

# Avancée détonante

Simuler la montée en pression dans les installations électriques

EDGAR DULLNI, PAWEŁ WOJCIK, TOMASZ BLESZYNSKI – Un défaut d'arc interne dans un appareillage électrique est un arc accidentel de très grande énergie qui entraîne la circulation de courants de court-circuit entre phases et dans la terre. L'arc se traduit par des émissions de gaz brûlants et de fortes surpressions dans l'enveloppe isolée à l'hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>) ou l'air. C'est un phénomène certes très rare, mais aux conséquences graves (détérioration du matériel électrique et de la construction), voire dramatiques (mise en danger du personnel). La montée en pression dans un bâtiment ne peut être évaluée que par calculs, renforcés néanmoins par des essais spéciaux permettant la mesure de la surpression externe. ABB a pour cela mis au point un programme facile d'emploi à destination des développeurs d'appareillages électriques et ingénieurs en génie civil.



Les élévations de pression imposent aux enveloppes de fortes contraintes mécaniques qui peuvent entraîner leur rupture. Pour l'éviter, un dispositif de décharge s'ouvre à une pression donnée. L'arc de défaut interne produit en effet des gaz chauds qu'il faut canaliser pour les évacuer dans le milieu environnant. La plupart du temps, l'appareillage est surmonté de conduits d'échappement débouchant souvent sur un caisson de détente ou un dispositif d'absorption dans lequel les gaz chauds sont refroidis avant évacuation.

Les appareillages doivent répondre à des normes, comme la CEI 62271-200 [1], qui garantissent la sécurité des biens et des personnes, y compris en cas d'arc interne. Des essais de type → 1 visent à valider non seulement la tenue mécanique de l'enveloppe à la surpression, mais aussi l'évacuation des gaz chauds, à distance du personnel. La norme CEI 61936-1 [2] oblige les concepteurs du bâtiment à prendre en compte la

montée en pression résultant de ces gaz d'échappement. Pourtant, les essais de défaut d'arc dans l'appareillage électrique ne couvrent pas cet aspect ; l'installation est simulée par un sol, un plafond et deux murs perpendiculaires, sans local étanche au gaz permettant la mesure de pression. L'évaluation de la montée en pression dans un volume fermé ne peut donc se faire que par calcul. Le programme doit aussi simuler l'élévation de pression pour les deux gaz isolants que sont le SF<sub>6</sub> et l'air. Les essais de validation furent effectués en partenariat avec l'école supérieure polytechnique de Rhénanie-Westphalie RWTH (Aix-la-Chapelle) et l'entreprise TÜV Nord Systems GmbH (Hambourg).

### Équations mathématiques

La pression de gaz dans une enveloppe est fonction de sa température, suivant la loi bien connue des gaz parfaits. Les équations de bilan massique considèrent le débit massique à l'extérieur de l'enveloppe. Les compartiments sont représentés par leurs volumes effectifs (hors composants) et les zones de décharge de pression intermédiaires. Les propriétés du gaz, comme les chaleurs spécifiques, sont indépendantes de la température et uniformes dans tout le volume [3].

Une fraction, ou « coefficient de transmission thermique  $k_p$  », de l'énergie d'arc de défaut chauffe le gaz dans le compartiment de l'arc :

$$Q_1 = k_p \cdot W_{el}$$

La puissance électrique de l'arc est évaluée à partir des courants mesurés et des tensions phase-terre, soit

$$W_{el} = (u_R \cdot i_R + u_S \cdot i_S + u_T \cdot i_T) t$$

Les tensions mesurées ne sont pas forcément identiques à la tension d'arc car un arc triphasé peut brûler entre deux conducteurs de phase, mais aussi dans l'enveloppe reliée à la terre. L'outil de calcul de pression importe les tensions phase-terre mesurées d'un fichier de données formaté ou applique une tension phase-terre moyenne empirique.

Toutes les grandeurs temporelles de l'outil d'arc interne IAT (*Internal Arc Tool*) d'ABB sont prises en compte avant et après un pas de temps  $\Delta t$ . L'équation de calcul de la masse passant du compartiment de l'arc au compartiment d'échappement s'écrit

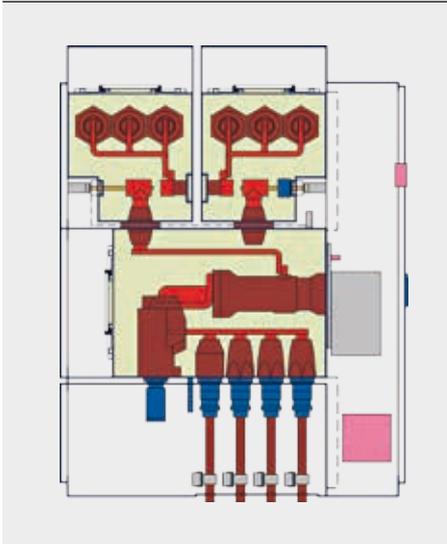
$$m_{12} = \alpha_{12} \cdot p_{12} \cdot w_{12} \cdot t$$

$\alpha_{12}$  désigne l'efficacité du dispositif de décharge de surface  $A_{12}$  et considère la contraction du flux gazeux par une ouverture à arêtes vives (0,7 à 1,0), mais aussi la réduction du flux due, par exemple, à une grille ou un dispositif

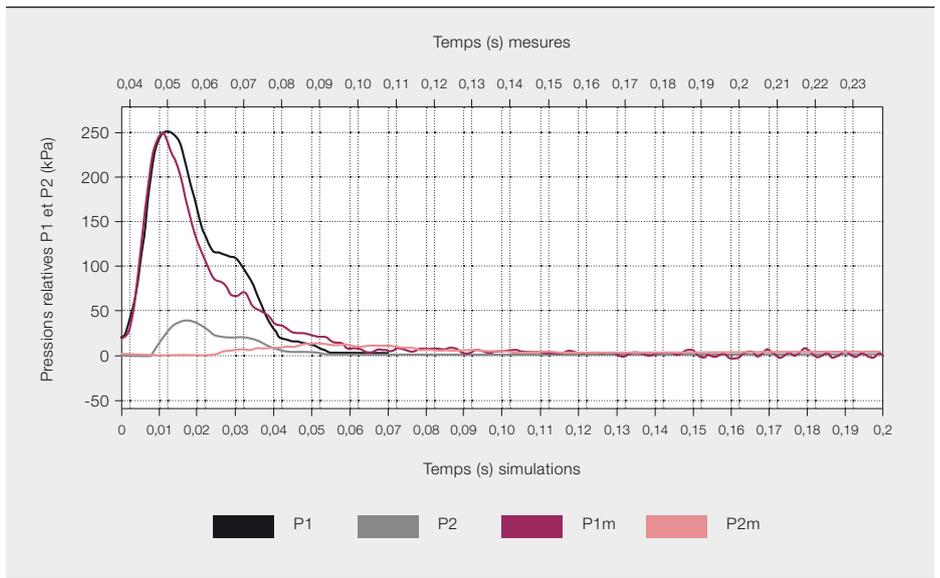
### Photo p. 54

Image tirée d'une vidéo à grande vitesse montrant l'échappement contrôlé des gaz chauds d'un appareillage moyenne tension lors d'un essai d'arc interne. Le logiciel ABB calcule l'évolution de la pression observée dans l'appareillage et le local.

**2 Coupe du tableau ZX2 avec amorçage d'un arc dans le compartiment des barres et décharge de la pression dans le conduit supérieur**

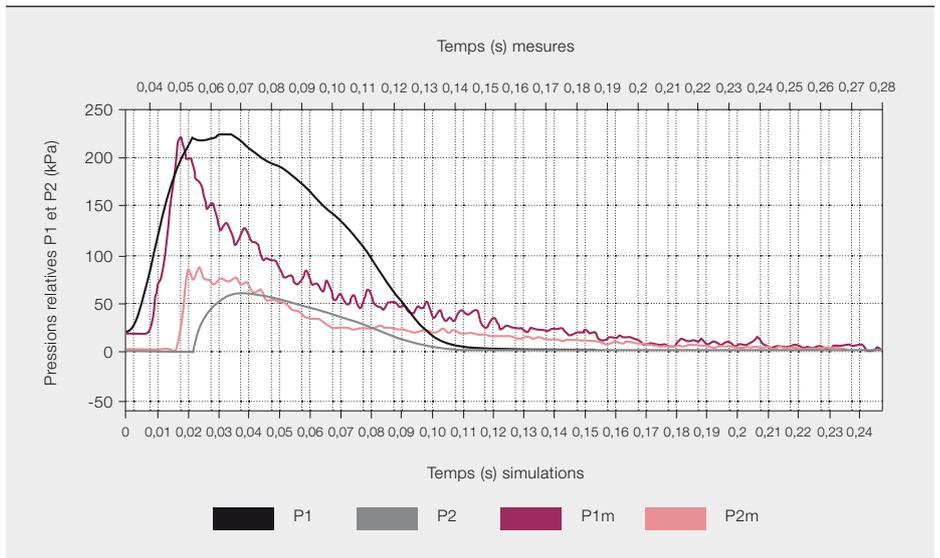


**3 Évolution dans le temps des calculs et mesures de pression d'arc interne dans un tableau ZX2 isolé dans l'air (38 kA)**



Les essais de type vérifient la tenue à la surpression de l'enveloppe mais aussi l'échappement des gaz chauds à distance du personnel.

**4 Évolution dans le temps des calculs et mesures de pression d'arc interne dans un tableau ZX2 isolé dans le SF<sub>6</sub> (35 kA)**



d'absorption. Lorsque le dispositif de décharge s'ouvre, la masse  $m_{12}$  s'échappe du volume à chaque pas de temps.  $\rho_{12}$  et  $w_{12}$  représentent la densité et la vitesse du gaz dans l'ouverture, suivant la loi de Bernoulli [3]. Cette approche mathématique permet de calculer l'élévation de pression dans tous les volumes impliqués.

La précision du calcul est limitée par les simplifications apportées : en supposant des chaleurs spécifiques constantes, on ne tient pas compte de la dissociation des molécules de gaz en fragments (à partir de 6000 K dans l'air et 2000 K dans le SF<sub>6</sub>), ce qui n'empêche pas la concordance avec les résultats expéri-

mentaux, aussi pour des températures de gaz supérieures.

Si une grande quantité de gaz s'échappe de la cellule, de moins en moins de molécules de gaz y restent. Si la fraction d'échauffement  $k_p$  de l'énergie d'arc était constante dans le temps, la température de gaz augmenterait toujours, dépassant largement les valeurs connues de 20000 K. On évite ce cas irréaliste et source d'instabilités numériques en prenant une valeur  $k_p$  fonction de la densité [4]. Cela permet d'étendre le calcul à des durées de défaut plus longues et de déterminer l'élévation de pression dans l'installation.

**Descriptif de l'outil IAT**

La méthodologie proposée ici a été mise en œuvre avec succès dans le logiciel de simulation de défaut d'arc IAT du centre STC<sup>1</sup> (*Simulation Tools Center*) d'ABB.

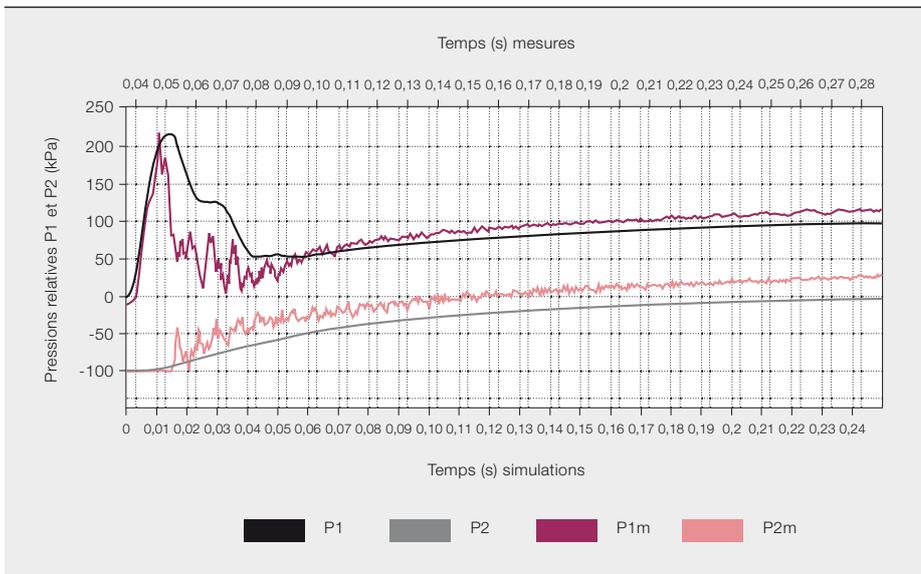
L'outil se compose d'un solveur sous Python et d'une interface graphique Java, aux fonctionnalités suivantes :

- 1) Paramétrage du modèle
- 2) Exécution du solveur
- 3) Affichage des résultats
- 4) Édition de rapport

**Note**

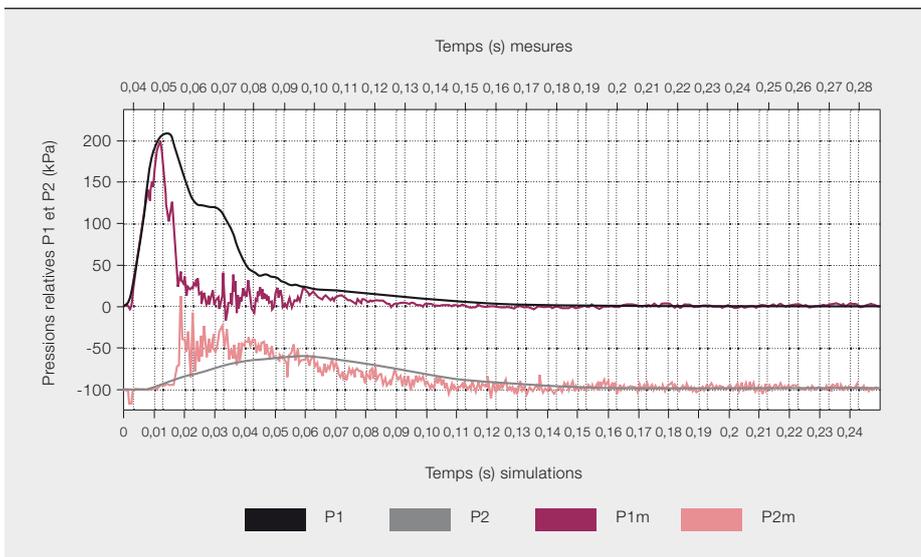
1 Voir encadré → 7, p. 71.

5 Évolution dans le temps des calculs et mesures de pression d'arc dans un montage d'essai à caisson fermé de 8 m<sup>3</sup> (20 kA)



Pour une durée d'arc maxi de 1 s, la simulation sur portable prend moins de 10 s.

6 Évolution des pressions comme en → 5, mais avec une ouverture de détente de 0,3 m<sup>2</sup> (20 kA)



Les paramètres du modèle, saisis directement ou choisis dans une liste déroulante, sont validés un à un. Une fois le modèle prêt, l'utilisateur peut lancer la simulation, en étant tout du long guidé par un assistant logiciel. Pour une durée d'arc maximale de 1 s, la simulation sur portable prend moins de 10s! Les calculs sont effectués avec un pas de temps de simulation constant de 0,05 ms. Aux fins de comparaison avec les essais, les données de mesure peuvent être importées au format de son choix.

On obtient ainsi les courbes caractéristiques suivantes (exemples → 3 à → 9) :

- 1) Pressions/temps
- 2) Courants de phase/temps

- 3) Tensions phase-terre/temps
- 4) Énergie d'arc interne/temps

Les tracés sont modifiables en dynamique et visualisables sans utiliser d'éditeur supplémentaire.

Des fichiers texte contenant les paramètres de simulation (choix des valeurs d'entrée/sortie) et les résultats sont également produits.

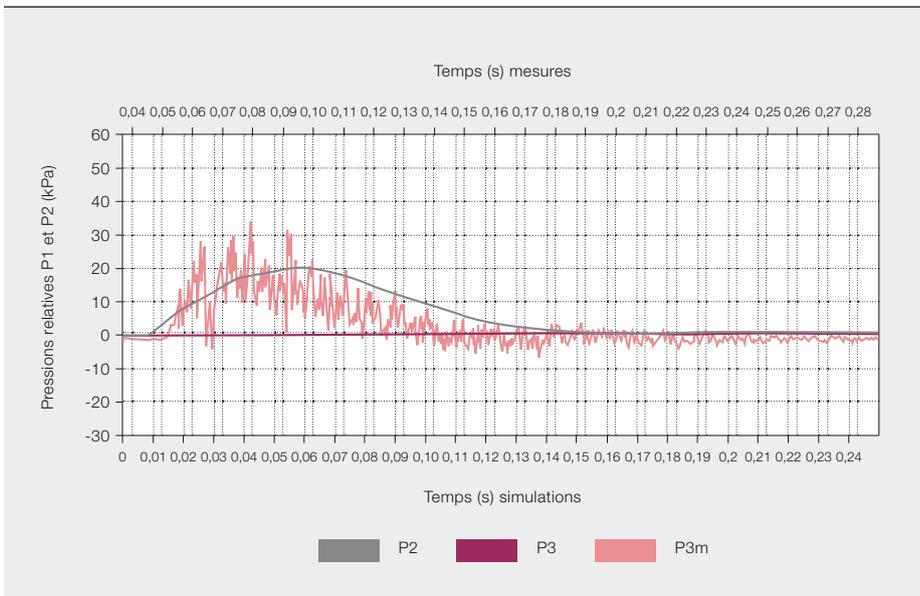
**Comparaison des résultats**

Les résultats de la simulation IAT furent comparés à ceux des essais obtenus sur l'appareillage ABB et des expérimentations spécialement conçues.

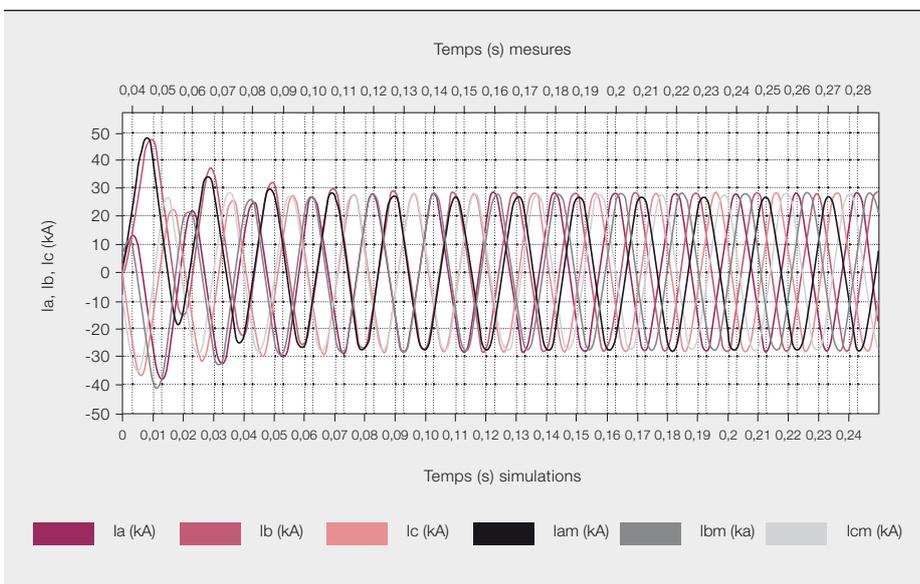
La première comparaison porte sur un appareillage à isolation gazeuse dans lequel on a remplacé le SF<sub>6</sub> par l'air. La figure → 2 est une vue en coupe du tableau moyenne tension ZX2 d'ABB avec un arc s'amorçant dans le compartiment jeu de barres. Le dispositif de décharge de pression est un mince disque d'éclatement de 0,049 m<sup>2</sup>, qui ouvre dans le conduit supérieur à une surpression de 220 kPa. Un courant de défaut de 39 kA est appliqué pendant 1 s. Les oscillogrammes tracent les évolutions au cours du temps de la pression calculée dans le compartiment de l'arc (en rouge en → 2, pourpre sur les oscillogrammes) et le conduit d'évacuation (bleu en → 2, rose sur les courbes), ainsi

L'échappement des gaz chauds et l'élévation de pression qui l'accompagne, dans un volume fermé, ont fait l'objet d'expériences spécifiques.

### 7 Pression dans le caisson mesurée à un autre endroit qu'en → 6



### 8 Courants de phase appliqués et mesurés montrant l'asymétrie initiale



que les données mesurées (respectivement noir et gris), jusque dans les 250 ms qui suivent la naissance de l'arc.

En → 3, la concordance entre mesure et calcul de la montée en pression, du pic de pression et de sa décroissance rapide dans le compartiment rempli d'air est bonne.  $k_p$  est donné à 0,5, conformément aux données publiées, et la tension d'arc (phase-terre) de 300 V est tirée de l'essai. Le calcul de la pression dans le conduit d'échappement concorde moins bien avec les résultats d'essais, du fait des effets du temps d'écoulement des gaz dont IAT ne peut pas tenir compte.

Pour le tableau isolé au SF<sub>6</sub> → 4, la reproduction du pic de pression est là encore bonne, mais sa chute après ouverture du disque d'éclatement est moins satisfaisante. Le calcul fournit un temps de séjour du gaz plus long que celui observé en essai.  $K_p$  est donné à 0,75, conformément aux publications, et la tension d'arc est de 400 V, suivant les essais.

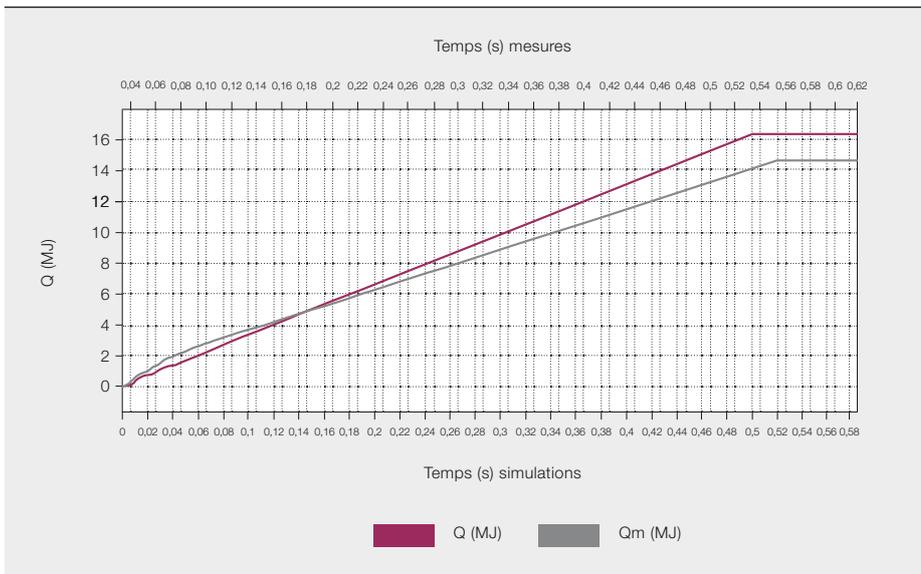
Beaucoup d'essais furent recalculés. L'imprécision du pic de pression dans le compartiment de l'arc, de l'ordre de ±20 %, est surtout fonction de l'incertitude de la pression de réponse du dispositif de décharge. La chute de pression après détente est simulée avec une erreur d'un facteur de 2. Cela est sans

importance pour l'évaluation de la tenue à la pression de l'appareillage puisque le facteur décisif est la pression maxi.

Le pic de pression dans les conduits d'échappement est aussi calculable, mais au prix d'une incertitude pouvant atteindre ±40 % sous l'effet des ondes de choc qui se propagent dans les conduits allongés.

L'échappement des gaz chauds et la montée en pression qui l'accompagne, dans un local électrique fermé, firent l'objet d'une simulation spécifique [4], à l'aide d'un caisson étanche au gaz de 8 m<sup>3</sup>. Le graphique → 5 montre les pressions déterminées par l'essai et le calcul.

## 9 Énergie d'arc tirée de la multiplication des tensions phase-terre et des courants (rouge = calcul IAT, gris = mesure)



La chute de pression dans le compartiment de l'arc, après intervention du dispositif de décharge, s'écarte de la mesure, mais la saturation de la montée en pression dans le caisson est simulée de façon satisfaisante.

Cela est dû à la décroissance de  $k_p$  mise en œuvre dans IAT, qui est liée à la diminution de la densité de gaz dans le compartiment clos de l'appareillage. Si l'énergie d'arc chauffait le volume total du caisson de façon uniforme dans le temps, comme c'est le cas pour un arc brûlant librement, la pression augmenterait linéairement pour atteindre 345 kPa, au lieu des 154 kPa de la mesure et des 114 kPa du calcul.

L'outil de calcul prend en compte cette dépendance à la densité de  $k_p$ , suivant la formule appliquée pour  $\rho(t) < \rho_c$  :

$$k_p(t) = k_p \cdot c_0 \cdot (\rho(t)/\rho_0)^{0,5}$$

$c_0$  est adapté pour garantir une transition continue depuis  $k_p$  initial ;  $\rho_c$  vaut 1 % de la densité de gaz normale  $\rho_0$  à 100 kPa pour l'air, et 20 % pour le SF<sub>6</sub>. Les résultats correspondants sont obtenus à partir des essais effectués dans le SF<sub>6</sub> et l'air, dans une configuration identique [4].

L'outil peut aussi calculer l'élévation de pression dans les locaux dotés d'ouvertures de détente des gaz (fenêtres ou clapets, par exemple).

La figure → 6 reproduit un résultat d'essai avec le même caisson de 8 m<sup>3</sup> mais une surface de décharge de 0,3 m<sup>2</sup>. La géométrie réelle du local et la position de l'ouverture et des capteurs ne peuvent pas être intégrées à IAT et entraînent des écarts par rapport à la réalité. On le voit en → 6 avec, par exemple, la pression initiale plus élevée, due à l'écoulement direct du gaz en direction du capteur. Un autre capteur, placé à côté, offre une meilleure concordance avec le calcul → 7. Seule une simulation d'écoulement des fluides CFD peut donner de meilleurs résultats.

### Pression estimée

Les résultats d'essai et de simulation montrent que les pics de pression et les volumes d'échappement des gaz dans les compartiments de l'appareillage concordent dans des limites raisonnables. Les imprécisions sont dues aux simplifications apportées à l'outil IAT (hypothèse du gaz parfait et fonction d'écoulement générique). Ce dernier peut servir à simuler les effets de la pression des arcs de défaut dans l'appareillage électrique, avec une incertitude de prédiction du pic de pression d'environ ±20 % dans le compartiment de l'arc. Il faut une tension d'arc fiable, tirée des essais réalisés sur des matériels électriques similaires. L'outil permet également d'estimer la montée en pression dans un volume d'échappement ou un local équipé ou non d'ouvertures de détente, avec des marges de sécurité adéquates. Il a toute son utilité pour

Les imprécisions sont dues aux simplifications introduites dans l'outil IAT (hypothèse de gaz parfait et fonction d'écoulement générique).

améliorer l'efficacité de la conception et la sécurité, surtout quand les essais en conditions réelles sont impossibles ou irréalisables.

#### Edgar Dullni

ABB Power Products  
Ratingen (Allemagne)  
edgar.dullni@de.abb.com

#### Pawel Wojcik

Tomasz Bleszynski  
ABB Corporate Research  
Cracovie (Pologne)  
pawel.wojcik@pl.abb.com  
tomasz.bleszynski@pl.abb.com

#### Bibliographie

- [1] *Appareillage à haute tension – Partie 200 : appareillage sous enveloppe métallique pour courant alternatif de tensions assignées supérieures à 1 kV et inférieures ou égales à 52 kV*, norme CEI 62271-200, 2011.
- [2] *Installations électriques en courant alternatif de tension nominale supérieure à 1 kV – Partie 1 : règles communes*, norme CEI 61936-1, 2010.
- [3] CE/GT A3.24, *Tools for the Simulation of Pressure Rise Due to Internal Arc in MV and HV Switchgear*, brochure CIGRÉ (en anglais), à paraître en 2013.
- [4] Dullni, E., Schumacher, M., Pietsch, G., « Pressure rise in a switchroom due to internal arc in a switchboard », 6<sup>th</sup> Int. Symp. on Short-Circuit Currents in Power Systems, p. 4.5.1–4.5.7, Liège (Belgique), 1994.
- [5] *Sulphur Hexafluoride*, brochure Solvay Fluor und Derivate GmbH.