



(5.5.1) Influence des creux de tension sur les procédés en continu – Etude de cas

Marcel Didden, Ingénieur diplômé de l'Université Catholique de Leuven

Juin 2003

1	<i>Introduction</i>	3
2	<i>Analyse du problème</i>	3
2.1	Le procédé de production.....	3
2.2	Domage financier.....	4
2.3	Réseau électrique et origine des dommages.....	5
2.4	Zone de vulnérabilité.....	6
2.5	Méthodes curatives.....	6
2.6	Spécifications d'équipements / protection des commandes.....	7
2.7	Protection au sein de l'usine.....	7
2.8	Solution sur le réseau public : modification du réseau électrique.....	8
2.9	Analyse économique.....	9
3	<i>Conclusion</i>	12
4	<i>Références et bibliographies</i>	13

European Copper Institute



L'European Copper Institute est une joint venture Européenne entre les principaux producteurs de cuivre mondiaux et les fabricants Européens de demi-produits. Créé en 1996, l'ECI assure la promotion du cuivre en Europe avec un réseau de 11 centres de développement basés en Allemagne, au Benelux, en Espagne, en France, en Grèce, en Hongrie, en Italie, en Pologne, au Royaume Uni, en Scandinavie et en Russie. L'ECI poursuit les efforts initialement engagés par le Copper Products Development Association, créé en 1959, et de l'INCRA (International Copper Research Association) créé en 1961.

Centre d'Information du Cuivre, Laiton & Alliages et Copper benelux



COPPER BENELUX
a member of the European Copper Institute

Ce sont les organisations professionnelles des producteurs et des transformateurs de cuivre chargées de promouvoir les applications du cuivre et de ses alliages sur les marchés français et du Benelux. Financés par les producteurs de cuivre du monde entier et par les sociétés fabricants de demi-produits, le Centre d'Information du Cuivre et Copper benelux mettent en oeuvre des programmes de développement sur leurs marchés respectifs en coordination avec les structures professionnelles internationales de leurs mandants : International Copper Association au niveau mondial, European Copper Institute au niveau Européen. Ils ont pour vocation de produire et de diffuser l'information technique relative au cuivre et à ses alliages, de faire connaître les meilleures méthodes de mise en oeuvre des produits dans chacun de leur domaine d'emploi et d'en promouvoir l'utilisation dans les grands secteurs d'application. Le Centre d'Information du Cuivre et Copper benelux sont les coordinateurs respectivement pour la France et le Benelux du programme européen Leonardo relatif à la formation en matière de «Power Quality».

Remerciements

Ce projet a été mis en oeuvre avec le soutien de la Communauté Européenne et l'International Copper Association Ltd.

Avertissement

Le contenu de ce projet ne reflète pas nécessairement la position de la Communauté Européenne. De même, il n'implique aucune responsabilité de la part de la Communauté Européenne. L'European Copper Institute, le Centre d'information du Cuivre et Copper benelux déclinent toutes responsabilités pour toutes conséquences directes ou indirectes ou les dommages qui pourraient résulter de l'utilisation du contenu ou de l'incapacité à utiliser les informations et les données de ce guide.

1 Introduction

Ce module décrit un cas de creux de tension en Belgique. Un des procédés industriels bien connu pour sa sensibilité est celui de l'extrusion de matières plastiques dans l'industrie textile. Dans ce procédé, des copeaux de plastiques sont fondus, transformés en filaments, et finalement enroulés sur des tambours. Les fibres peuvent être utilisées pour fabriquer, par exemple, des tapis. La Belgique est le premier exportateur au monde de tapis et le second producteur, après les Etats-Unis.

Afin de comprendre clairement l'importance du problème des creux de tension pour les sociétés belges réalisant l'extrusion, une surveillance a été mise en place chez neuf utilisateurs de ce procédé. Cette étude a mis en évidence que le nombre moyen annuel d'arrêts de production dus à des creux de tension s'élevait à quatre. Nous avons effectué une expertise minutieuse dans l'une de ces sociétés. Les trois sujets suivants seront décrits :

- le procédé de production,
- la perte financière provoquée par un arrêt de production forcé et l'architecture du réseau,
- les solutions possibles pour atténuer les dommages, aussi bien sur le plan technique qu'économique.

2 Analyse du problème

La société, objet de l'étude, réalise trois procédés sensibles aux creux de tension : Fil Continu Epais (FCE), Fil Continu (FC), Poste de Chauffe. Dans ce document, nous nous intéresserons au procédé FCE.

2.1 Le procédé de production

La figure 1 montre le principal sous-procédé de la ligne d'extrusion FCE qui fournit la fibre textile à partir des copeaux de polymères. Les étapes suivantes sont à distinguer :

- l'extrudeuse mélange les copeaux en une pâte homogène,
- la pâte homogène est envoyée vers un équipement constitué de petits trous (appelé fileuse) qui permet d'obtenir une fibre (filage à chaud),
- enfin, la fibre est étirée, déroulée et enroulée sur les bobines.

Pour réaliser chacune des étapes ci-dessus, plusieurs variateurs sont utilisés.

En prenant simplement connaissance des spécifications des variateurs et à partir des informations fournies par les manufacturiers, nous avons déjà pu formuler des conclusions intéressantes. Tous les variateurs utilisés sur le site expertisé sont de marques différentes et possèdent leurs propres caractéristiques de protection contre les creux de tension.

En général, le niveau d'immunité ne dépasse pas de façon significative le niveau de compatibilité de 90 % (niveau de tension maintenue) prescrit par la norme EN 50160. Si l'un des constituants perd l'énergie suite à un creux de tension, le procédé complet sera interrompu. Cela signifie que le maillon le plus faible détermine le comportement du procédé vis-à-vis des creux de tension et que tous les constituants doivent être examinés séparément. Les constructeurs de machines d'extrusion pour le textile proposent également des lignes de production conçues avec une immunité explicite contre les creux. Nous n'avons pas examiné cette option en détail, l'étude ayant été menée sur une ligne de production déjà existante.

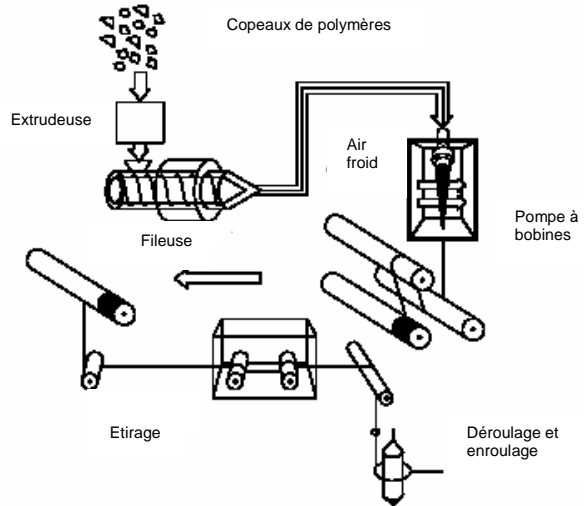


Figure 1 – les procédés d'extrusion dans le textile

Le premier constituant, l'extrudeuse, est entraînée par un moteur à courant continu. Celui-ci est piloté par un variateur de vitesse analogique. Afin de protéger les composants d'électronique de puissance du variateur, la protection contre les baisses de tension est programmée à un niveau de grande sensibilité. Le procédé sera entièrement interrompu si le variateur détecte une chute de tension de 20 % ou plus sur l'une des quelconques phases d'alimentation ; les fileuses sont équipées de variateurs de vitesse. Les protections contre les baisses de tension de ces variateurs bloqueront le procédé si la tension du bus continu chute de 15 %. La référence [4] indique que ces applications sont toujours très sensibles aux creux de tension sur les trois phases et parfois sur seulement une ou deux.

Etirage, déroulage et enroulage sont réalisés à l'aide de variateurs de vitesse alimentés par un bus continu commun. Ces variateurs sont équipés de volants d'inertie : les moteurs se comportent en génératrice pendant les creux de tension et restituent de l'énergie sur le bus continu.

Nous en concluons que seuls les deux variateurs de l'extrudeuse et de la fileuse seront à prendre en compte lorsque l'on s'intéressera aux méthodes curatives.

Deux autres points sensibles sont les contrôles des procédés relatifs à l'air et à l'électronique. Notre étude montrera qu'il n'est pas utile de les approfondir.

2.2 Dommages financiers

Immédiatement après un creux de tension qui a interrompu le procédé, l'équipe de maintenance commence à redémarrer successivement les lignes de production. Selon leur nombre (typiquement entre 10 et 20), le procédé est redémarré en totalité entre deux et quatre heures. Cela signifie que la perte de production se situe entre une ou deux heures. Il n'y a pas de diminution de consommation de matériau brut durant ces quatre heures car pour l'extrudeuse, le redémarrage a lieu immédiatement après le creux de tension.

Si ce n'était pas le cas et si le matériau fondu pouvait rester dans l'extrudeuse, il serait brûlé lors de la reprise du chauffage et les particules brûlées sortiraient progressivement de l'extrudeuse pendant plusieurs jours, avec, à la clef, un produit de qualité médiocre. De ce fait, le coût d'un tel brûlage serait bien plus élevé que celui consistant à se débarrasser des excès de polypropylène après l'extrusion. De plus, les personnels de maintenance nettoient eux-mêmes les équipements, et il n'y a donc ni diminution, ni augmentation du coût du travail.

Le facteur qui a le plus d'influence sur la perte financière résulte d'une production continue ou non de l'usine ; si la production est continue, comme c'est le cas dans cette société, la perte de production due à l'arrêt ne peut être récupérée sur des heures supplémentaires, ainsi, la perte de production se traduit directement en une perte de profit – à savoir, la perte est égale à la valeur de produit non fabriqué pendant le temps d'interruption. Dans le cas d'une production non continue, la perte de production peut être récupérée sur les heures creuses avec, toutefois, un coût additionnel sur la main-d'œuvre.

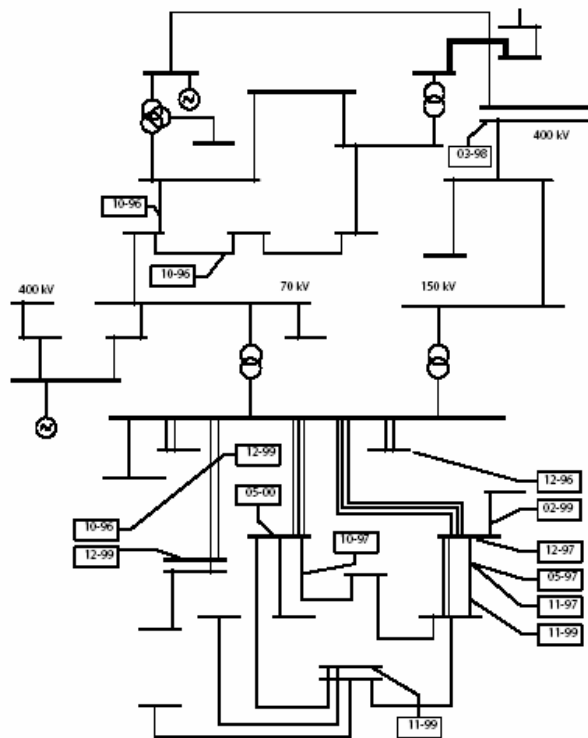


Figure 2 – Schéma unifilaire du réseau électrique
(Les carrés indiquent l'origine géographique et les dates des défauts)

2.3 Réseau électrique et origine des dommages

La figure 2 décrit le réseau au voisinage de la société d'extrusion expertisée.

Le réseau est représenté jusqu'à ses trois connexions au 400 kV du réseau de transport. Les étiquettes fournissent les localisations et les dates (mois/années) des défauts qui ont conduit à un arrêt du procédé au cours de la période de 3,5 années de surveillance. On pourra constater que les défauts apparus sur le 15 kV sont à l'origine de la majeure partie des interruptions. Une instrumentation dédiée à la mesure des creux de tension et installée en tête de l'installation électrique de la société a mis en évidence que la plupart des perturbations ont eu lieu sur les trois phases. Si l'on corrèle les arrêts de procédés avec les indications de l'instrument, il apparaît que l'équipement n'est pas sensible aux défauts triphasés correspondant à des baisses avec un niveau de tension maintenu supérieur à 84 %. Si l'on se réfère aux spécifications produits des équipements, il faut en conclure que les variateurs de vitesse constituent les nœuds faibles du procédé. Une des explications possibles pour le fort taux d'apparition des défauts triphasés pourrait être des travaux d'excavation sur un chantier dans le voisinage.

2.4 Zone de vulnérabilité

Le concept de "zone de vulnérabilité" (par exemple [5]) est utilisé pour visualiser le niveau de tension maintenu sur le site, lors d'un court-circuit triphasé à un endroit du réseau. La figure 3 fait apparaître cette zone de vulnérabilité dans le cas d'un court-circuit triphasé symétrique. Puisque ce type de défaut est la cause principale d'interruption du procédé, il n'est pas utile d'utiliser un classement sophistiqué des creux de tension comme cela est fait en [1]. Par exemple : un court-circuit triphasé sur un câble ou un jeu de barres de ce réseau situé dans la zone grisée des 50-75 % provoquera un creux de tension au niveau de l'usine d'extrusion à un niveau de tension maintenu entre 50 et 75 %.

Puisque les variateurs des extrudeuses et des fileuses sont sensibles à des courts-circuits où le niveau de tension maintenu est inférieur à 75 %, nous en concluons qu'une importante partie du réseau de distribution se situe dans la zone de vulnérabilité de la société d'extrusion. Cela sera à considérer lors de la recherche des méthodes curatives.

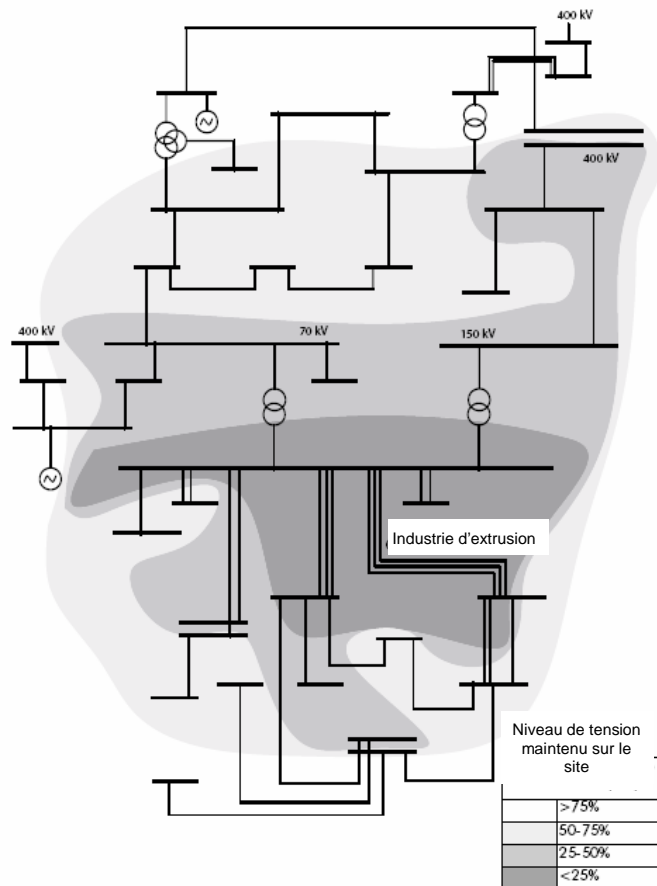


Figure 3 – Zone de vulnérabilité

2.5 Méthodes curatives

Pour la recherche de méthodes curatives, nous nous appuyons sur le schéma blocs présenté en [5] (figure 4).

Les quatre possibilités de la figure sont décrites aux paragraphes suivants.

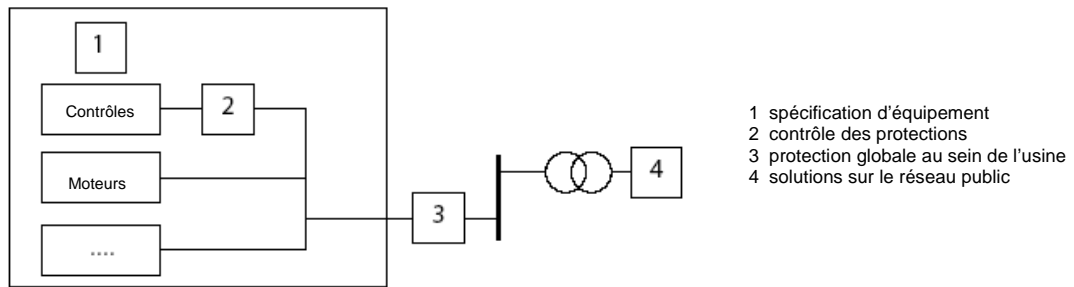


Figure 4 – Solutions pour diminuer les coûts liés aux creux de tension [5]

2.6 Spécifications d'équipements / protection des commandes

Avant de modifier un équipement, il est important de faire l'inventaire de toutes les parties sensibles aux creux de tension. Le fait qu'un des éléments de l'équipement déclenche en premier ne signifie pas que toutes les autres parties sont immunisées contre le phénomène et il reste un risque élevé pour qu'une autre partie de l'équipement reste sujette à défaut une fois la partie la plus sensible protégée. D'après ce qui précède, il est certainement nécessaire de s'intéresser aux variateurs des extrudeuses et des fileuses. Mais il faut rester conscient que la protection de ces variateurs ne garantit pas une diminution significative du nombre d'arrêts dus aux creux de tension car d'autres éléments de l'installation peuvent devenir les maillons faibles.

Un échange avec le constructeur du variateur des fileuses nous a appris qu'il n'était pas possible de modifier le variateur : celui, de conception analogique, nécessitait des modifications physiques si l'on souhaitait changer les caractéristiques des protections. Du fait que le bus DC des variateurs de vitesse est intégré à ces systèmes, il n'est pas possible d'y apporter des modifications, par exemple avec un convertisseur survolté [6] ou une interface active [7]. De plus, le concepteur de la ligne d'extrusion complète nous a informés qu'il était impossible de changer les variateurs pour des raisons de conflits logiciels. Il faut par conséquent renoncer à toute piste curative de ce côté.

2.7 Protection au sein de l'usine

Plusieurs méthodes de protection partielles ou totales du système ont été examinées. Le système complet nécessite la fourniture d'une puissance apparente de 1 625 kVA. 955 kVA sont utilisés pour les besoins de chauffe et nous avons donc étudié la protection du procédé qui contrôle le système. Si seulement une partie du système doit être protégée, un inverseur statique supplémentaire doit être mis en œuvre, comme le montre le schéma d'implantation de la figure 5. Nous avons tout d'abord envisagé l'utilisation d'une alimentation sans interruption (ASI) du type volant d'inertie associée à un moteur diesel.

Nous nous sommes ensuite intéressés à d'autres systèmes ne protégeant que contre les creux de tension et non pas contre les coupures. Des exemples de tels systèmes sont :

- *Rétablisseur dynamique de tension (RDT)* : un RDT se contente de compléter la baisse de tension apparue sur le réseau (voir par exemple. [8]).
- *DySC* : un DySC est un équipement à base d'électronique de puissance constitué d'un correcteur de creux de tension et d'un convertisseur shunt qui procure une immunité contre les creux de tension avec une tension maintenue de 50 % pendant 2 s, ce qui couvre 92 % des creux de tension répertoriés par une étude très complète commandée par EPRI [3].
- *Volant d'inertie* : un volant d'inertie sans moteur diesel protège l'équipement contre les creux de tension aussi longtemps que le volant supporte la charge. La plupart des volants sont capables de conserver l'alimentation sur la charge entre 3 et 15 s, ce qui est suffisant pour se protéger contre les creux de tension mais pas contre les coupures.

Les prix d'achat de toutes les solutions curatives présentées ci-dessus sont du même ordre de grandeur ; cependant, il faut prendre en compte les coûts annuels de maintenance et les dépenses pour les pièces de rechange et, dans ce cas, le DySC est le plus avantageux. Si l'on considère que tous les creux enregistrés ont une tension maintenue qui dépasse 50 %, on peut en conclure que tous les systèmes ci-dessus satisfont au besoin.

Nous avons également examiné la possibilité d'utiliser des ASI pour chaque variateur. Ceci s'est avéré beaucoup plus onéreux que toutes les autres options du fait de la quantité d'électronique de puissance utilisée.

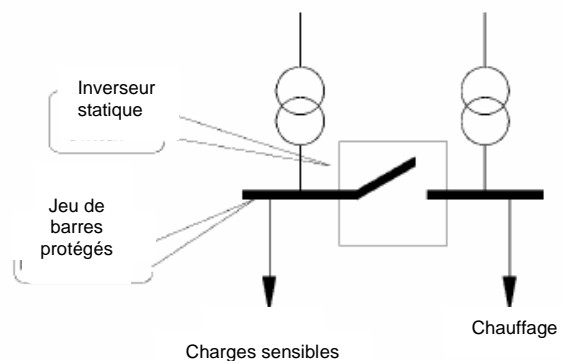


Figure 5 – Protection d'une partie du procédé

2.8 Solution sur le réseau public : modification du réseau électrique

Les arrêts de production peuvent également être évités en modifiant le réseau du voisinage. Nous avons étudié deux possibilités :

- ajouter un groupe électrogène de 10 MW,
- restructurer la configuration du réseau.

L'ajout d'un groupe maintiendra le niveau de tension avec :

$$\Delta U = \frac{S_g}{S_k} \cdot \cos(\alpha - \phi) \cdot 100 \quad [9]$$

où

ΔU est l'accroissement de tension exprimé en % de la tension nominale sur la ligne

S_g est la puissance nominale de l'alternateur

S_k est la puissance de court-circuit

α est la phase de l'impédance de court-circuit

ϕ est la phase du courant fourni par le groupe

La seconde option consiste à changer de lieu de connexion au réseau HT. Dans ce cas, la société serait alimentée depuis un autre point, éloigné du voisinage.

Les deux possibilités sont représentées sur la figure 6.

Si l'on compare la figure 3 et la figure 6a, on en conclut aisément que l'ajout d'un groupe électrogène de 10 MW n'est pas d'une grande utilité. Pourtant, restructurer le réseau (figure 6b) modifiera la zone de vulnérabilité, ce qui garantit la disparition des dommages provoqués par les creux de tension sur le système de distribution 15 kV ; un autre avantage de cette option est que cela assurera non seulement la protection du procédé BCF, mais également celle des deux autres procédés évoqués plus haut (FC et Chauffe).

Du fait que, pour d'autres raisons, des adaptations sur le réseau sont prévues, seul le coût supplémentaire de séparation des deux jeux de barres sont à facturer à la société d'extrusion.

2.9 Analyse économique

Quand on compare les différentes options, deux types de coûts sont à considérer :

- le coût des pertes imputables aux creux de tension, tout en ayant présent à l'esprit que, même si des mesures de protection ont été prises, il subsiste toutefois un risque limité,
- le coût des mesures de protection.

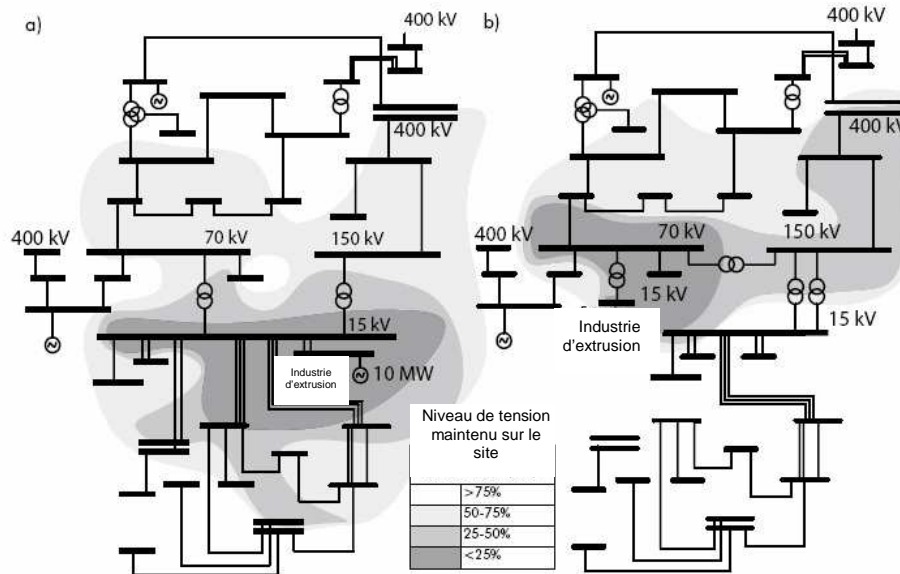


Figure 6 – Zone de vulnérabilité

a) Ajout d'un groupe électrogène 10 MW - b) Modification de la structure du réseau

Quant à savoir si une solution est économiquement efficace, cela dépend également des critères économiques utilisés pour faire l'évaluation. Ceci sera détaillé au chapitre 2 de ce guide. Pour cette étude, nous utilisons la méthode de la Valeur Actuelle Nette, avec un taux de retour d'investissement de 15 % et une durée de vie de l'équipement de 15 ans.

Les résultats calculés du coût total de chacune des options décrites sont présentés dans le tableau 1 dans lequel le coût des pertes avant protection est normalisé à 100 %.

La valeur du reliquat du coût d'interruption de la variante 'A' s'explique par les trois défauts sur le réseau de transmission (figure 2). La valeur du reliquat du coût d'interruption des variantes 'B' à 'E' sont les coûts liés à l'absence de protection des procédés FC et de chauffe.

	Solution	Coût d'interruption (%)	Coût de protection ¹	Coût total
<i>Maintenant</i>	Situation actuelle	100	0	100
<i>A</i>	Restructuration	26	62	88
<i>B</i>	ASI sur tout le FCE (1 625 kVA)	60	303	363
<i>C</i>	ASI sur une partie du FCE (670 kVA)	60	152	212
<i>D</i>	DySC sur tout le FCE (1 625 kVA)	60	109	169
<i>E</i>	DySC sur une partie du FCE (670 kVA)	60	87	147

Tableau 1 : comparaison de différents options de protection (le coût avant protection est de 100 %)

¹ Ces coûts incluent la maintenance et l'entretien, à savoir, annuellement, 5 % du prix d'achat dans le cas d'un ASI et 1 % pour un DySc.

La figure 7 montre que seule l'option de restructuration du réseau est économiquement attractive au regard des critères utilisés.

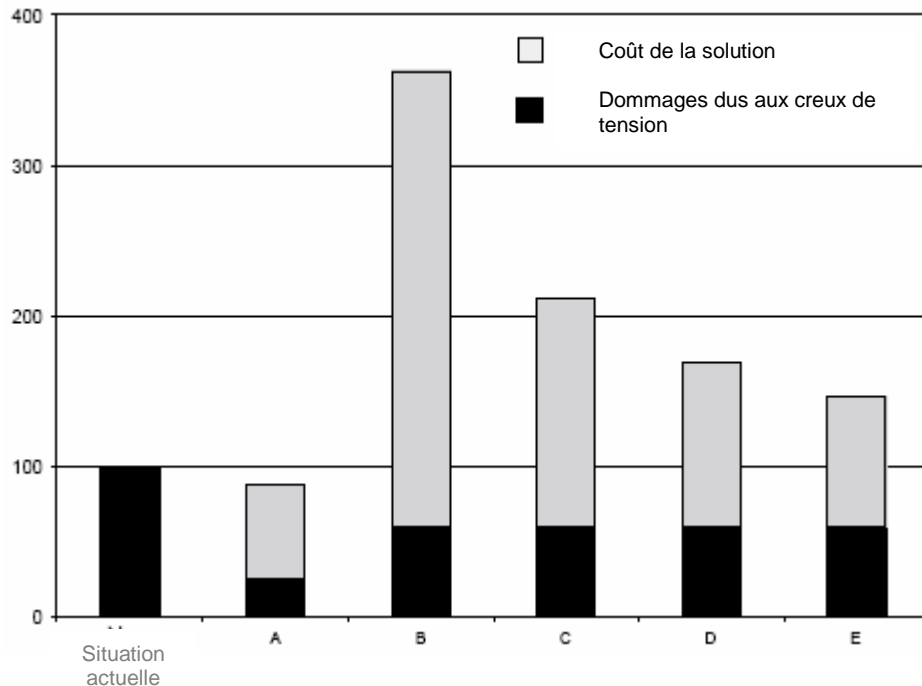


Figure 7 – Coût global des différentes options sur un procédé d'extrusion en Belgique
Coûts exprimés en % du cas de base 'maintenant'. Voir Tableau 1 pour les définitions de A à E.

Bien que certaines sociétés considèrent qu'un projet dont l'horizon à 10 ans est très long pour un tel investissement, la société sur laquelle porte cette étude a décidé de le faire. Ils ont considéré que certains coûts cachés ou indirects n'avaient pas été pris en compte dans les calculs. De tels coûts incluent, par exemple, le mécontentement des personnels dû aux arrêts liés aux creux de tension et une usure prématurée des machines.

Afin de montrer que les conclusions d'une étude de cas sur les creux de tension sont fortement dépendantes du lieu d'implantation, la figure 8 propose une étude de cas réalisée par Electrotek Concepts [2]. Dans cette étude, où le nombre d'arrêts de production annuels avoisinait 15, une restructuration du réseau n'était pas possible. La protection du contrôle des machines et des enrouleuses s'est avérée, ici, l'option la plus économique.

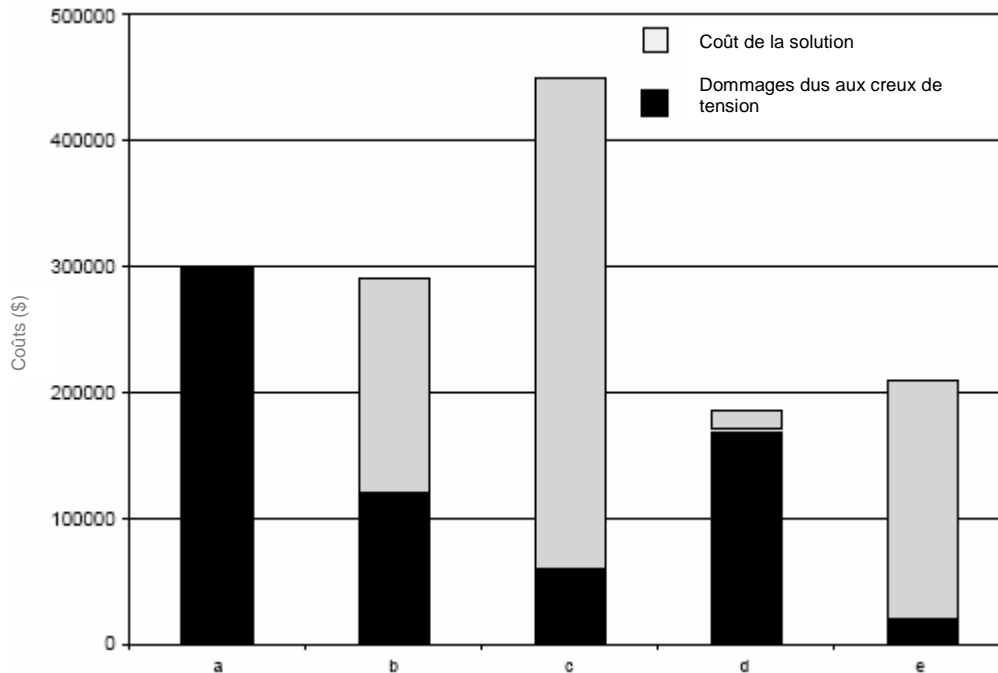


Figure 8 - Coût global des différentes options pour l'étude de cas Electrotek [2]

- a) Cas de base – pas de modifications
- b) Transfert de source statique primaire
- c) Stockage d'énergie en entrée de site (2 MVA)
- d) Protection du contrôle des machines et des enrouleuses
- e) Association du transfert statique et de la protection des contrôles

3 Conclusion

En s'appuyant sur l'exemple d'une usine de textile en Belgique, ce module a fourni les grandes lignes de la réalisation d'une étude de cas sur les creux de tension. Les informations sur le procédé de production doivent être connues, à savoir, son immunité contre les creux de tension, les pertes financières liées à un arrêt de la production et des données sur le nombre annuel de creux. Une fois ces éléments en possession, les possibilités pour limiter ces pertes sont examinées. On peut les classer en trois groupes :

- actions sur le procédé lui-même,
- actions entre le procédé et le réseau d'alimentation,
- actions sur le réseau.

L'immunisation à partir d'actions entre le procédé et le réseau d'alimentation peut être mise en œuvre dans tous les cas, même si les autres types d'actions sont à examiner de façon séparée au cas par cas.

Pour cette étude, il est apparu que les actions sur le procédé lui-même étaient impossibles. Celles entre le procédé et le réseau d'alimentation trop onéreuses et la restructuration du réseau s'est avérée la seule option financièrement viable. L'étude d'un autre procédé d'extrusion, réalisée par Electrotek Concepts, a conclu que la protection du contrôle des machines et des enrouleuses constituait l'option la plus économique.

A partir des études de cas ci-dessus et des discussions qui en ont découlé avec les fabricants de machines d'extrusion, il est possible de tirer quelques conclusions intéressantes supplémentaires :

- les produits standards des fabricants de machines d'extrusion sont à la limite du respect des normes définissant l'immunité contre les creux de tension,
- entreprendre des actions correctives sur les lignes d'extrusion après leur installation est parfois possible. C'est pourquoi, nous recommandons à leurs utilisateurs de se renseigner auprès de leur fournisseur d'énergie et/ou de leur opérateur de réseau pour connaître le nombre et les caractéristiques des creux de tension au cours des dernières années. A partir de ces informations, il est alors possible d'installer des machines ayant le niveau d'immunité requis contre les creux de tension, plutôt que d'acheter des équipements n'ayant peu ou pas de tolérance au phénomène.

4 Références et bibliographies

- [1] D Dorr, M Hughes et al, 1997; Interpreting recent power quality surveys to define the electrical environment; IEEE transactions on industry applications vol. 33 no. 6 pp. 1480-1487
- [2] M McGranaghan, C Melhorn, 1998; Economics of different plant ride-through improvement solutions for power system problems; The Machinery Reliability Conference, Charlotte, USA
(<http://www.pqstore.com/supp/pdf/RideThroughImprovementSolutions.pdf>)
- [3] W Brumsickle, R Schneider et al. 2001; Dynamic Sag Correctors: cost-effective industrial power line conditioning; IEEE Transactions on Industry Applications, vol.37, no.1, Jan/Feb 2001, pp.212-217
- [4] R Epperly, F Hoadley, R Piefer, 1997; Considerations when applying ASDs in continuous processes, IEEE Transactions on Industry Applications, vol.33, no.2, March 1997, pp.389-396
- [5] R Dugan, M McGranaghan, H Beaty, 1996; Electrical Power Systems Quality; McGraw-Hill, Knoxville, USA
- [6] L Morgan, J Dougherty 2001; Embedded energy solutions in CNC-Machines, PQA 2001, Pittsburgh
- [7] A Van Zyl, R Spee, A Faveluke, S Bhowmik, 1998; Voltage sag ride-through for adjustable speed drives with active rectifiers, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 34, No. 6, Nov/Dec
- [8] M Bollen, 1999; Understanding power quality problems, voltage sags and interruptions; IEEE press series on power engineering, Piscataway, USA (ISBN 0-7803-4713-7)
- [9] VDEW, 1994; Technische Richtlinie, 'Parallelbetrieb von Eigenerzeugungsanlagen mit dem Mittelspannungsnetz des Elektrizitätsversorgungsunternehmens'