose pas de difficultés particulières. L'accès aux informations économiques se fait facilement par Internet, sur les sites des fabricants (Prysmian, Nexans...), des distributeurs (www.cablerie.com) et, pour les matériaux, sur le site de la London Metal Exchange (LME) ou sur celui de la revue « L'usine nouvelle ».



5 CONCLUSIONS

Les travaux pratiques proposés portent sur les câbles d'énergie et sont basés sur une approche pluridisciplinaire (électrique, thermique, économique, géométrique). Les retours d'expérience font ressortir un contact bénéfique pour les étudiants avec le matériel et les documents industriels, qui facilitent la compréhension des différentes notions étudiées (constitution du câble, rôle des divers éléments, aspects mécaniques et économiques...). Les expérimentations diélectriques et thermiques que les étudiants doivent effectuer (mesures, contacts électriques, mise en place...) fournissent un apport important à la compréhension non seulement des aspects liés aux câbles, mais également à celle de notions beaucoup plus générales de la physique et du génie électrique (définition et rôle d'une capacité électrique en diverses géométries, grandeurs thermiques, fonctionnement d'un transformateur, chutes de tension...). Les expériences ne nécessitent pas l'emploi de moyens importants et ne posent pas de problèmes de sécurité.

Ce TP peut être complété par d'autres aspects liés à l'emploi des câbles, notamment l'aspect chimique (tenue corrosion de l'écran, de la gaine), les essais au feu etc. Certaines parties du TP peuvent être adaptées à l'étude des capacités électriques, des matériaux diélectriques ou des phénomènes thermiques au niveau licence.

Bibliographie :

- [1] C. Moreau, J-M David, « Les nouveaux câbles HTA », REE N°7, juillet 2002.
- [2] A. Doulet, L. Gauthier, « Réseau de distribution : aérien ou souterrain ? », REE N°7, juillet 2002.
- [3] M. Pays, « Câbles de transport d'énergie. Technologies. Caractéristiques », Techniques de l'Ingénieur, D 4520.
- [4] Norme CEI 60287, « Intensité admissible dans les câbles en régime permanent – facteur de charge 100%. Câble unipolaire »