



20

23-08

T

# LES CONSÉQUENCES MÉCANIQUES DES COURANTS DE COURT-CIRCUIT DANS LES POSTES HAUTE TENSION À CONDUCTEURS FLEXIBLES MÉTHODES NUMÉRIQUES - APPROCHE INFORMATIQUE

Rapport présenté au nom du Comité d'Études 23 (Postes)

by

W. LEHMANN, J. L. LIEN, J. ORKISZ

## RESUME

Cette publication donne un aperçu de l'application de méthodes complexes de calcul numérique pour évaluer les effets mécaniques, conséquences des forces électromagnétiques liées aux courants de court-circuit.

On décrit les paramètres et les résultats qui peuvent être calculés, les modèles mécaniques des conducteurs et structures et les méthodes de calcul utilisées par des programmes ordinateur performants disponibles sur le marché.

Les diverses méthodes sont comparées sur plusieurs bases, notamment la précision, les coûts de calculs, la mémoire requise et la complexité des modèles.

## MOTS-CLES

Analyse de structure non-linéaire, conducteur, différence fine, élément fini, faisceau, force, électrodynamique, poste.

## I INTRODUCTION

### 1.1 Description du problème

La majeure partie des postes HT et EHT possèdent des jeux de barres en conducteurs flexibles, simples ou en faisceaux (Fig. 1).

Les conducteurs flexibles sont soumis à de grands déplacements et à des tensions mécaniques élevées quand ils sont parcourus par des courants de court-circuit de forte intensité. L'évaluation des effets mécaniques dans de telles situations, par des méthodes numériques suffisamment précises pour satisfaire les techniques de l'ingénieur, fait l'objet de cette publication. C'est un problème très complexe qui peut difficilement être résolu par des méthodes simplifiées. Ce problème est une des préoccupations du groupe de travail 23-02 de la CIGRE et a conduit à la publication présente; trois autres suivront:

- Les déplacements des conducteurs et le

choix des distances d'isolement dans l'air, spécialement pour les conducteurs de type A et D représentés sur la Figure 1;

- Les contraintes pour le jeu de barres tendu A;

- Les contraintes pour les liaisons de type C.

Ces papiers seront fondés sur de nombreux tests et recherches [1-4]. Ils résumeront les méthodes de calcul, ce que l'on peut espérer trouver à partir de considérations analytiques telles que le modèle pendule, qui ne nécessite pas l'usage d'un ordinateur. Ces méthodes seront relativement simples mais d'un autre côté, elles:

- peuvent seulement donner une approche des résultats;

- sont formulées pour des dispositions bien spécifiques;

- ne peuvent fournir à l'utilisateur toutes les informations souhaitables, telle la distribution temporelle des valeurs désirées.

Des lors, il est important de disposer, en plus de tests en vraies grandeurs, de méthodes de calcul qui puissent fournir la variation dans le temps des déplacements, forces et moments de tous les composants des postes tels que les conducteurs, les fixations, les isolateurs, les structures en acier, les fondations. Du point de vue mécanique, suite à la

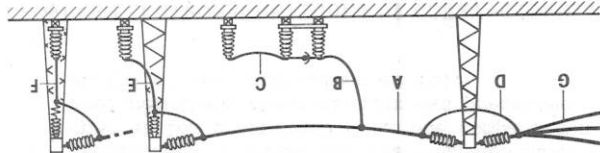


Fig. 1 Disposition classique des conducteurs flexibles dans les postes à ciel ouvert

- A Jeu de barres horizontal tendu, relié aux structures en acier par des chaînes d'isolateur
- B Connexion verticale (dérivation)
- C Connexion entre composants
- D Connexion entre portées adjacentes
- E Dérivation en bout de portée
- F Dérivation tendue en bout de portée
- G Connexion tendue en câble mais non parallèle comme A

Notons que (2) n'est pas réciproque, cela est lié au fait que l'on ne considère que des éléments de conducteur. La force doit être calculée pour chaque paire d'éléments que l'on désire considérer; il est bien sûr possible d'avoir deux éléments du même conducteur.

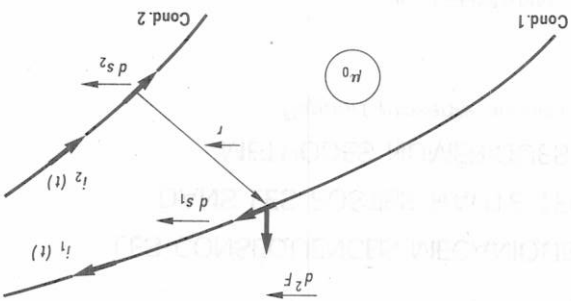


Fig. 2 Force électromagnétique  $d^2F$  agissant sur  $ds_1$  placée dans le champ magnétique créé par  $ds_2$  ( $H_0$  constante magnétique)

L'équation (1) montre que l'intensité locale de la force sur le conducteur 1 est le produit d'une fonction spatiale  $k$  que nous allons discuter.

La dépendance temporelle est liée à l'évaluation du courant de court-circuit, qui s'écrit habituellement sous la forme:

$$i(t) = \sqrt{2} I_{eff} [\sin(\omega t - \gamma + \phi) + e^{-t/\tau} \sin(\gamma - \phi)] \quad (3)$$

où:

- $f = \omega/2\pi$  est la fréquence du courant
- $\sqrt{2} I_{eff}$  est la valeur de crête du courant permanent de court-circuit
- $\gamma = \arctg X/R$  est l'angle de l'impédance
- $\phi$  est un angle lié à l'instant d'apparition du défaut
- $\tau = X/(wR)$  est la constante de temps du réseau vue du défaut (elle peut varier de 30 ms (en ligne) à 150 ms (près d'un groupe générateur))

La fonction temporelle résultante  $i_1(t) \cdot i_2(t)$  dépend du type de court-circuit considéré:

biphase ou triphase.

C'est toujours une superposition de trois composantes: une pseudo-continue et deux pseudo-périodiques de fréquences  $f$  et  $2f$  [19].

La distribution spatiale, dans un contexte élémentaire, la distribution des forces peut se calculer numériquement d'une manière consistante sur un modèle mécanique [10, 11]. Cela peut se faire également par l'approche différence finie [7, 8, 12]. Une autre possibilité est d'évaluer l'influence de chaque élément par des considérations analytiques comme décrit en [13].

L'intégration de la force sur l'ensemble des câbles s'effectuera en tenant compte que:

La distribution spatiale des forces est dépendante du mouvement des câbles, qui ont une fréquence de débattement beaucoup plus faible que  $f$ ; il n'est pas nécessaire de remettre à jour le facteur  $k$  à chaque pas de temps du processus d'intégration temporelle.

très faible probabilité de tels défauts, il est impératif de pouvoir évaluer leurs conséquences avec une précision suffisante de manière à adapter le coefficient de sécurité des méthodes de discrétisation utilisables grâce aux ordinateurs de grande capacité sont toutes adaptées à ce genre de tâches. De nos jours, l'utilisation d'un ordinateur n'est pas bon marché mais peut se justifier, surtout si les effets mécaniques des courts-circuits constituent le facteur principal dans la conception des postes à conducteurs flexibles, suite à l'accroissement des valeurs de ces courants de défaut.

1.2 Etat de la question en calculs informatiques Récemment, l'analyse de structures complexes a été possible grâce à l'utilisation des calculateurs électroniques sur des modèles discretes. L'évaluation précise des effets mécaniques (déplacements, contraintes) causés par les courants de court-circuit dans les postes à conducteurs flexibles et en faisceau n'est cependant pas un problème simple. On ne peut le résoudre d'une manière satisfaisante par l'application directe d'un programme général disponible sur le marché, mais on peut bien sûr les adapter, par ex. ADINA [5].

D'un autre côté, quelques tentatives existent sur la mise au point de programmes spécialement adaptés aux calculs des effets des courants de court-circuit [6 - 10]. Bien qu'une approche discrète, numérique permette une meilleure simulation de la structure réelle que dans l'importation de la méthode simplifiée, les programmes diffèrent l'un de l'autre aussi bien par le modèle physique que par les méthodes mathématiques utilisées.

1.3 But et contenu de la présente publication

Le présent papier fournit aux ingénieurs de conception une information succincte à propos de l'application de méthodes numériques avancées pour l'évaluation des effets mécaniques des courants de court-circuit dans les postes EHT. On discute spécialement des questions suivantes:

- que peut-on calculer ?
- quelles méthodes préférer ?
- quels sont les programmes disponibles les plus performants ?
- quel est le "coût" de tels calculs ?

Dans les paragraphes suivants, on discute des forces électromagnétiques de court-circuit (2) et puis l'on décrit les modèles mécaniques structureaux (3) ainsi que les méthodes numériques et les programmes (4). Une comparaison avec résultats expérimentaux est présentée en (5) et les conclusions en (6).

## 2 FORCES ELECTROMAGNETIQUES DE COURT-CIRCUIT

Un conducteur électrique parcouru par un courant  $i_1(t)$  et placé dans un champ magnétique créé par un conducteur parcouru par un courant  $i_2(t)$  est soumis à une force électromagnétique définie par la formule (Fig. 2):

$$d^2F = i_1(t) \cdot i_2(t) \cdot k \quad (1)$$

$$k = \frac{4\pi}{\mu_0} \cdot \frac{ds_1 \cdot ds_2}{r^3} \cdot \frac{ds_1 \cdot V \times r}{ds_2 \cdot V \times r} \quad (2)$$

avec  $V$  représente le produit vectoriel.

câbles et des corps rigides. Nous distinguons deux types de "barre": la barre proprement dite et la poutre.

Les éléments barres sont droits et ne peuvent reprendre que des forces axiales (traction ou compression). Ils sont reliés par des articulations.

Les éléments poutres peuvent transmettre des forces et des moments, c.à.d. qu'en plus des forces axiales, ils peuvent transmettre la flexion et la torsion.

Dans les calculs, les éléments barres sont caractérisés par leur section droite, leur masse volumique, le module de Young et le coefficient de Poisson. Pour les éléments poutres, il faut fournir en plus les moments d'inertie en flexion et torsion.

Dans les postes, on rencontre des conducteurs (simple ou en faisceau), des isolateurs, des structures supports (portique, tour d'acier, appareils, fondations) et quelques autres arrangements tels que les bretelles entre portées voisines ou les dériviations.

Les conducteurs sont le principal atout du succès du modèle mécanique du poste. Sous l'influence des forces dues au court-circuit, ils se comportent d'une manière hautement non-linéaire suite aux grands déplacements et à la modification rapide de la géométrie au voisinage des entretoises (Fig. 4). Les conducteurs sont modélisés par un ensemble d'éléments câbles tendus qui forment ainsi une chaîne d'éléments câbles de degrés requis. Les isolateurs sont rigides ou semi-rigides. Les bretelles et dériviations, si elles sont prises en compte, sont également modélisées comme des câbles, ou au moins remplacées par des masses concentrées. D'habitude, on rencontre des faisceaux de conducteur (Fig. 4); les entre-

toises sont modélisées par des barres. Les structures supports sont représentées par un réseau tridimensionnel de poutres ou de barres. Comme leurs déplacements sont relativement faibles, leur comportement peut être étudié par une théorie linéaire, par contre

Les contributions élémentaires dues aux éléments éloignés décroissent en  $1/r$  et on peut stopper l'intégration quand la contribution incrémentale relative est inférieure à une tolérance donnée.

### 3.1 Description sommaire de structures classiques

Une structure réelle comprend des jeux de barres avec un seul conducteur ou un faisceau par phase, des chaînes d'isolateurs, des portiques, des appareils, des sous-structures, des fondations. Les jeux de barres représentés à la Figure 3 sont prévus pour 6000 A et les arrivées aux deuxième et troisième niveaux pour 3000 A. Par conséquent, pour les jeux de barres, on utilise des faisceaux de 4 conducteurs, 1045/45 mm<sup>2</sup> ACSR, et pour les conducteurs d'aménage des faisceaux de deux (Fig. 4). Les barres sont reliées aux portiques par des chaînes d'isolateur en V qui ne permettent qu'un déplacement axial. Les isolateurs sont soit de type capot-tige (en verre ou en porcelaine), avec beaucoup d'éléments (Fig. 4), soit de type long fut (en porcelaine), avec peu d'éléments. En ce qui concerne les portiques d'ancrage, on rencontre plus souvent des structures en treillis plutôt que des poutrelles en I. La partie inférieure des structures supports, qui doivent seulement résister à des charges verticales, peut être articulée. Les fondations sont conçues pour reprendre les charges statiques prévues, mais elles ne restent pas fixes si l'appareil des efforts de court-circuit importants. En ce qui concerne les appareils, il faut faire très attention à la réduction de la raideur suite aux accouplements. Par exemple, un assemblage de plusieurs isolateurs est plus élastique qu'une colonne en porcelaine. Afin d'effectuer le calcul dans des conditions optimales, la disponibilité de valeurs mesurées telles que le coefficient statique (déplacement en tête pour une force donnée), est souvent impérative.

### 3.2 Modèle mécanique utilisé dans les calculs

Dans les calculs, la structure réellement existante ci-dessus est remplacée par une idéalisation que l'on appelle modèle mécanique. Ce dernier contient des barres (au sens mécanique), des

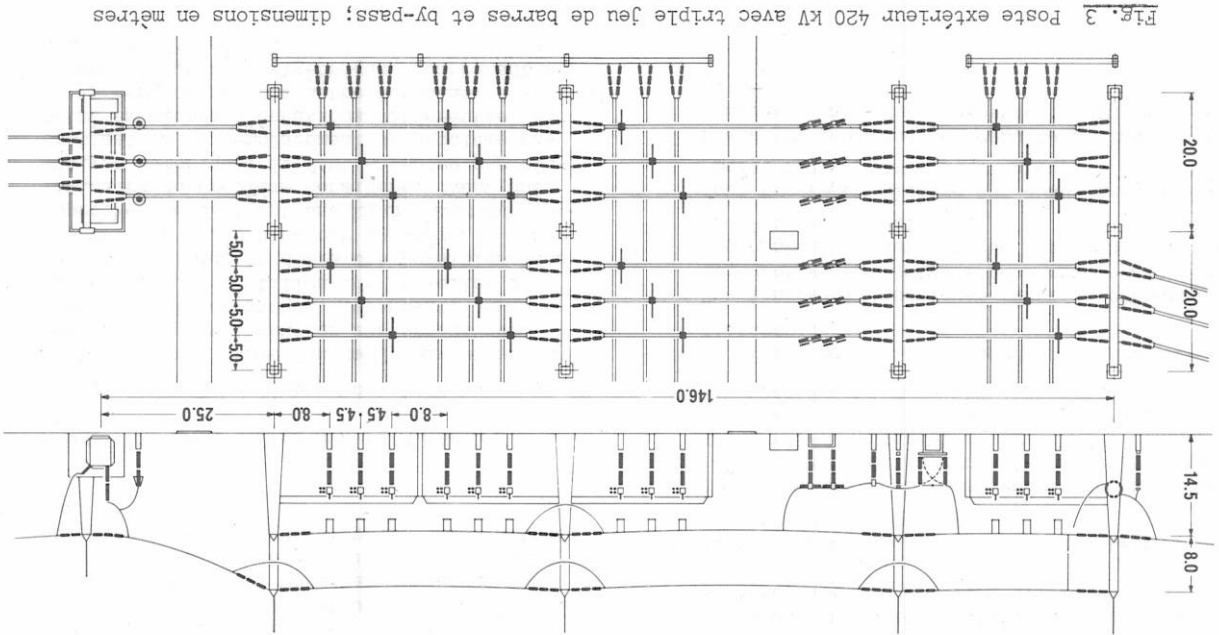


Fig. 3 Poste extérieur 420 kV avec triple jeu de barres et by-pass; dimensions en mètres

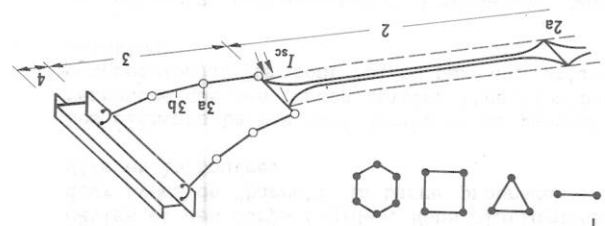


Fig. 4 Conducteurs en faisceau

- 1 arrangements habituels: 2, 3, 4 et 6 conducteurs
- 2 faisceau horizontal avec 2 conducteurs
- position normale
- position en présence du courant de court-circuit IS
- 3a modèle de chaîne d'isolateur
- 3b élément, par ex. barre rigide
- 4 structure support, par ex. éléments de barres déformables

Le mouvement des conducteurs fait appel à une théorie non-linéaire.

Un modèle mécanique valable d'un poste ne doit pas seulement permettre les grands déplacements des câbles (théorie non-linéaire), mais également tenir compte des effets des hauteurs-encastres, articulé (notamment pour les fondations), et des conditions de service telles que le type et la durée du court-circuit, avec ou sans renouveau, forces électromagnétiques de court-circuit réellement existantes.

Un problème important est la connaissance exacte de la mise en charge du système par les forces électromagnétiques de court-circuit. Elles proviennent de l'interaction entre conducteurs du même faisceau et de l'influence des autres phases. De plus, ces interactions dépendent significativement de la configuration instantanée des conducteurs, ce qui revient à dire qu'il existe un couplage entre les effets mécaniques et électromagnétiques.

En définitive, suite au caractère de la mise en charge et du comportement non-linéaire des conducteurs, ce problème de mécanique des structures doit se traiter par théorie non-linéaire dynamique des structures en câbles. De tels théories et méthodes de calcul dans le cas général de la dynamique non-linéaire des structures sont développées entre autres dans [5, 14, 15].

### 4 METHODES INFORMATIQUES ET PROGRAMMES

#### 4.1 Aperçu général de l'approche numérique

Pratiquement, toutes les méthodes de calcul peuvent être implémentées sur ordinateur. L'approche informatique, cependant, est caractérisée par l'utilisation de celles qui laissent le plus de décisions possibles dans les calculs à l'ordinateur lui-même. De telles approches nécessitent une discrétisation préalable du problème considéré. Dans une analyse numérique, il faut entendre par discrétisation le remplacement du problème ex-prime en termes d'équations différentielles ou intégrales par une autre formulation en termes d'équations algébriques comprenant des quantités discrètes.

En dynamique des structures, il y a une discrétisation dans l'espace et une autre dans le temps. Actuellement, pour la discrétisation dans l'espace, les méthodes des éléments finis (mf) ou de différences finies (mff) sont le plus souvent appliquées, tandis que la discrétisation temporelle est effectuée par différentes méthodes d'intégration (mi) telles que Newmark [16], Wilson [14], etc...

L'équation dynamique du système discret est de la forme:

$$K u + C \dot{u} + M \ddot{u} = R(t) \quad (4)$$

où  $K = K(u)$ ,  $C = C(\dot{u})$  et  $M = M(\ddot{u})$  sont respectivement les matrices de raideurs, d'amortissement et de masse,  $u$  et  $\dot{u}$  les vecteurs déplacement et vitesse. Habituellement, la solution numérique est obtenue par une méthode pas-à-pas. À chaque pas, on doit résoudre un système d'équations algébriques non-linéaire. Un temps de calcul important est des lors requis, puis, qu'il est nécessaire d'effectuer usuellement des centaines de pas de temps [14], ce qui présente une description détaillée des procédures de solutions numériques dans les systèmes EF.

Pour l'utilisateur, les questions principales sont les possibilités et le prix de l'approche informatique. Ces principaux avantages sont: la possibilité de considérer des modèles relativement complexes et suffisamment précis pour approcher d'une manière satisfaisante la réalité.

Des solutions valables peuvent être obtenues dans des cas que l'on ne peut traiter par des méthodes simplifiées (ni par des expérimentations, le cas échéant) telles que des structures de nouveau type avec une modification significative de certains paramètres.

Les résultats peuvent être fournis sous forme de distribution dans le temps pour n'importe quelle quantité par ex. les déplacements  $u(t)$ , les contraintes  $\sigma(t)$  en quelque endroit que ce soit de la structure. Et ceci n'est possible par aucune autre méthode de calcul.

Ces mêmes résultats peuvent être présentés sous forme graphique directement exploitable par un ingénieur de conception; si le centre de calcul est bien équipé, les techniques interactives peuvent être utilisées.

Il y a cependant quelques désavantages à l'approche informatique:

Le calcul des problèmes dynamiques est assez coûteux. Il faut en général compter en heures CPU sur les ordinateurs actuels de classe moyenne pour obtenir des résultats valables sur une période de quelques secondes.

Les résultats ne sont pas disponibles immédiatement.

Une longue et laborieuse tâche de préparation des données est requise pour chaque problème, une génération automatique des données permet une économie précieuse.

Tout programme élaboré est considéré comme une "boîte noire" par l'utilisateur.

L'analyse critique des résultats finaux sera confiée à un homme d'expérience dans le domaine.

Tableau 1 Comparaison de quelques programmes performants analysant les effets mécaniques des courants de court-circuit dans les postes avec conducteurs flexibles

PROGRAMMES	INFORMATIONS GENERALES				CONDUCTEURS ET CHAINES D'ANCRAGE				STRUCTURES SUPPORTS			CHARGES							
	programme développé et disponible à	références	génération de données: manuelle = 1 automat. = 2	discretisation temporelle: explicite = 1 implicite = 2	pas de temps: optionnel = 1	amortissement: optionnel = 1 nul = 0	résultats (sur listes d'ordinateur et/ou sous forme graphique): déplacements et contraintes en tous points = 1	caractéristiques informatiques	masses:	éléments	éléments spatiale: différences finies = 2	structures de type A (Fig. 1): poutrelles en acier, de forme arbitraire = 1 barres, structure entière équivalent structure (condensation) = 2 = 3	appareillage de type C (Fig. 1) optionnel = 1 nul = 0	discretisation spatiale: éléments finis = 1 différences finies = 2	Forces électrodynamiques distribuées (Biot-Savart) = 1 interaction: entre phases dans le faisceau = 2 = 3 = 4	charges statiques: gravité = 1 glace = 2 vent = 3	autres charges dynamiques, par ex. tremblements de terre = 1		
PROGRAMMES	M.I.T. Cambridge (USA)	[5], [6]	1, 2	1, 2	1	1	code FORTRAN = 1	mémoire centrale min. 350 KB	1, 2	éléments transmettant unid. Forces axiales = 1 matière optionnelle, par ex. élast. ou plast. = 2 élastique linéaire = 3 isolateur non extensible = 4 échauff. de court-circuit = 5	disposition par phase simple = 1 double = 2 multiple = n conduct. = 3 faisceaux avec entretoises = 4 avec contact pendant court-circuit = 6 connexion entre portées = 5 dériviations	déplacements: grande amplitude (non linéaire) = 1 faible amplitude (linéaire) = 2	éléments finis = 1 différences finies = 2	structures de type A (Fig. 1): poutrelles en acier, de forme arbitraire = 1 barres, structure entière équivalent structure (condensation) = 2 = 3	appareillage de type C (Fig. 1) optionnel = 1 nul = 0	discretisation spatiale: éléments finis = 1 différences finies = 2	Forces électrodynamiques distribuées (Biot-Savart) = 1 interaction: entre phases dans le faisceau = 2 = 3 = 4	charges statiques: gravité = 1 glace = 2 vent = 3	autres charges dynamiques, par ex. tremblements de terre = 1
ADINA	Université de Liège (Belgique)	[5], [6]	1, 2	1, 2	1	1	code FORTRAN = 1	min. 256 KB	1, 2	éléments transmettant unid. Forces axiales = 1 matière optionnelle, par ex. élast. ou plast. = 2 élastique linéaire = 3 isolateur non extensible = 4 échauff. de court-circuit = 5	disposition par phase simple = 1 double = 2 multiple = n conduct. = 3 faisceaux avec entretoises = 4 avec contact pendant court-circuit = 6 connexion entre portées = 5 dériviations	déplacements: grande amplitude (non linéaire) = 1 faible amplitude (linéaire) = 2	éléments finis = 1 différences finies = 2	structures de type A (Fig. 1): poutrelles en acier, de forme arbitraire = 1 barres, structure entière équivalent structure (condensation) = 2 = 3	appareillage de type C (Fig. 1) optionnel = 1 nul = 0	discretisation spatiale: éléments finis = 1 différences finies = 2	Forces électrodynamiques distribuées (Biot-Savart) = 1 interaction: entre phases dans le faisceau = 2 = 3 = 4	charges statiques: gravité = 1 glace = 2 vent = 3	autres charges dynamiques, par ex. tremblements de terre = 1
SAMCEF-CABLE	Université de Cracovie (Pologne)	[7], [8], [12], [18]	1, 2	1, 2	1	0	1	1	1, 2	éléments transmettant unid. Forces axiales = 1 matière optionnelle, par ex. élast. ou plast. = 2 élastique linéaire = 3 isolateur non extensible = 4 échauff. de court-circuit = 5	disposition par phase simple = 1 double = 2 multiple = n conduct. = 3 faisceaux avec entretoises = 4 avec contact pendant court-circuit = 6 connexion entre portées = 5 dériviations	déplacements: grande amplitude (non linéaire) = 1 faible amplitude (linéaire) = 2	éléments finis = 1 différences finies = 2	structures de type A (Fig. 1): poutrelles en acier, de forme arbitraire = 1 barres, structure entière équivalent structure (condensation) = 2 = 3	appareillage de type C (Fig. 1) optionnel = 1 nul = 0	discretisation spatiale: éléments finis = 1 différences finies = 2	Forces électrodynamiques distribuées (Biot-Savart) = 1 interaction: entre phases dans le faisceau = 2 = 3 = 4	charges statiques: gravité = 1 glace = 2 vent = 3	autres charges dynamiques, par ex. tremblements de terre = 1
STANAN			1, 2	1, 2	1	1	1	2	1, 2	éléments transmettant unid. Forces axiales = 1 matière optionnelle, par ex. élast. ou plast. = 2 élastique linéaire = 3 isolateur non extensible = 4 échauff. de court-circuit = 5	disposition par phase simple = 1 double = 2 multiple = n conduct. = 3 faisceaux avec entretoises = 4 avec contact pendant court-circuit = 6 connexion entre portées = 5 dériviations	déplacements: grande amplitude (non linéaire) = 1 faible amplitude (linéaire) = 2	éléments finis = 1 différences finies = 2	structures de type A (Fig. 1): poutrelles en acier, de forme arbitraire = 1 barres, structure entière équivalent structure (condensation) = 2 = 3	appareillage de type C (Fig. 1) optionnel = 1 nul = 0	discretisation spatiale: éléments finis = 1 différences finies = 2	Forces électrodynamiques distribuées (Biot-Savart) = 1 interaction: entre phases dans le faisceau = 2 = 3 = 4	charges statiques: gravité = 1 glace = 2 vent = 3	autres charges dynamiques, par ex. tremblements de terre = 1

4.2 Programmes opérationnels

Nous présentons ci-dessous très brièvement quelques programmes performants pour l'analyse numérique des effets mécaniques dans les postes, dus aux courants de court-circuit. La figure 5 montre une disposition typique qui peut être traitée plus ou moins par chacun de ces programmes. Pour la comparaison des hypothèses faites, des méthodes de discrétisation utilisées et les champs de possibilités offertes à l'utilisateur par chacun des programmes, on se référera au tableau 1.

5 CAS TEST

De manière à mettre en évidence les possibilités des méthodes numériques, nous présentons une disposition classique de poste qui a été testée à LABORELEC (Belgique) et analysée par ADINA, SAMCEF et STANAN.

La Figure 5 montre la structure étudiée et fournit quelques données de base. Il est à noter que de nombreuses mesures ont été relevées pour la validation des données; on a notamment remarqué que certains éléments des structures (nos 7 et 8 de la Fig. 5) avaient seulement 2/3 de leur raidleur théorique. Fournir par les données du profil. On en a tenu compte dans SAMCEF et STANAN en ajoutant les raidleurs des colonnes, et dans ADINA en ajoutant une raidleur aux fondations. A part ce fait, les autres hypothèses sont identiques pour les calculs; on signalera cependant que la version actuelle de STANAN ne peut pas prendre en considération les dérivations; les données ont dès lors été ajustées pour assurer la symétrie entre les deux phases dans ce cas.

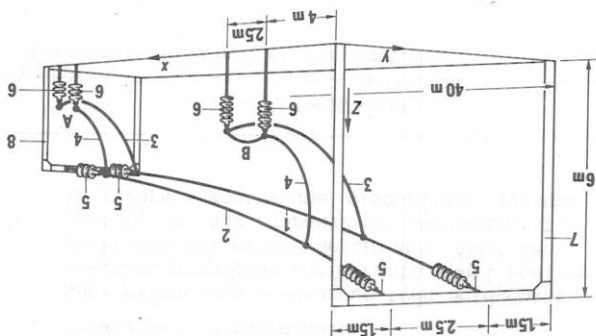


Fig. 5 Section d'un poste extérieur, testé à LABORELEC avec un courant  $I_{eff} = 29.4$  kA (Crête =  $72.7$  kA), une constante de temps  $T = 0.033$  s, une durée de court-circuit de  $0.8$  s, en A l'amorçage du courant et en B la connexion de court-circuit.

- 1...4 conducteur simple de  $324$  mm<sup>2</sup> composé de 19 brins de cuivre
  - 1 portée est, tension initiale  $7.85$  kN
  - 2 portée ouest, tension initiale  $7.65$  kN
  - 3 dérivations de  $5.6$  m de longueur
  - 4 dérivations de  $4.0$  m de longueur
  - 5 armement se composant d'un dispositif de  $l = 1.4$  m,  $m = 8$  kg, EA =  $18 \cdot 10^6$  N; et d'une chaîne d'isolateur de  $l = 1.54$  m,  $m = 52.3$  kg, EA =  $30 \cdot 10^6$  N
  - 6 isolateurs C8-750 (norme CEI) sur fondation rigide, hauteur totale  $2.3$  m
  - 7 portique nord
  - 8 portique sud
- colonnes HE-B260 EUROFORM 53-62  
traverses HE-B240 EUROFORM 53-62  
masse additionnelle aux coins  $62.2$  kg

telle concordance est influencée par la simplicité relative de la structure examinée et le fait qu'il y avait un seul conducteur par phase au lieu d'un faisceau.

5.2 Interprétation des résultats

Les résultats obtenus par voie numérique sont: utiles et dans certains cas (les structures à non habituelles, les nouvelles structures à reproduire en grand nombre) sont à la base de la conception du poste concerné, une aide dans la compréhension des phénomènes inhérents au court-circuit, une source d'idée pour l'établissement de méthodes simplifiées, indispensables pour une étude paramétrique. Sur la base des résultats obtenus sur l'exemple présenté aux figures 6 à 10, nous voudrions faire quelques observations générales qui sont égales-ment le fruit d'autres résultats non repris ici.

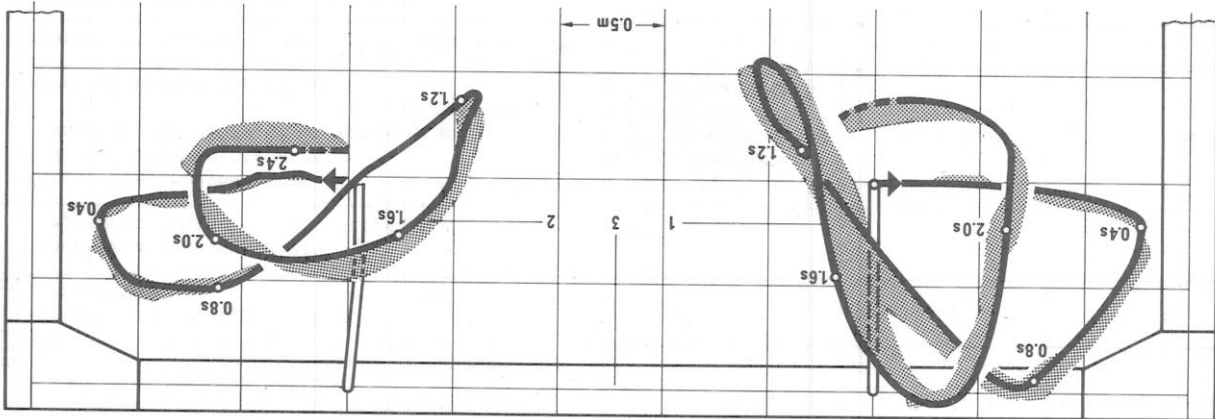


Fig. 6 Déplacements des conducteurs au milieu de la portée. Courbes expérimentales avec bandes de divergence des résultats numériques. 1 conducteur ouest, 2 conducteur est, 3 portique nord à l'arrière-plan

- 5.1 Vérification des résultats
- Il faut tout d'abord signaler que:
    - Les résultats de tests sont fiables; en effet, on a répété le même test plusieurs fois et les appareils de mesure étaient bien calibrés
    - Les enregistrements n'ont pu être relevés qu'en quelques points et les comparaisons en resteront limitées à ces 6 points (Fig. 6 à 10).
  - Les diagrammes montrent une excellente concordance entre les résultats expérimentaux et ceux obtenus par voie numérique.
- On peut justifier les différences de comportement des deux phases par la présence des dérivations. Il faut noter toutefois qu'une

- Le coût des tests s'accroît rapidement avec la complexité de l'exemple.
- avec des structures simples, il est plus aisé de saisir la physique du phénomène

Si l'on regarde l'évolution des contraintes depuis l'ancrage jusqu'aux fondations, le filtrage des hautes fréquences est peu impor-

absolus (coup de fouet).  
 même instant, qui sont souvent les maxima mais elle cause également des contraintes au près du premier point de retour de la flèche, d'isolement entre phases à un minimum situé du cas test, n'amène pas seulement la distance d'important pour l'énergie élastique des conducteurs. Une durée défavorable, comme celle La durée du court-circuit est un paramètre

Les premières crêtes de la tension dans les conducteurs et les moments de flexion dans les colonnes correspondent au premier déplacement horizontal maximum, qui peut atteindre une valeur beaucoup plus élevée que la flèche verticale initiale, principalement suite à l'échauffement, à l'élasticité du conducteur et à la rigidité des portiques d'ancrage sous l'effet des forces de court-circuit.

Fig. 9 Fortique nord; moment de flexion dans la colonne est à  $Z = 0,78$  m de la base  
 Lignes fines: courbes expérimentales de LABORELFC  
 1 ADINA, 2 SAMCEF

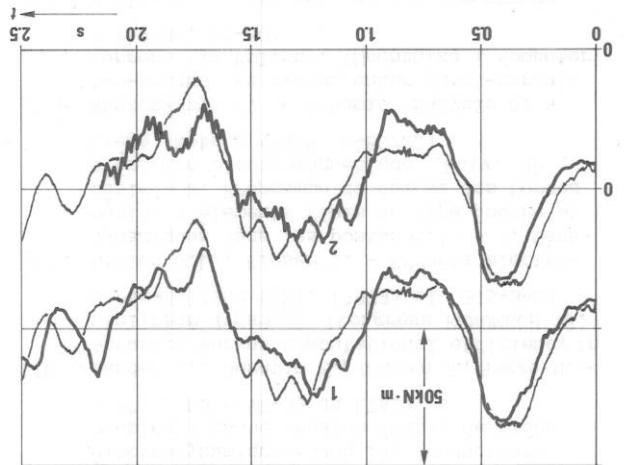
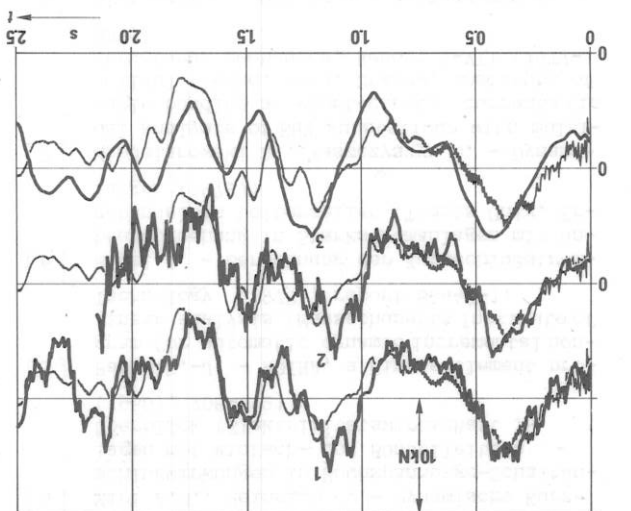


Fig. 7 Tension dans le conducteur est.  
 Lignes fines: courbes expérimentales de LABORELFC  
 1 ADINA, 2 SAMCEF, 3 STANAN



tant vu la faible inertie des portiques, ce qui n'est pas toujours le cas en général, par ex. pour les isolateurs supports aux points d'ancrage.  
 Si les déplacements des conducteurs principaux ne tendent pas complètement les dérivations, les contraintes sur les appareils sont modérées, D'autres tests et calculs sont nécessaires pour vérifier si ces dernières remarques restent valables si les postes sont équipés avec des faisceaux plutôt qu'avec un seul conducteur par phase. Cependant, il faudra reconstruire à plusieurs reprises les calculs et l'interprétation de l'influence des paramètres des faisceaux, Le nombre des entretoises, etc... jusqu'à ce que l'approche in-formatique soit à un niveau comparable aux excellents mais très onéreux tests [1].

Fig. 10 Fortique nord; moment de flexion dans la colonne ouest à  $Z = 0,78$  m de la base  
 Lignes fines: courbes expérimentales de LABORELFC  
 1 ADINA, 2 SAMCEF

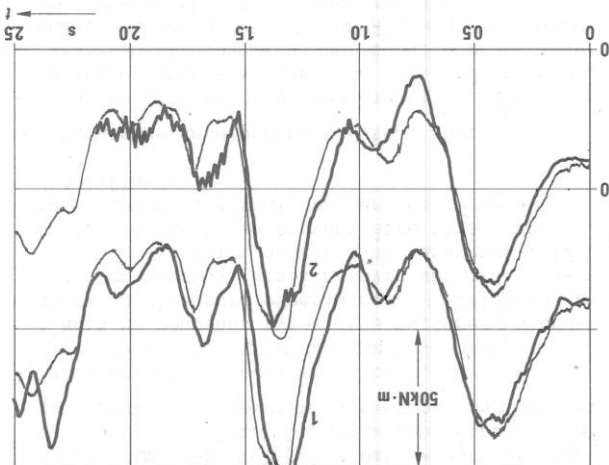
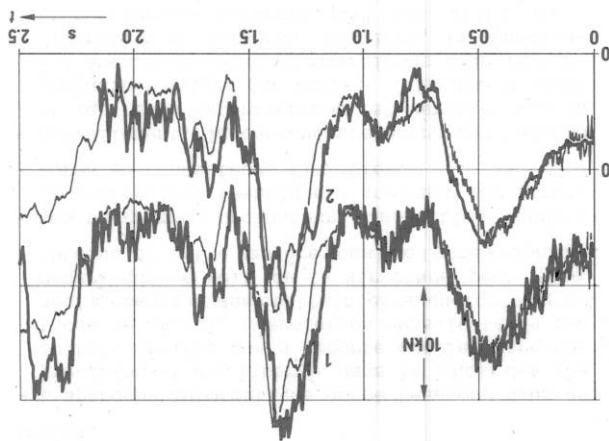


Fig. 8 Tension dans le conducteur ouest  
 Lignes fines: courbes expérimentales de LABORELFC  
 1 ADINA, 2 SAMCEF



6 CONCLUSIONS

Résumons "l'état de la question" du problème traité.

- L'approche informatique donne beaucoup plus de précision et de liberté dans le choix des résultats des algorithmes que n'importe quelle autre méthode de calcul. L'évolution dans le temps des déplacements et des contraintes en quelque endroit obtenu de cette manière sous une forme graphique. Les programmes ordinateur disponibles donnent la possibilité technique d'analyser les structures en conducteurs flexibles.

- Actuellement, la concordance entre les calculs et les tests expérimentaux est vérifiée pour un conducteur unique par phase; il faudra obtenir à l'avenir de telles comparaisons pour la configuration en faisceau. Des lors, la dénomination "approche informatique" est plutôt une aspiration qu'une réalisation pratique d'une bonne concordance entre la réalité et les calculs. Ceci dit, les programmes introduits - pour autant que la modélisation de la structure soit adéquate - satisfait les exigences souhaitées en matière de conception des postes. L'approche informatique peut des lors être considérée de nos jours comme très utile; elle est souvent le seul outil de calcul possible, qui ne peut être utilisée que par des ingénieurs de conception expérimentés.

- Suite au temps requis et au coût, les calculs numériques sont opportuns surtout quand il s'agit de nouveaux types de structures à reproduire en plusieurs exemplaires, et également sur d'anciens configurations avec une modification significative de certains paramètres, là où les résultats ne peuvent être fixés avec suffisamment de précision par des méthodes simplifiées.

Les thèmes de développement futurs sont: - d'autres comparaisons expérimentales; les tests en vraies grandeurs sur site sont très onéreux, spécialement dans le cas des conducteurs en faisceau; néanmoins, le G102 du CR23 espère obtenir de nouveaux résultats expérimentaux

- L'amélioration de la qualité, de l'efficacité, de la souplesse d'adaptation des programmes de calcul, l'accroissement de l'automatisme de la génération de données, l'utilisation des techniques interactives, l'accroissement de la rapidité des calculs et plus d'agrement dans la partie post-processus

- une enquête sur les possibilités générales d'application de la méthode informatique; des études paramétriques devront également être menées et, éventuellement, l'établissement de quelques méthodes simplifiées et fiables comme on a pu le faire dans le cas des jeux de barres rigides [19].

7 REFERENCES

[1] Craig D.B., Ford G.L. - The response of strain bus to short-circuit currents (Transact. IEEE PAS 99 (1980), 434-442)

[2] Landin J.I., Lindquist C.I., Bergström L.R., Gullens G.R. - Mechanical effects of high short circuit currents in substations (Transact. IEEE PAS 94 (1975), 1655-1657)

[3] Awad M.B., Huestls H.W. - Influence of short-circuit currents on HV and EHV strain bus design (Transact. IEEE PAS 99 (1980), 480-487)

[4] Mirtl A.M., Heinrich C. - Dynamische Kurzschlusswirkungen in Hochspannungs-Schaltanlagen mit Einfach- und Bündelleitern - Überblick (Elektrizitätswirtschaft 79 (1980), 708-712)

[5] Bathé K.-J. - ADINA, a finite element program for automatic dynamic incremental nonlinear analysis (Massachusetts Institute of Technology (1978), report 82448-1)

[6] Engel B. - Berechnung der Kurzschlussstromgebundenen Leitersellen (Thesis Univ. Erlangen (1979))

[7] Miodzianowski A., Waszczyszyn Z. - Dynamical analysis of EHV substations with multicable bundles at short-circuit currents (Polish) (Tech. Univ. Cracow, Institute of structural mechanics, Report I-VII (1977-80))

[8] Olaszowski B., Orkisz J., Waszczyszyn Z. - Calculation of mechanical effects in EHV outdoor substations at short-circuit currents (Revue Electrotechnique 12 (1977), 275-285)

[9] Robert G., Högge M., Geradin M. - SAMCEF-CABLE Programme de calcul des efforts électrodynamiques dans les conducteurs souples à haute tension (Univ. de Liège (1979), Note VF-39 du LTAS)

[10] Sander G., Geradin M., Nyssen G., Högge M. - Accuracy versus computational efficiency in nonlinear dynamics (Congress FENOMECH 78, North-Holland Publ. (1979) II, 315-340)

[11] Lillen J.L., Kluser C. - Efforts électrodynamiques dans les postes H.T. - 1. Généralisation d'éléments finis de type poutre et câble - 2. Programme de calcul des forces d'origine électromagnétique (Univ. de Liège, Note D (1978) 0480/22)

[12] Waszczyszyn Z. - Dynamic analysis of a two-conductors system under short-circuit current (in Polish). (Mechanika i Komputer 1 (1978), 61-80)

[13] Ballius H. - Ein Beitrag zur Berechnung elektrromagnetischer Kräfte zwischen stromführenden Leitern (ETZ-A 90 (1969), 539-544)

[14] Bathé K.-J., Wilson E.L. - Numerical Methods in Finite Element Analysis (Prentice-Hall Inc. (1976))

[15] Roussel P. - Numerical solution of static and dynamic equations of cables (Comp. Meths. in Appl. Mech. and Engng. 9 (1976), 65-74)

[16] Newmark N.M. - A method of computation for structural dynamics (ASCE Journ. Eng. Mech. Div., 85 (1959), 65-94)

[17] Univ. de Liège - S.A.M.C.E.F. Manuels théorique et d'utilisation (Laboratoire de techniques aérospatiales (1981))

[18] Cichoń C., Orkisz J. - Application of space truss superelements to the evaluation eigenfrequencies of supporting structures (in Polish) (Mechanika 10, (1979), 41-51)

[19] Hosemann G. and Tsanakas D. - Dynamic short-circuit stress of busbar-structures with stiff conductors. Parametric studies and conclusions for simplified calculation methods (Electra 68 (1980), 36-64)