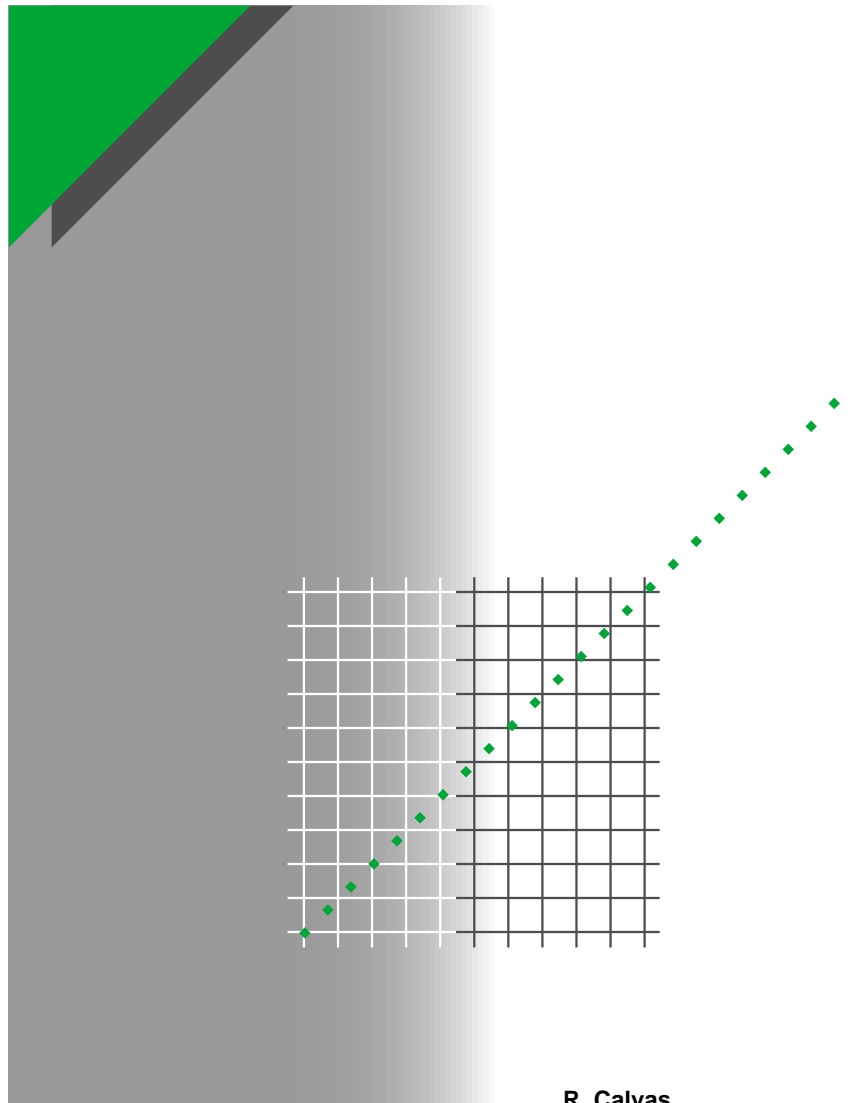


Cahier technique n° 141

Les perturbations électriques en BT



Merlin Gerin

Modicon

Square D

Telemecanique

R. Calvas

Les Cahiers Techniques constituent une collection d'une centaine de titres édités à l'intention des ingénieurs et techniciens qui recherchent une information plus approfondie, complémentaire à celle des guides, catalogues et notices techniques.

Les Cahiers Techniques apportent des connaissances sur les nouvelles techniques et technologies électrotechniques et électroniques. Ils permettent également de mieux comprendre les phénomènes rencontrés dans les installations, les systèmes et les équipements.

Chaque Cahier Technique traite en profondeur un thème précis dans les domaines des réseaux électriques, protections, contrôle-commande et des automatismes industriels.

Les derniers ouvrages parus peuvent être téléchargés sur Internet à partir du site Schneider Electric.

Code : <http://www.schneider-electric.com>

Rubrique : **Le rendez-vous des experts**

Pour obtenir un Cahier Technique ou la liste des titres disponibles contactez votre agent Schneider Electric.

La collection des Cahiers Techniques s'insère dans la « Collection Technique » de Schneider Electric.

Avertissement

L'auteur dégage toute responsabilité consécutive à l'utilisation incorrecte des informations et schémas reproduits dans le présent ouvrage, et ne saurait être tenu responsable ni d'éventuelles erreurs ou omissions, ni de conséquences liées à la mise en œuvre des informations et schémas contenus dans cet ouvrage.

La reproduction de tout ou partie d'un Cahier Technique est autorisée après accord de la Direction Scientifique et Technique, avec la mention obligatoire : « Extrait du Cahier Technique Schneider Electric n° (à préciser) ».

n° 141

Les perturbations électriques en BT



Roland CALVAS

Ingénieur ENSERG 1964 (Ecole Nationale Supérieure d'Electronique et Radioélectricité de Grenoble) et diplômé de l'Institut d'Administration des Entreprises, il est entré chez Merlin Gerin en 1966.

Lors de son parcours professionnel, il a été responsable commercial, puis responsable marketing de l'activité protection des personnes contre le risque électrique.

Lexique

Coupure : absence plus ou moins longue de la tension.

Creux de tension : baisse de la tension de plus de 10 %, suivie d'un retour dans la plage de variation normale.

M. L. I. : Modulation de Largeur d'Impulsion (PWM en anglais : Pulse Width Modulation).

Perturbation électrique : tout phénomène perturbateur qui fait sortir l'onde de tension (ou de courant) du secteur de ses caractéristiques nominales.

Perturbation électromagnétique : tout phénomène perturbateur de nature électrique, magnétique ou électrostatique qui peut affecter le secteur et / ou le fonctionnement des appareils électriques et électroniques.

r. m. s. : « root mean square », en français « valeur efficace ».

Régime du neutre : Voir schéma des liaisons à la terre.

Schéma des Liaisons à la Terre (SLT) :

Encore parfois appelé « régime du neutre ». La norme CEI 60364 (en France la NF C 15-100) officialise trois principaux schémas des liaisons à la terre qui définissent les raccordements possibles du neutre, de la source, et des masses, à la terre ou au neutre. C'est en fonction du SLT retenu pour un réseau que sont définies les protections électriques nécessaires.

Surtension : dépassement plus ou moins long de $U_n + 10\%$.

Surtension brève : onde de tension transitoire caractérisée par une montée rapide suivie d'une décroissance plus lente généralement de caractère périodique.

Surtension très brève : onde de tension transitoire caractérisée par une montée rapide suivie d'une décroissance plus lente, généralement périodique.

Tension impulsionnelle : impulsion de durée inférieure à 10 ms superposée à la tension sinusoïdale.

Les perturbations électriques en BT

Les réseaux BT sont très pollués et soumis à de multiples agressions. Les matériels électrotechniques, mais surtout les appareils électroniques qui sont de plus en plus nombreux et traitent des signaux de plus en plus bas, doivent résister à un environnement électromagnétique sévère. Et dans le même temps les exigences de disponibilité, que ce soit pour la production, la gestion ou le commerce, sont de plus en plus fortes.

Pour améliorer la qualité du « produit électricité » et éviter les dysfonctionnements voire des destructions de composants du réseau électrique et / ou de récepteurs sensibles, il est indispensable de comprendre l'origine des perturbations et d'en apprécier les risques. Voilà tout l'objet de ce Cahier Technique. Il est une introduction au vaste domaine de la compatibilité et de l'immunité électromagnétique du 50 Hz jusqu'aux fréquences radioélectriques.

Dans cet ouvrage l'auteur traite de tous les paramètres et de leurs principales « anomalies » qui permettent de caractériser une alimentation électrique :

- Amplitude : variations - coupures - creux - surtensions,
- Fréquence : variations,
- Forme d'onde : harmoniques - transitoires - courants porteurs,
- Phase : déséquilibre,
- Puissance : courts-circuits - surcharges (effets sur la tension).

Sommaire

1 Les tensions industrielles BT	1.1 Les tensions nominales	p. 4
	1.2 La fréquence	p. 4
2 Les perturbations d'amplitude	2.1 Les creux de tension et les coupures brèves	p. 5
	2.2 Les surtensions	p. 9
3 Les perturbations de l'onde sinusoïdale	3.1 Les générateurs	p. 16
	3.2 Les transformateurs	p. 16
	3.3 Les récepteurs	p. 16
	3.4 Les alimentations à découpage	p. 17
	3.5 Les fours industriels	p. 17
	3.6 Les courants porteurs	p. 17
	3.7 Les effets des perturbations	p. 17
4 Les perturbations particulières aux systèmes polyphasés	4.1 Les déséquilibres de courant et tension	p. 19
	4.2 Les déséquilibres de phase	p. 20
5 Les perturbations électromagnétiques	5.1 Champs et rayonnements	p. 21
	5.2 Décharges électrostatiques	p. 22
6 Conclusion		p. 23
Annexe 1 : transmission des surtensions à travers les transformateurs		p. 24
Annexe 2 : la ferrorésonance		p. 25
Annexe 3 : bibliographie		p. 26

1 Les tensions industrielles BT

Tous les réseaux subissent, ou sont à l'origine, des perturbations. Or, des récepteurs, mais aussi les appareils de contrôle-commande et de protection, sont sensibles à la qualité de la tension qui leur est appliquée. La connaissance et la prise en compte de ces contraintes d'alimentation en énergie électrique s'avèrent donc bien nécessaires :

- les constructeurs de matériels électrotechniques et électroniques destinés à un marché mondial doivent prendre en compte des tolérances qui varient selon les pays,

- les bureaux d'études et les installateurs doivent aussi prendre en compte ces phénomènes dès la conception des réseaux, et selon les besoins de leurs clients trouver des solutions techniques au niveau des schémas de distribution et de l'appareillage.

Rappelons que les installations Basse Tension sont soumises à la norme CEI 60364 (en France la NF C 15-100).

1.1 Les tensions nominales

Le domaine de la BT concerne les tensions :

- alternatives : $\leq 1\ 000\ V$

(fréquence $\leq 10\ kHz$),

- continues $\leq 1\ 500\ V$.

Aussi appelées « tensions assignées », elles sont définies dans la publication CEI 60038 de 1983. La plus usitée des tensions de la BT est « 230/400 V », en France elle a été officialisée par l'arrêté du 29/05/86.

Dans le monde, et jusqu'en 2003, on trouvera encore diverses tensions nominales :

- Européenne : 220/380 V, 50 Hz,

- Anglaise : 240/415 V, 50 Hz,

- USA : 120/240 V et 480 V, 60 Hz,

- Japon : 100/200 V, 50 et 60 Hz.

Mais ces tensions varient autour de la tension nominale en fonction de la structure et de la charge du réseau (longueur des conducteurs et variation de la charge) et des systèmes régulateurs du réseau public (ou privé).

En Europe, la norme EN 50160 indique qu'en exploitation normale, pour chaque période d'une semaine, 95 % des valeurs efficaces moyennées sur 10 minutes doivent se situer dans la plage $Un \pm 10\ %$. A titre d'exemple, en France, EDF annonce une plage de variation de $\pm 10\ %$ mais admet, que temporairement, les tensions puissent s'écarter de plus de 20 % de la tension nominale.

De plus ces variations sont à associer à la notion de durée, exemples :

- permanent $Un \pm 10\ %$,

- cinq minutes $Un \pm 20\ %$.

Dans les pays en voie de développement, il est possible d'observer fréquemment des variations plus fortes que $\pm 20\ %$.

1.2 La fréquence

En ce qui concerne la fréquence, les variations lentes autour de la valeur nominale 50 ou 60 Hz sont généralement faibles. Dans les pays européens, dont les réseaux sont interconnectés, la norme EN 50160 précise $50\ Hz \pm 1\ %$ pendant 95 % d'une semaine, et [+ 4 %, - 6 %] en cas de perturbation très importante. Ces variations peuvent être bien plus importantes pour des réseaux autonomes, par exemple sur une île.

2 Les perturbations d'amplitude

Les réseaux sont perturbés, par des variations de charge en exploitation normale, mais surtout par des phénomènes aléatoires dont l'origine est accidentelle, courts-circuits par exemple. Un réseau BT est soumis à ces deux causes de perturbations quelle que soit leur origine (BT, MT, ou HT).

Les deux principales perturbations de l'amplitude sont :

- les creux de tension et coupures brèves,
- les surtensions.

2.1 Les creux de tension et les coupures brèves

Le creux de tension est généralement défini comme une baisse de 10 % à près de 100 % de la valeur nominale de la tension pendant un temps compris entre 10 ms et quelques secondes (cf. **fig. 1**). Lorsque la tension est absente (baisse de tension de 100 %) pendant 1 s à 1 mn on parle de « coupure brève », et entre 10 ms et 1 s de « coupure très brève ». Lorsque la durée est ≤ 10 ms, la coupure est généralement due à des « phénomènes transitoires » ou volontaires, par exemple à l'emploi de gradateurs.

Perturbations dues à l'exploitation des réseaux HT et MT

■ Les modifications volontaires de la géométrie d'un réseau provoquent des coupures brèves qui peuvent atteindre plusieurs secondes. Mais les réseaux de distribution maillés sont moins sensibles à ce phénomène.

■ La mise sous tension de gros transformateurs provoque des creux de tension évolutifs dus aux courants d'enclenchement. Le tableau de la **figure n° 2** donne, à titre d'exemple, le courant de mise sous tension des transformateurs MT/BT.

Il en est de même lors de la mise sous tension des condensateurs MT et des gros moteurs : pour les condensateurs le courant d'appel peut atteindre 100 fois leur courant nominal (selon CEI 831-1) et jusqu'à $8 I_n$ pendant plusieurs dizaines de secondes pour les moteurs.

■ Perturbations dues à des défauts sur des réseaux HT et MT (court-circuit et défaut d'isolement).

Des phénomènes, tels que : défaut d'isolement du matériel, coup de foudre, blessure d'un câble souterrain, mise à la terre d'un conducteur aérien, provoquent des courts-circuits qui génèrent des chutes de tension importantes dans une zone plus ou moins étendue autour de l'origine du défaut ; ceci avant la mise hors service de l'élément défectueux par les protections. Parallèlement les usagers directement desservis par l'élément en défaut sont définitivement ou temporairement privés

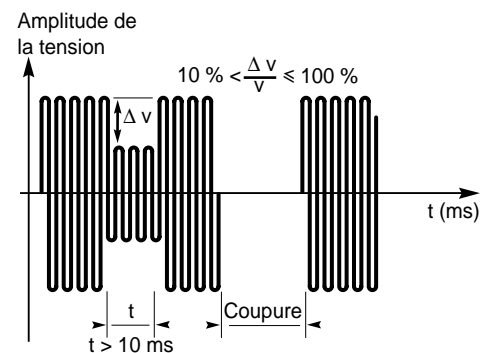


Fig. 1 : creux de tension (Δv) et coupure.

P (KVA)	ne = $\frac{I_{\text{encl. crête}}}{I_n \text{ transformateur}}$	Constante de temps (s)
50	15	0,1
100	14	0,15
160	12	0,2
250	12	0,22
400	12	0,25
630	11	0,3
800	10	0,3
1000	10	0,35
1250	9	0,35
1600	9	0,4
2000	8	0,45

Fig. 2 : valeur des courants d'enclenchement et constante de temps des transformateurs MT/BT lors d'un enclenchement côté MT (lors d'un enclenchement côté BT, « ne » est 2 fois plus élevé).

d'alimentation. Ces phénomènes affectent tous les niveaux de tension, mais particulièrement les réseaux MT (20 kV). Pour chaque défaut, le nombre et le type des creux de tension et coupures brèves dépendent des protections et des automatismes de réenclenchement utilisés.

En France :

□ sur les réseaux THT (400 et 225 kV), différents réenclencheurs sont en service :

- réenclencheurs monophasés lents fonctionnant en cas de défaut monophasé : la durée de la coupure est de l'ordre de 1,5 à 2 s,
 - réenclencheurs triphasés lents (défauts polyphasés) dont le fonctionnement est assujéti au contrôle de synchronisation des tensions : la durée de la coupure est de l'ordre de 5 s.
- Ces réenclencheurs sont aussi utilisés sur les réseaux HT (90 et 63 kV).

□ sur les réseaux MT aériens (5 à 20 kV) pour lesquels le neutre est mis à la terre par une impédance limitant le courant de défaut homopolaire à 300 A, au niveau du poste source des « disjoncteurs shunt » permettent l'élimination des défauts monophasés fugitifs (contacts avec des branches), ceci sans gêne pour l'utilisateur BT (cf. **fig. 3**).

Par contre, les défauts polyphasés sont traités par des réenclencheurs rapides et lents qui provoquent des creux de tension sur la BT (cf. **fig. 4**). Environ 75 % des défauts sont éliminés après le réenclenchement rapide qui correspond à la classique coupure brève de 300 ms.

□ sur les réseaux MT souterrains (5 à 20 kV). Il n'y a pas a priori de défaut fugitif, donc tout défaut entraîne la mise hors tension « définitive » de la partie concernée du réseau. De ce fait les réseaux souterrains (ville) sont organisés soit en « double dérivation » (cf. **fig. 5**), soit le plus souvent en boucle ouverte (cf. **fig. 6**). Des automatismes permettent de réalimenter les postes HT/BT exempts de défaut en moins d'une minute.

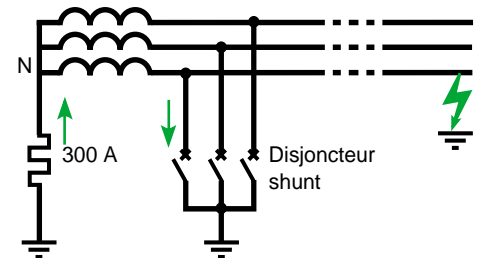


Fig. 3 : élimination d'un défaut monophasé par un disjoncteur shunt qui en court-circuitant le défaut permet l'extinction de l'arc.

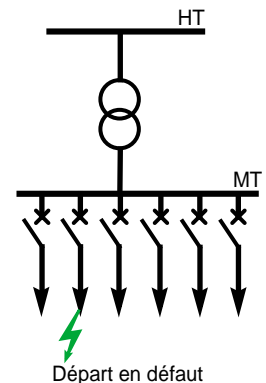
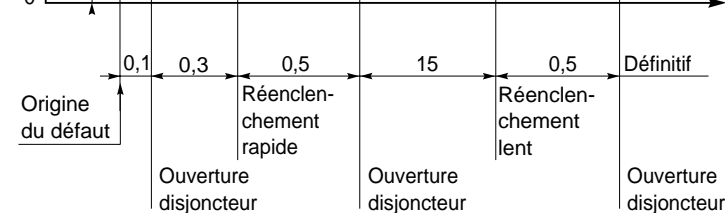
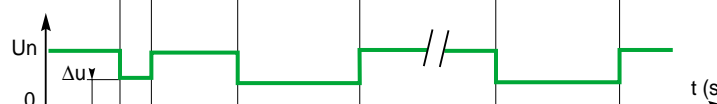
a) Courant appelé par le départ en défaut



b) Tension sur le départ en défaut



c) Tension sur les autres départs



Principe : Sur un réseau MT en aérien, la plupart des défauts sont fugitifs, aussi le disjoncteur en tête de chaque départ est équipé d'un automate qui tente deux réenclenchements (parfois trois) :

- le premier instantanément (durée d'ouverture + fermeture : 0,3 s),
- le second après environ 15 s.

Fig. 4 : variations de tension lors des réenclenchements rapides et lents sur un réseau de distribution MT.

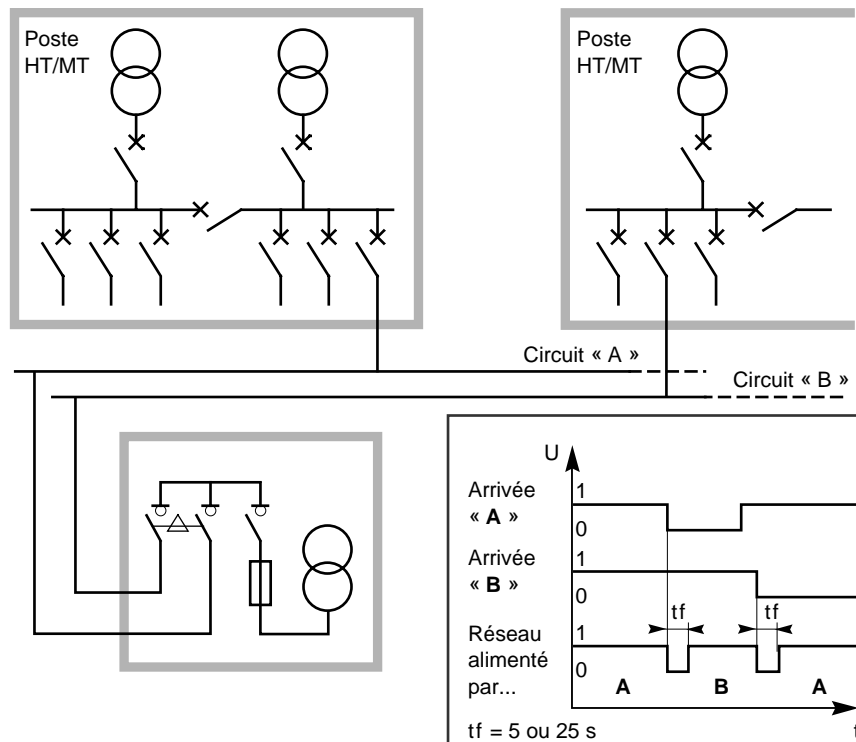


Fig. 5 : alimentation MT en double dérivation.

Dans l'encadré, séquence de l'automatisme d'un permutateur Merlin Gerin conforme aux spécifications EDF (France).

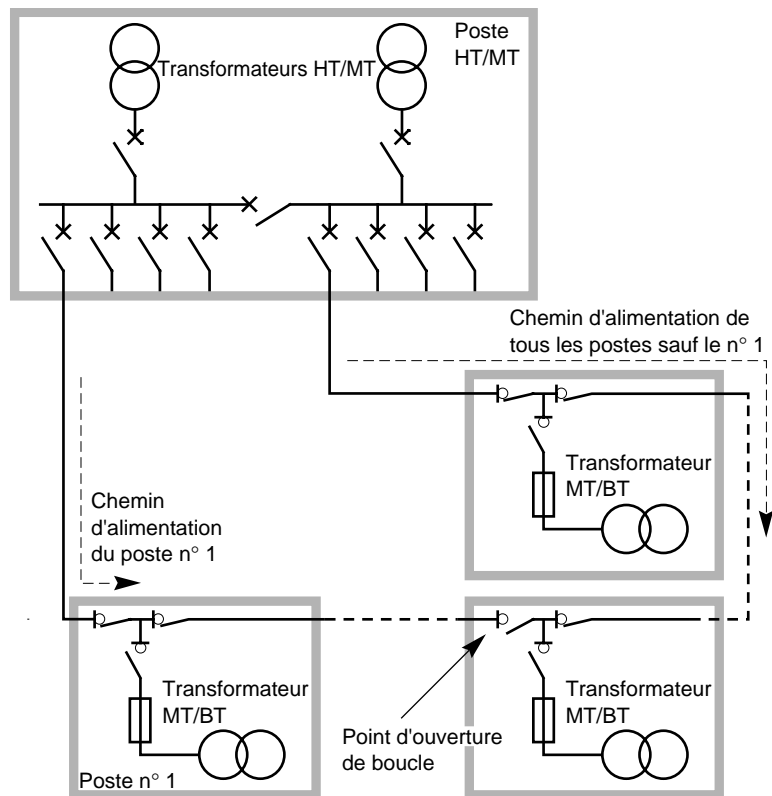


Fig. 6 : alimentation MT en boucle ouverte (coupure d'artère).

Perturbations dues à l'exploitation des réseaux BT

Les creux de tension observés sur un réseau BT et dus à son exploitation sont provoqués par :

- l'enclenchement de condensateurs (éventuellement placés en tête de réseau) qui provoque, comme en MT, un creux de tension très bref voire un phénomène transitoire de type oscillatoire ;
- un simple démarrage de gros moteurs, directement alimentés par le TGBT, qui provoque un creux de tension ou dont la « reprise au vol » (réalimentation après une coupure brève) provoque un appel de courant parfois important (jusqu'à deux fois les 8 à 10 In d'un démarrage direct).

Perturbations dues à des défauts sur des réseaux BT

Les courts-circuits sur la distribution principale BT, entre deux conducteurs actifs ou entre un conducteur actif et une masse en schéma de liaison à la terre TN (cf. Cahier Technique n° 172), sont aussi à l'origine de creux et de coupures de tension.

Ces courts-circuits éliminés par les disjoncteurs, sélectifs ou non, provoquent un creux de tension d'autant plus « profond » que le départ incriminé est important au regard de la puissance de la source, et qui peut durer de 50 à 500 ms. La forme de quelques creux et coupures de tension est donnée dans le tableau de la **figure 7**.

A noter que les réseaux BT secourus par groupes tournants et dispositifs d'inversion de source (normal/secours) peuvent se trouver sans alimentation pendant plusieurs secondes (cf. Cahier Technique n° 161) :

Temps d'interruption = $T_1 + T_d + T$, avec :

T_1 = temporisation au démarrage du groupe (0,4 à 10 s),

T_d = temps de démarrage du groupe (quelques secondes),

T = temps d'inversion (< 0,4 s).

Des ordres de grandeur des creux de tension selon les différents types de permutation sont donnés dans le tableau de la **figure n° 8**.

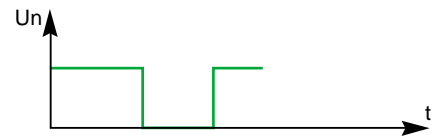
Conclusion sur les creux de tension et les coupures brèves

Statistiquement on observe des coupures et des creux de tension, en tête d'un réseau BT, de 1 fois par mois à 10 fois par jour. Leur origine est majoritairement due à la moyenne et haute tension et dans 80 % des cas leur durée est comprise entre 20 et 350 ms.

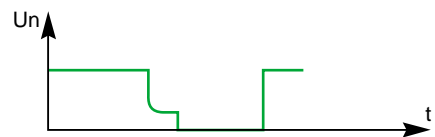
L'appareillage électrotechnique est généralement insensible à ces phénomènes, mis à part les contacteurs et relais dont la « chute » et la « remontée » intempestives peuvent provoquer d'énormes problèmes dans les procédés industriels.

Avec le développement de l'intelligence répartie et des micro-automates, capteurs, pré-actionneurs intelligents ..., il convient de porter une grande attention à l'immunité des matériels aux creux de tension et coupures d'alimentation. En effet, l'appareillage utilisant de l'électronique ne doit pas provoquer de signalisation erronée ou donner des ordres intempestifs.

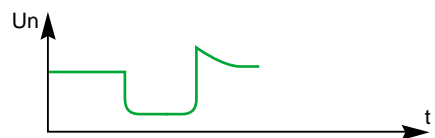
- Permutation de source volontaire
Durée : quelques millisecondes à plusieurs minutes.



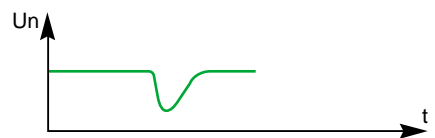
- Permutation de source automatique suite à un défaut extérieur
Durée : quelques millisecondes à 10 s.



- Court-circuit externe
Durée : de 10 ms à plus de 100 ms.



- Enclenchement d'une grosse unité
Durée : fonction de la puissance du réseau.



- Coupures brèves avec gros moteur et reprise au vol.

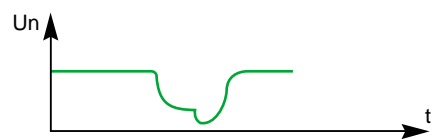


Fig. 7 : principaux types de coupure et creux de tension.

	Type de permutation			Pseudosynchrone
	Synchrone	Temps mort		
		BT	MT	
Exemples d'application	<ul style="list-style-type: none"> ■ permutation de jeux de barres, ■ substitution d'un générateur par un autre, ■ permutation entre une ASI et le secteur. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ alimentation de pompes, ■ alimentation des circuits auxiliaires d'un poste de transformation, ■ alimentation des magasins à grande surface, ■ etc. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ alimentation par deux arrivées MT permutables, ■ alimentation par une source normale et une source de remplacement. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ reprise au vol des moteurs asynchrones.
Durée de permutation	nulle	0,5 à 10 s	1 à 30 s	0,06 à 0,3 s
Dispositifs employés	<ul style="list-style-type: none"> ■ coupleur, ■ synchrocoupleur, ■ ensemble ASI avec contacteur statique. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ inverseur de source automatique à disjoncteurs. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ ensemble de cellules MT avec permutateur. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ disjoncteurs HT rapides associés à un permutateur ultra-rapide et un contrôleur de phases.
Observations	La permutation doit être réalisée avant l'absence totale de tension de la source principale.	Les dispositifs inverseurs mentionnés ci-dessus sont généralement des ensembles montés, câblés et réglés en usine (voir par exemple le catalogue Schneider Electric).		Difficultés d'élaboration de l'ordre de permutation (présence de tension résiduelle).

Fig. 8 : différents types de permutation et leurs durées.

2.2 Les surtensions

Mis à part les élévations accidentelles de tension, par exemple branchement d'un transformateur 230 V en 400 V, les seules élévations de tension qui peuvent dépasser la plage nominale de variation $U_n + 10\%$ s'observent lorsque le réseau BT n'est pas chargé. Mais les transformateurs des postes sources sont généralement équipés de régleurs en charge qui permettent au distributeur d'énergie de maintenir la MT dans la plage $U_n \pm 7\%$.

Les surtensions impulsionnelles sont quant à elles dues essentiellement aux manoeuvres sur les réseaux et à la foudre. Peu dangereuses pour l'appareillage traditionnel BT conforme aux normes de fabrication, elles peuvent affecter les appareils comportant de l'électronique (tenue en tension réduite à 1500 V).

Manœuvres sur le réseau MT

- Mise sous tension de batteries de condensateurs MT sans self de blocage : la valeur crête peut atteindre $2 U_n$ (cf. fig. 9).
- Mise hors tension de transformateur MT/BT : la valeur crête peut atteindre $3 U_n$; elle dépend beaucoup du courant « arraché » par l'organe de coupure MT (cf. fig. 10).

Ces surtensions sont transmises à la BT par le transformateur MT/BT en fonction de ses rapports de transformation, inductif et capacitif (cf. annexe 2). Elles ne doivent pas être ignorées car elles sont dangereuses pour l'appareillage BT particulièrement lorsque le circuit BT est faiblement capacitif, c'est-à-dire peu étendu. C'est notamment le cas lors de la mise en service d'une installation.

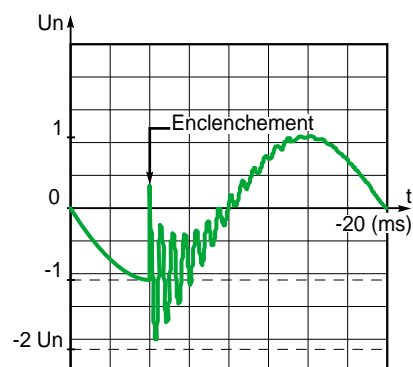


Fig. 9 : onde de tension à l'enclenchement d'une batterie de condensateurs MT.

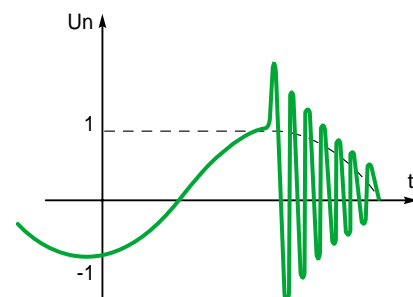


Fig. 10 : onde de tension au déclenchement d'un transformateur MT/BT.

Foudre

La foudre affecte directement les réseaux aériens.

De nombreuses études traitent du sujet.

Toutes les régions ne sont pas également exposées, on parle de niveau kéraunique.

De mêmes toutes les installations ne sont pas également exposées. L'exposition extrême correspond au cas des lignes aériennes de grande longueur en région particulièrement sujette aux orages. La **figure 11** indique le nombre et le niveau des surtensions que l'on peut s'attendre à rencontrer au cours d'une année. Il s'agit de valeurs statistiques et l'on est toujours à la merci d'un coup de foudre direct de valeur bien supérieure.

Les normes sur la coordination de l'isolement et sur la compatibilité électromagnétique - CEM - prennent bien en compte ce phénomène naturel qui développe une énergie impulsionnelle considérable transmise aux réseaux BT par les transformateurs MT/BT.

De plus en plus les normes relatives à l'appareillage prévoient la tenue aux ondes de tension et de courant représentatives de la foudre.

Outre ces « ondes » à front raide, la foudre a un effet pervers dû aux éclateurs et aux parafoudres placés en amont des postes MT/BT. L'importance du risque dépend du Schéma des Liaisons à la Terre - SLT - (cf. norme NF C 13-100).

Prenons le cas du SLT TTN (cf. **fig. 12**).

Lorsque la foudre tombe sur la ligne MT, elle fait amorcer l'éclateur, ou le parafoudre, qui laisse alors passer une partie de l'onde de choc qui peut être amplifiée par le phénomène de réflexion d'onde (voir le Cahier Technique n° 168).

Un tel amorçage d'un éclateur donne naissance à un courant 50 Hz, de la phase en défaut à la prise de terre R_{pn} . Ce courant, limité par l'impédance Z (à 300 A en France) se maintient jusqu'à l'intervention des protections du poste de source. Il provoque, en passant dans R_{pn} , la montée en potentiel de tout le réseau BT par rapport à la terre profonde à laquelle les équipements BT sont reliés par R_a .

Il y a alors un risque de « claquage en retour » des matériels BT qui se matérialise, lorsque le produit « Courant x R_{pn} » est supérieur à la tension d'isolement par rapport à la masse des équipements. Ainsi avec un courant de 300 A et une tension d'isolement de 2500 V, R_{pn} ne doit pas dépasser 8 Ω ; valeur qui peut être dépassée selon l'hydraulicité et la nature du terrain !

A noter que le problème est le même lors d'un défaut à la masse d'un élément MT du poste. Dans ce cas ce sont les réseaux MT souterrains qui présentent le plus grand risque car ce courant est soit limité à une valeur supérieure (1000 A en France), soit non limité comme dans certains pays.

L'essai de $2U + 1000$ à la fréquence 50 Hz pendant 1 mn permet de vérifier la tenue en tension des matériels BT.

Enfin le SLT du poste a un rôle important en ce qui concerne la transmission de l'onde de choc à la BT. En effet outre la surtension due à la transmission capacitive à travers le transformateur, l'onde de courant de foudre développe dans l'impédance de prise de terre une tension U_f d'autant plus importante que la prise de terre est selfique (cf. **fig. 12**).

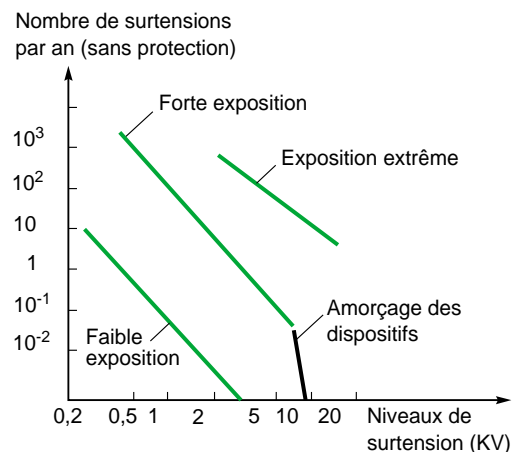


Fig. 11 : nombre et valeur des surtensions statistiquement possibles selon le niveau d'exposition à la foudre.

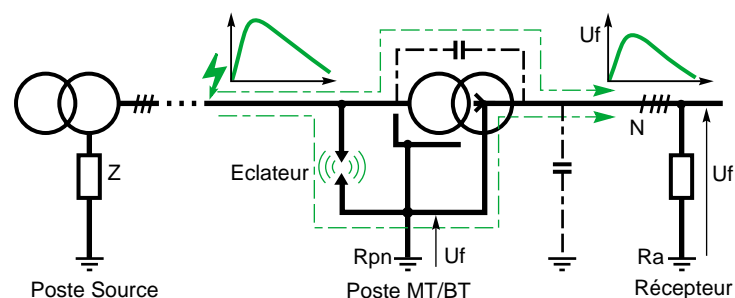


Fig. 12 : schéma TTN des liaisons à la terre d'un poste MT/BT (mises à la terre communes de l'éclateur, de la masse du transformateur et du neutre BT), et transmission de l'onde de foudre vers le réseau BT.

Pour tenir compte de ce phénomène, en France les postes « haut de poteau » sont installés (cf. **fig. 13**) avec des prises de terre du poste, du neutre et des récepteurs BT séparées (schéma appelé à prises de terre séparées, TTS selon NF C 13-103).

Cette disposition permet d'éviter la montée en potentiel de l'installation BT et donc le risque de claquages en retour de l'appareillage et des récepteurs BT (cf. **fig. 14**). Les équipements MT, de part leurs normes de fabrication, peuvent supporter ces surtensions (tenue à l'onde de choc 125 kV pour un matériel de tension spécifiée 24 kV). Lors d'un claquage HT/BT dans le transformateur, c'est la valeur de R_n ou R_{pn} qui évite les claquages en retour dans le matériel BT.

Des relevés, réalisés en grande partie en Suisse par Landis et Gyr, et publiés notamment par

l'I.E.E.E., montrent que des surtensions transitoires dépassant un kilovolt se rencontrent plusieurs fois par an, en divers points d'un réseau de distribution basse tension (cf. **fig. 15**). Il est relativement exceptionnel de détecter des surtensions supérieures à 6 ou 7 kV car, à ces niveaux, il se produit un phénomène d'amorçage dans l'air, ou dans le câblage qui agit comme éclateur. Cet amorçage, ou claquage diélectrique, écrête les surtensions à un niveau d'autant plus bas que le câblage est moins soigné. Une telle « protection » endommage l'installation et peut créer de graves problèmes de sécurité par percement, contournement et charbonnage des isolants. La solution pour les sites exposés est la mise en œuvre de parafoudres entre les conducteurs actifs et la terre, pour plus de précisions voir le Cahier Technique n° 179.

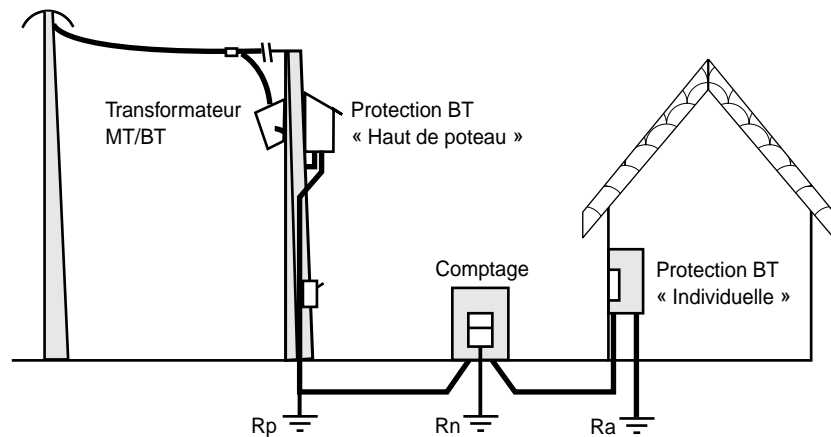
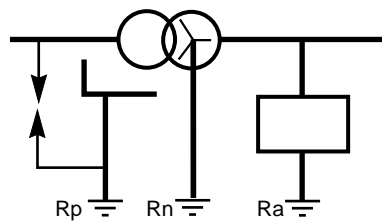


Fig. 13 : poste MT/BT « haut de poteau ». Schéma TTS des liaisons à la terre d'un poste MT/BT (mises à la terre séparées de l'éclateur, de la masse du transformateur et du neutre BT). Ce SLT est ITS si un limiteur de surtension est inséré dans la liaison à la terre du neutre BT.



$R_p \leq 30 \Omega$ car le matériel du poste (transformateur et disjoncteur haut de poteau) est surisolé à 20 kV choc.

$R_n \leq 4 \Omega$ pour couvrir le risque de claquage en retour du matériel BT de l'abonné suite à un claquage HT/BT, cette valeur résulte du calcul suivant :

$$R_n \leq \frac{2 \times U + 1000 - U}{300 A}$$

$$R_n \leq \frac{2 \times 220 + 1000 - 220}{300} = 4 \Omega$$

Fig. 14 : prises de terre d'un poste MT/BT alimenté par des lignes aériennes.

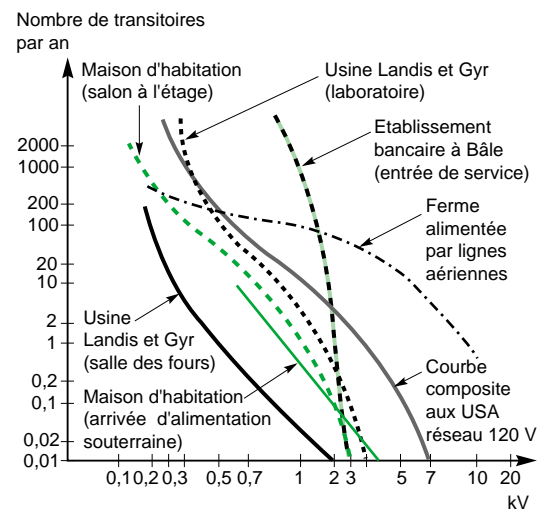


Fig. 15 : fréquences et valeurs crête des surtensions dues à la foudre sur des installations BT (source : Landis et Gyr).

Mancœuvres de l'appareillage et fonctionnement des protections BT

■ Les bobines des relais et les contacteurs ont une impédance de caractère selfique, et interrompre un « courant selfique » provoque presque toujours des surtensions importantes. Dans le cas d'un relais (cf. **fig. 16**), lorsque le courant est coupé brutalement par l'interrupteur K, l'énergie $1/2 Li^2$ se transforme en énergie $1/2 CV^2$ d'où une surtension :

$$V = i \sqrt{\frac{L}{C}} = 0,15 \sqrt{\frac{10^{-1}}{0,25 \times 10^{-9}}} = 3000 \text{ V}$$

Les surtensions observées peuvent atteindre près de 10 kV sur un circuit 230V.

Ces auxiliaires de commande devraient être antiparasités par leurs constructeurs, sinon un circuit RC, ou une varistance, placé en parallèle sur leur bobine permet d'absorber la surtension.

■ Sur les réseaux BT et HT, à vide ou faiblement chargés, interrompre un faible courant inductif n'est pas facile et entraîne la création de surtensions souvent multiples (trains d'ondes). Sur le circuit monophasé de la **figure 17**, pris pour exemple, lorsqu'on ouvre l'interrupteur K, le courant continue à circuler dans L_2 avec, aux bornes de C_2 , la tension V_{BN} :

$$V_{BN} = i \sqrt{\frac{L_2}{C_2}} \sin \omega_2 t.$$

Il en va de même en ce qui concerne le réseau amont avec aux bornes de C_1 la tension :

$$V_{AN} = i \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \sin \omega_1 t.$$

A l'instant de l'ouverture, les tensions V_{BN} et V_{AN} évoluent en opposition et la tension V_{AB} devient vite suffisamment importante pour qu'il y ait un réallumage de l'arc (réamorçage entre les contacts de l'appareil de coupure K).

Le courant à couper est faible, les contacts s'écartant, et le battement entre les deux tensions V_{BN} et V_{AN} , sont des éléments qui font que l'arc s'éteint, puis les tensions remontent et le phénomène redémarre...

Plusieurs cycles appelés réamorçages peuvent ainsi se produire, ceci jusqu'à ce que l'énergie dissipée par l'arc, et l'écartement des contacts qui augmente, arrêtent le phénomène.

Le résultat est l'apparition de trains d'ondes, de

tension et de fréquence élevées ($\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$),

véritables générateurs de parasites.

L'existence de différents circuits à vide avec self ou transformateur, et d'appareils de coupure à ouverture lente, fait que ce phénomène est assez fréquent ; il est même observé lors de la coupure de courant de court-circuit, lorsqu'en fin de coupure le courant devient suffisamment faible pour être « arraché ».

■ Couper un courant de court-circuit peut aussi présenter des risques de surtensions puisque :

- il faut agir très vite, avant que le courant n'atteigne l'intensité de court-circuit présumée,
- et « insérer » dans le circuit une tension d'arc qui n'est pas toujours facile à maîtriser selon les conditions de coupure, car cette tension d'arc constitue une surtension de plusieurs centaines de volts pour les disjoncteurs et parfois de plusieurs kV pour les fusibles (cf. **fig. n° 18**).

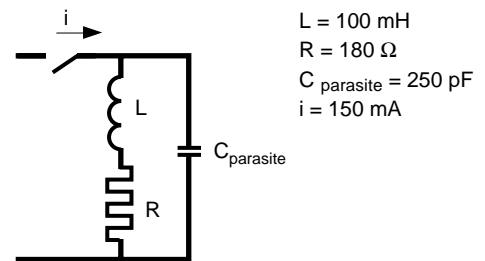
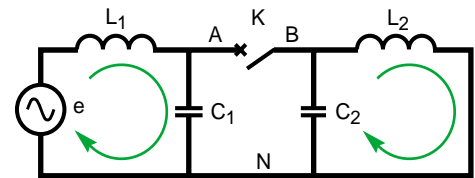


Fig. 16 : schéma équivalent d'un relais.



L_1, C_1 = inductance et capacité du réseau amont,
 L_2, C_2 = inductance et capacité du réseau aval.

Fig. 17 : schéma équivalent d'un circuit monophasé.

	Disjoncteur C32L	Fusible GL 20 A
I _{cc} présumé (kA)	11	4
Cos φ	0,25	0,3
U (V)	380 + 10 %	380 + 10 %
Surtension (V)	400 à 650	2100 à 2650
U + ΔU		

Fig. 18 : surtensions relevées avec deux dispositifs de protection testés sur la même installation d'essais.

Sur ce dernier point, il faut noter que :

□ plus le court-circuit se produit près des bornes aval de l'appareil de coupure, plus la surtension est élevée et brève. Ainsi les résultats présentés par la **figure 19** ont été relevés pour un défaut présent sur un câble de section 1,5 mm² en aval d'un fusible 10 A :

avec L = 0

$$\frac{\Delta U + U}{U} = \frac{1700 + 220\sqrt{2}}{220\sqrt{2}} = 6,4 \text{ et } T = 50 \mu\text{s}$$

avec L = 20 m

$$\frac{\Delta U + U}{U} = 2 \text{ et } T = 200 \mu\text{s}$$

□ généralement plus le calibre de la protection d'un départ est élevé (et donc la section de ses conducteurs importante) par rapport à la puissance de court-circuit du « jeu de barres » plus la surtension est faible et longue. La **figure 20** présente une synthèse graphique de plusieurs essais.

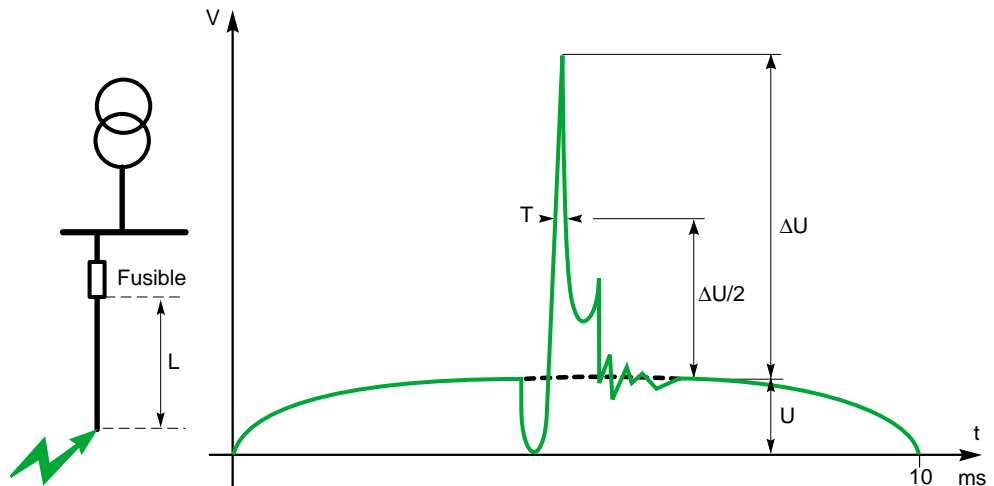


Fig. 19 : la surtension est fonction de la distance séparant le défaut de la protection.

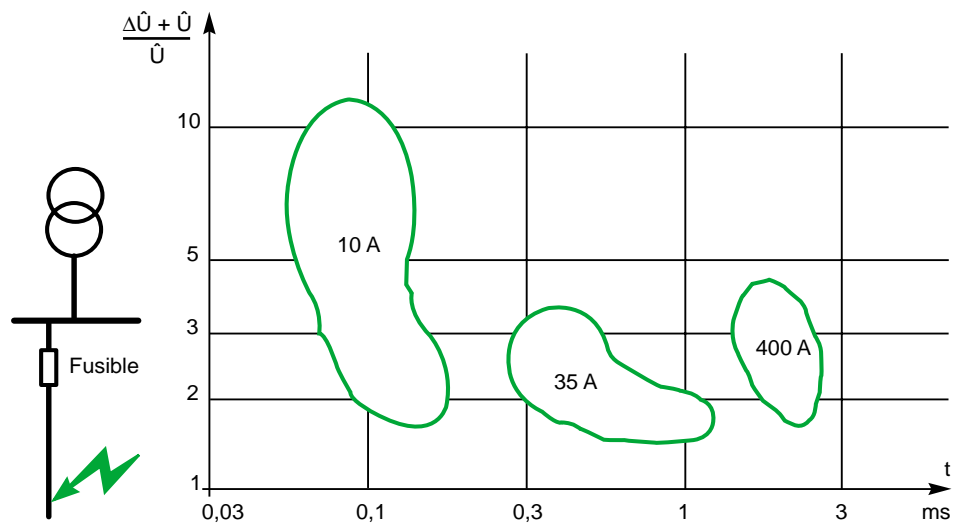


Fig. 20 : avec une même puissance de court-circuit amont, les niveaux et les durées des surtensions sur un départ sont fonction du calibre de sa protection, et de la section de ses conducteurs.

Ferrorésonance

C'est un phénomène qui peut apparaître sur les réseaux non ou faiblement chargés, surtout observé en haute tension, mais qui peut se manifester derrière de petits transformateurs ou en présence de filtres.

Le lecteur intéressé peut se reporter à l'annexe 3 et lire le Cahier Technique n° 190.

Essais et remèdes relatifs aux surtensions

Les surtensions impulsionnelles transmises par conduction, effet inductif ou capacitif, sont très

dangereuses notamment pour les appareils électroniques. Dans ce domaine, l'expérience a permis de définir des essais.

■ Les ondes normalisées pour tester les matériels.

Elles sont (cf. **fig. n° 21**), pour la plupart, reprises aujourd'hui dans les publications CEI 61000 et plus particulièrement 61000-4-4, 61000-4-5 et 61000-4-12 (cf. Annexe 3). Outre les formes d'onde, les normes prévoient des niveaux qui correspondent à des conditions d'utilisation puis à des tensions d'essai pour les

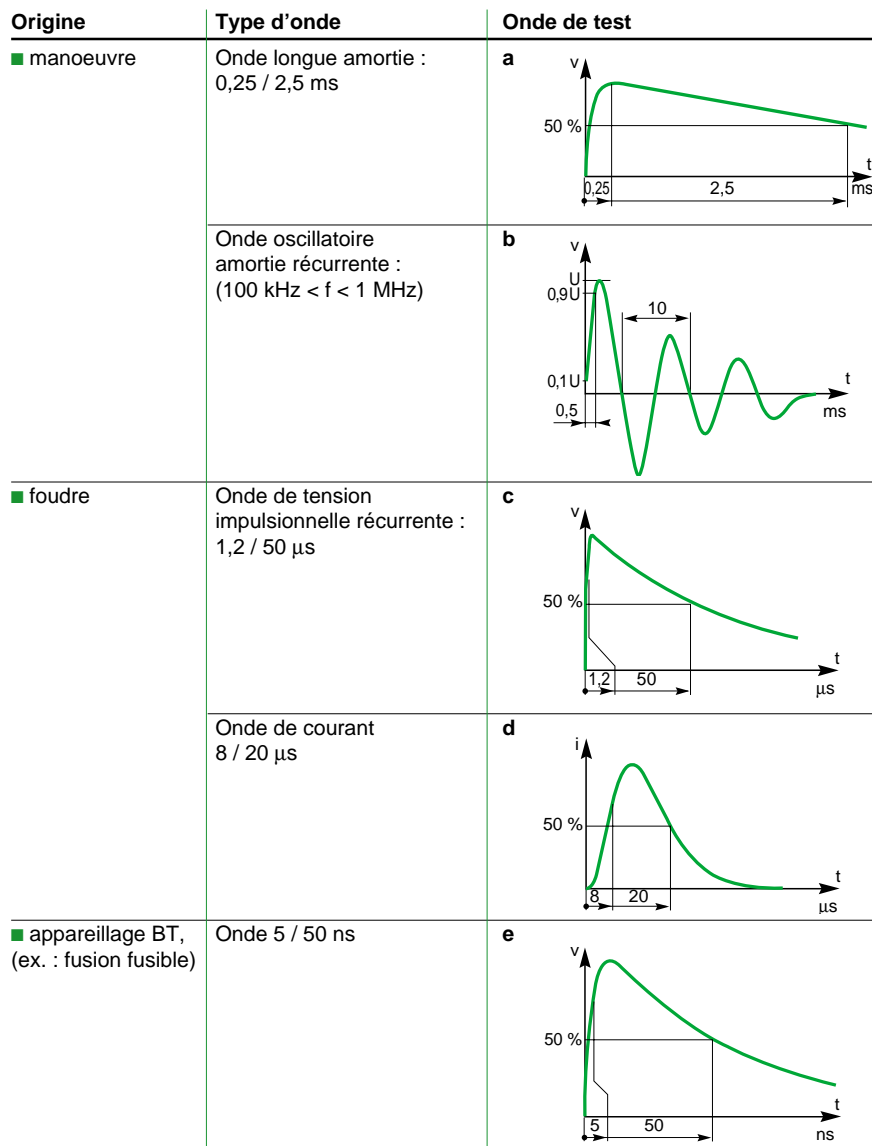


Fig. 21 : les principales formes d'ondes d'essai normalisées.

constructeurs de matériel. A titre d'exemple, la **figure n° 22** donne, pour les différents niveaux, les tensions pour l'essai à l'onde de tension impulsionnel (cf. courbe **d** de la figure n° 21).

■ Les remèdes contre les surtensions

Ils s'appliquent autant lors de la mise en œuvre que lors du choix des appareils :

□ lors de l'installation, il est conseillé de veiller à éloigner les sources de surtensions des

matériels les plus sensibles, ainsi qu'à l'équipotentialité des équipements,

□ lors du choix il peut être utile de prévoir des :

- blindages électrostatiques ou des condensateurs (cf. annexe 3),

- transformateurs à écrans,

- filtres,

- limiteurs de surtension (cf. **fig. n° 23**).

Il existe aussi des limiteurs de surtension basse tension destinés aux installations ayant un SLT IT (à neutre isolé de la terre). Définis en France par la norme NF C 61-740 ils sont destinés à empêcher toute élévation de tension due à un défaut MT ; le Cahier Technique n° 179 traite de leur mise en œuvre.

Niveau	Tension d'essai $\pm 1\%$ (kV)
1	0,5
2	1
3	2
4	4
x	Spécial

Le niveau « x » est ouvert : il est à définir pour des spécifications particulières de matériels.

Fig. 22 : les tensions d'essai selon la norme CEI 61000-4-5.

	U limitée (kV)	I max (kA) (onde 8/20)
Varistances	14 à 1200	10 à 5000
Diode de redressement	5 à 400	10 à 1000

Fig. 23 : caractéristiques de différents types de limiteurs de surtension.

3 Les perturbations de l'onde sinusoïdale

Les tensions (ondes) observées, de façon permanente ou temporaire, sur les réseaux ne sont jamais parfaitement sinusoïdales, car :

- les générateurs (alternateurs) sont plus ou moins parfaits,

- les transformateurs sont aussi imparfaits,
- les récepteurs génèrent ou absorbent des harmoniques,
- le réseau sert de véhicule à différents signaux (courants porteurs).

3.1 Les générateurs

Les appareils bon marché, généralement de faible puissance, génèrent souvent des harmoniques (cf. **fig. 24**).

3.2 Les transformateurs

Lorsqu'ils sont calculés au plus juste, ils commencent à saturer dès que la tension dépasse leur valeur nominale et ils absorbent alors un courant non sinusoïdal (cf. **fig. 25**).

3.3 Les récepteurs

Les condensateurs

Les courants harmoniques sont d'autant mieux absorbés par un condensateur que leur fréquence est élevée. Le courant absorbé par les condensateurs est donc une caricature de la tension du réseau sur lequel ils sont placés. Associés à des inductances ils composent des filtres nettoyeurs de réseaux et absorbent alors un courant non sinusoïdal (cf. Cahier Technique n° 152).

Les tubes fluorescents

Les arcs électriques absorbent des courants non sinusoïdaux particulièrement chargés en harmoniques. Le montage en « duo » et la compensation n'évitent pas que les tubes fluorescents génèrent des harmoniques.

Les redresseurs à commande de phase

Dans la grande majorité des cas, ils débitent sur un circuit selfique et absorbent successivement sur chaque phase un courant rectangulaire. A chaque commutation des semiconducteurs la sinusoïde de la tension l'alimentation est affectée d'une brève interruption (empiètement anodique), la **figure 26** donne une représentation des ondes de tension et de courant.

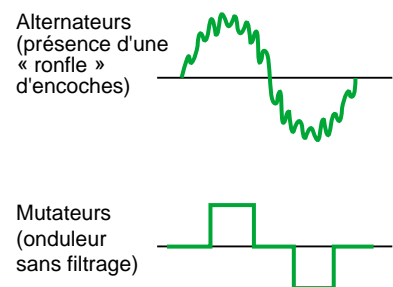


Fig. 24 : exemple d'onde de tension délivrée par des générateurs « bon marché ».

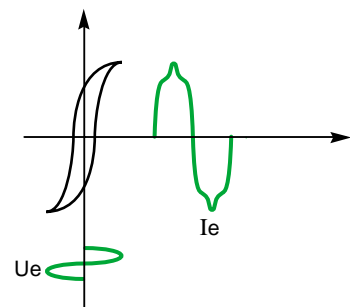


Fig. 25 : onde de courant à vide absorbée par un transformateur calculé trop juste.

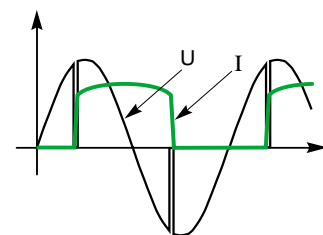


Fig. 26 : ondes de tension et de courant déformées par un redresseur à commande de phase.

Quant aux gradateurs de chauffe à contrôle de phase, chaque amorçage de thyristors entraîne un creux de tension de l'alimentation dû à la composante selfique de celui-ci suivi d'une faible chute de tension liée à la résistance interne de l'alimentation (cf. **fig. 27**).

3.4 Les alimentations à découpage

Très répandues (micro-ordinateurs, TV, électroménager,...), elles utilisent en circuit d'entrée un pont de diodes suivi d'un condensateur de filtrage qui génère des courants harmoniques importants.

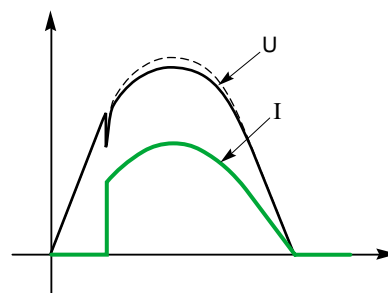


Fig. 27 : ondes de tension et de courant déformées par un gradateur de chauffe.

3.5 Les fours industriels

Ce sont de vrais pollueurs de réseaux :

- les fours à arc produisent un véritable bruit électrique contenant toutes les fréquences dont l'amplitude décroît avec la fréquence,

- les fours à induction HF sont des générateurs de parasites à bande étroite centrée sur quelques dizaines de kilohertz.

3.6 Les courants porteurs

Il s'agit de signaux additionnels qui sont volontairement injectés sur le réseau par le distributeur d'énergie électrique, par exemple pour télécommander les changements de tarif Jour/Nuit, tel le système Pulsadix (175 Hz) employé en France.

Ces signaux sont audibles avec un autoradio lorsque la voiture passe sous une ligne HT.

Leur fréquence varie selon les pays : 110 Hz, 175 Hz, 183 Hz, 217 Hz, 283 Hz, 317 Hz, 600 Hz, 1050 Hz, 1 350 Hz.

Les signaux sont constitués par des trains d'impulsions de la fréquence choisie, injectés

selon un certain code. Leur tension est de l'ordre de 10 V.

D'autres signaux véhiculés par le réseau peuvent aussi perturber le secteur chez un abonné BT :

- communications numériques, telles celles utilisées pour la gestion technique des bâtiments - GTB -,
- émissions d'interphones (quelques dizaines de kilohertz),
- ordres de télécommande (50 à 150 kHz).

3.7 Les effets des perturbations

Tout signal périodique, quelle que soit sa forme d'onde peut être considéré comme la somme de signaux alternatifs de fréquence égale à celle du signal, « Le fondamental », et multiples de celle du signal, « Les harmoniques ».

Les harmoniques, et les fréquences particulières injectées sur le réseau, produisent des effets néfastes, voire dangereux. Ainsi, les harmoniques :

- augmentent les pertes fer et les courants de Foucault dans les moteurs et les transformateurs,
- mettent en danger la vie des batteries de condensateurs, dont les protections long retard doivent prendre en compte les courants harmoniques,

- mettent en danger la vie des condensateurs de filtrage des alimentations de circuits électroniques,

- peuvent provoquer l'échauffement du conducteur neutre (les courants d'harmonique 3 et multiples de 3 générés par les alimentations à découpage et les tubes fluorescents s'ajoutent et reviennent à la source par le neutre).

Pour éviter tous ces risques, les protections électroniques à maximum de courant « long retard » ou de « surcharge » (équivalentes aux déclencheurs électromécaniques dits « thermiques ») doivent comporter un circuit mesurant la valeur efficace vraie du courant (en anglais : r.m.s.).

La norme EN 50160 indique, pour les réseaux publics de distribution, que « ... pendant chaque période d'une semaine, 95 % des valeurs efficaces de chaque tension harmonique moyennées sur 10 minutes, ne doivent pas dépasser les valeurs indiquées dans le tableau de la **figure n° 28**.

Des tensions plus élevées pour un harmonique donné peuvent être dues à des résonances.

De plus, le taux global de distorsion harmonique de la tension fournie (y compris tous les harmoniques jusqu'au rang 40) ne doit pas dépasser 8 % ».

Pour diminuer les courants et les tensions harmoniques, il est possible d'utiliser des filtres passifs ou compensateurs actifs (cf. Cahier Technique n° 183).

Harmoniques impairs				Harmoniques pairs	
Multiples de 3		Non multiples de 3			
Rang	Tension relative (% Un)	Rang	Tension relative (% Un)	Rang	Tension relative (% Un)
3	5	5	6	2	2
9	1,5	7	5	4	1
15	0,5	11	3,5	6 à 24	0,5
21	0,5	13	3		
		17	2		
		19	1,5		
		23	1,5		

Fig. 28 : valeurs des tensions d'harmoniques aux points de fourniture (source EN 50160).

4 Les perturbations particulières aux systèmes polyphasés

4.1 Les déséquilibres de courant et tension

Les réseaux électriques sont généralement triphasés, ils alimentent des récepteurs triphasés mais aussi beaucoup de récepteurs monophasés. Les courants absorbés sur les trois phases sont donc d'amplitude différente, d'où des déséquilibres de tension.

Ces déséquilibres de tension engendrent des composantes inverses de courant (cf. fig. 29) qui provoquent principalement des couples de freinage parasites et des échauffements dans les moteurs à courant alternatif.

Au niveau européen la norme EN 50160 précise : « Dans des conditions normales d'exploitation, pour chaque période d'une semaine, 95 % des valeurs efficaces calculées sur 10 minutes de la composante inverse de la tension d'alimentation doit se situer entre 0 et 2 % de la composante directe.

Dans certaines régions des déséquilibres peuvent atteindre 3 %.

En France, EDF estime qu'au niveau des réseaux BT (chez le client) le taux de

déséquilibre ($\frac{V_i}{V_d}$), s'il est essentiellement fluctuant, a une valeur moyenne comprise entre 0,5 et 2 %.

Les taux les plus élevés sont observés sur les réseaux BT alimentés par un transformateur de faible puissance avec une majorité de branchements monophasés... C'est le cas des postes haut de poteau qui alimentent en monophasé peu d'abonnés BT.

Dans les cas difficiles, le couplage « Zig-Zag », permet d'atténuer le déséquilibre pour le réseau amont.

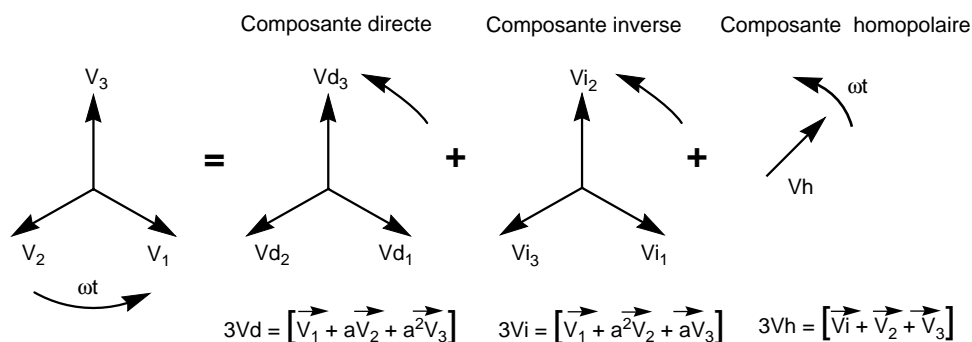


Fig. 29 : rappel des différentes composantes, directe, inverse et homopolaire du système triphasé.

4.2 Les déséquilibres de phase

Outre les effets des composantes inverses sur les moteurs, le déséquilibre des tensions triphasées perturbe le fonctionnement des dispositifs à thyristors à commande de phase (cf. **fig. 30**).

De plus les harmoniques, qui modifient le passage à zéro des tensions, peuvent perturber la synchronisation de l'allumage des thyristors.

Dans le domaine des protections contre les risques électriques, ce type de perturbation est également gênant car les déséquilibres de courant limitent l'utilisation du montage de Nicholson (mise en commun de quatre transformateurs de courant) pour détecter des courants résiduels dus à un défaut d'isolement (cf. Cahier Technique n° 114).

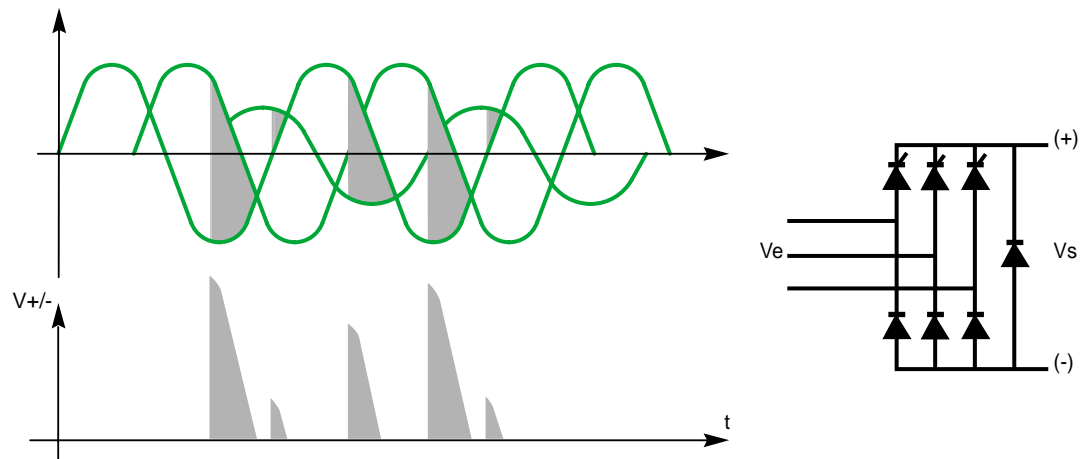


Fig. 30 : effet d'un déséquilibre de tension sur un redresseur en pont de Graetz semi-contrôlé.

5 Les perturbations électromagnétiques

5.1 Champs et rayonnements

Les perturbations des réseaux BT traitées dans les chapitres précédents sont essentiellement du type « par conduction », c'est-à-dire transmises par les conducteurs, les transformateurs, les capacités parasites, ...

L'électricien sait qu'un équipement placé à proximité d'un conducteur véhiculant un important courant 50 Hz va « récupérer » par couplage inductif une force électromotrice parasite, ceci est vrai pour tout circuit placé dans le champ magnétique (cf. **fig. 31**). Il sait aussi qu'un équipement placé à proximité d'un réseau HT va « récupérer » une tension parasite, ceci pour tout conducteur placé dans le champ électrique (cf. **fig. 32**).

On dit qu'un courant important « rayonne » un champ magnétique à basse impédance, et qu'une tension importante « rayonne » un champ électrique à haute impédance.

En effet, l'impédance d'un champ est égale à :

$$Z_c = \frac{E}{H}$$

En fait, tout champ électromagnétique est caractérisé par la présence simultanée des champs électrique et magnétique liés dans ce que l'on appelle le vecteur de Poynting :

$$\vec{P}(\text{W/m}^2) = \vec{E}(\text{V/m}) \wedge \vec{H}(\text{A/m})$$

L'impédance Z_c est fonction de la distance et de la fréquence (cf. **fig. 33**).

Si pour le 50 Hz on peut parler de champ E ou H, haute ou basse impédance, c'est parce que :

$$\frac{\lambda}{2\pi} = \frac{C}{2\pi f} = 1000 \text{ km.}$$

Autour d'un conducteur parcouru par un courant important le champ magnétique H décroît selon $1/r$ (r = rayon) jusqu'à $\lambda/2\pi$.

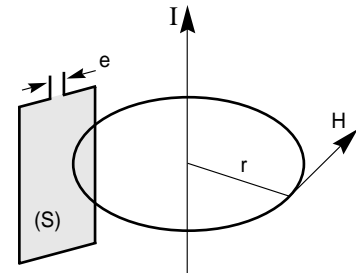
A proximité d'une antenne (haute impédance) c'est le champ E qui décroît en fonction de la distance en $1/r^3$.

Lorsque la distance dépasse $\lambda/2\pi$ les deux champs E et H décroissent selon $1/r$ et l'impédance est une constante qui, dans l'air, est égale à 377Ω . Lorsque l'émission d'un parasite est par exemple due à la fusion d'un fusible, le front de montée de l'onde étant de 5 ns, la fréquence équivalente est de 10^8 Hz.

La distance de transition est de

$$\frac{\lambda}{2\pi} = \frac{C}{2\pi f} = 5 \text{ cm, au delà les champs E}$$

et H décroissent en $1/r$; on dit que l'on est en « onde plane ».

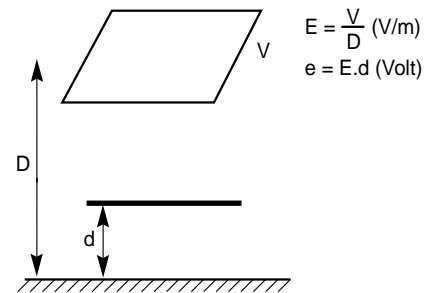


$$\vec{H} = \frac{I}{2\pi r} \text{ (A/m)}$$

$$\mathcal{O}_{(s)} = \int_{(s)} \mu \cdot H \cdot n \cdot ds \text{ (Weber)}$$

$$\vec{e} = - \frac{d\mathcal{O}}{dt} \text{ (Volt)}$$

Fig. 31 : tension induite par un courant.



$$E = \frac{V}{D} \text{ (V/m)}$$

$$e = E \cdot d \text{ (Volt)}$$

Fig. 32 : exemple d'un champ électrique.

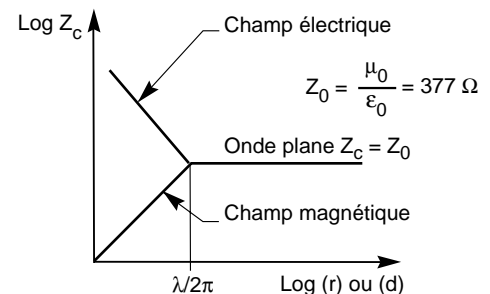


Fig. 33 : exemple d'impédance d'onde pour un bipôle.

Il existe une grande diversité de sources de perturbations rayonnées généralement divisées en deux grandes familles :

■ celles à spectre étroit : émetteurs radio, radars, fours à induction, micro-ondes, ...

- celles à spectre large : foudre, décharge électrostatique, appareils de coupure, moteurs à collecteurs, soudeuses, fours à arc, ...

A noter que certaines sources telles que les convertisseurs statiques et la foudre sont tout à la fois des générateurs de parasites conduits et rayonnés.

Les circuits électroniques sont les principales victimes des perturbations électromagnétiques, car ils traitent des signaux de tension très faibles et ont de grandes impédances (ils consomment de moins en moins). Les parasites arrivent sur la « victime » essentiellement par le câblage qui entre et qui sort du boîtier (ceci par couplage en mode commun - mode différentiel - impédance commune - diaphonie). Par ailleurs, le tracé des circuits imprimés et les composants peuvent et doivent être déterminés pour obtenir une susceptibilité électromagnétique minimale.

Les fonctions les plus sensibles sont :

- les amplificateurs BF (passe bas),
- les circuits d'entrée (intégrateurs),

- les circuits logiques (numériques).

De plus, le développement des communications numériques est à l'origine de nouvelles difficultés car les bus créent, avec le réseau électrique, des boucles sensibles aux champs magnétiques développés par les forts courants électriques et les coups de foudre proches. Des précautions sont donc à prendre lors de l'étude et de la réalisation des installations (cf. Cahier Technique n° 187).

Dans le domaine de la BT, des essais d'immunité contre les champs rayonnés sont définis dans la norme CEI 61000-4-3 et sections suivantes, ainsi, les déclencheurs des disjoncteurs Compact de la marque Merlin Gerin sont-ils testés suivant le degré de sévérité maximal de la norme CEI 947-2 qui fait référence aux normes CEI 61000.

Enfin, pour mieux connaître la compatibilité électromagnétique - CEM -, le lecteur peut se reporter au Cahier Technique n° 149.

5.2 Décharges électrostatiques

Ce type de perturbation gêne et/ou détruit les appareillages électroniques mais « n'agresse pas » les réseaux électriques.

En effet, l'électronique est particulièrement sensible à ces décharges électrostatiques car elle utilise de plus en plus de composants « bas niveaux », à faible consommation et haute impédance. Et ces appareillages ont toujours une partie accessible au toucher tels que voyants, potentiomètres, ... Or, une personne selon le type de chaussures qu'elle porte et du sol sur lequel elle se déplace, ainsi que de l'humidité de l'air, peut se « charger » à un potentiel atteignant 15 kV (phénomène modélisé et représenté sur la **figure 34**), dans ce cas le courant de décharge peut atteindre plusieurs dizaines d'ampères (cf. **fig. 35**) !

Immuniser et tester l'appareillage électronique à cette contrainte est devenue une nécessité. Ce sujet est traité dans la norme CEI 61000-4-2.

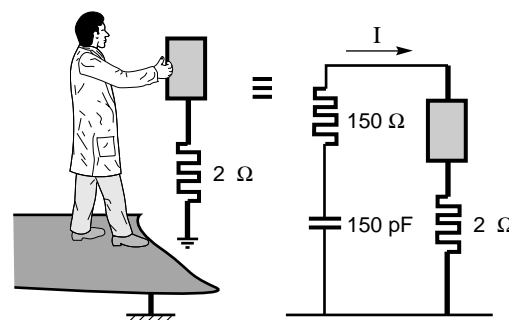


Fig. 34 : modélisation du circuit de charge électrostatique d'une personne.

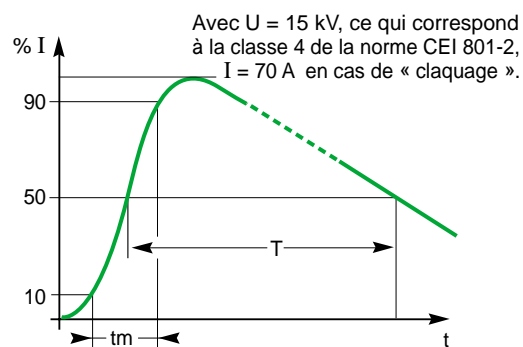


Fig. 35 : courant de décharge électrostatique ($t_m = 5 \text{ ns}$, $T = 30 \text{ ms}$).

6 Conclusion

Les réseaux BT sont très pollués car soumis à de multiples agressions d'origines diverses : externes (sources, réseaux MT,...), d'exploitation (élimination des défauts, commande par courant porteur,...), des utilisations (fours, récepteurs électroniques,...). Et dans le même temps, les exigences de qualité du produit « électricité » ainsi que de sûreté de fonctionnement des matériels électriques et électroniques, que ce soit pour la production, la gestion ou le commerce, sont de plus en plus fortes.

■ Les utilisateurs, sensibilisés aux dysfonctionnements et aux pertes d'exploitation, cherchent à contrôler l'énergie qui leur est délivrée. Ils font de plus en plus de mesures des grandeurs classiques (de tension, d'intensité, de puissance, de $\cos \varphi$). Ils enregistrent les surtensions, les creux et les absences de tension, ... Ils veulent aussi connaître par exemple :

- le taux global d'harmoniques,
- le niveau des harmoniques,
- le facteur de crête,
- le taux de déséquilibre des tensions.

■ Les distributeurs d'énergie, de leur côté, se doivent de garantir un certain niveau de qualité du produit « électricité » livré (cf. annexe 3 : la norme EN 50160),

■ Les constructeurs d'appareillage, électrique et électronique, ont l'obligation de respecter la directive européenne relative à la CEM dès la conception de leurs produits qu'ils essaient

ensuite selon les prescriptions des normes telles que la CEI 61000 (cf. annexe 3). Mais de plus en plus ils proposent de nouveaux produits à même de répondre à l'attente des utilisateurs vis-à-vis du suivi de la qualité de l'énergie et de la fiabilité de la distribution, par exemple :

- des unités de contrôle placées dans les disjoncteurs permettent toutes les mesures (I , F , P , $\cos \varphi$, ...),
- des centrales de tableaux permettent maintenant de connaître les puissances et énergies réactives et apparentes instantanées, maximales, et moyennes sur une période déterminée ; elles peuvent mesurer aussi les taux d'harmoniques, le facteur crête, les déséquilibres de phase (de tension et de courant).

■ Et les électriciens professionnels, dans leur métier (du concepteur au câbleur), doivent s'inquiéter des différentes perturbations probables afin de trouver les solutions les plus adéquates. Les concepteurs par exemple doivent prévoir des sources de secours, des Alimentations Sans Interruption - ASI -, des parafoudres, des filtres ou des compensateurs actifs d'harmoniques.

Dans ce sens, pour toutes les personnes intéressées à la qualité et la disponibilité de l'énergie électrique tout au long de sa distribution, ce Cahier Technique, en expliquant les différentes perturbations pouvant affecter les réseaux et les équipements électriques, est un premier outil : il doit leur permettre de mieux les connaître, pour mieux les combattre.

Annexe 1 : transmission des surtensions à travers les transformateurs

Transfert magnétique

Pour un transformateur MT/BT, pas ou peu chargé, les surtensions de foudre et de manœuvre sont transmises au secondaire en fonction du rapport de transformation auquel on applique un coefficient correcteur.

Ce coefficient est en général inférieur à 1,3 pour l'onde de foudre 1,2 / 50 μ s, et il ne dépasse que rarement 1,8 pour les surtensions de manœuvre selon l'onde 250 / 2500 μ s spécifiée par la CEI 60060-2.

Par exemple dans le cas d'un transformateur 20 kV / 410 V - Dyn 11, son rapport de transformation a pour valeur :

$$\frac{20\,000}{410} = 48,8.$$

■ une onde 1,2 / 50 μ s de 125 kV appliquée sur son enroulement primaire donne à son secondaire une onde de forme « ressemblante » d'amplitude égale à :

$$125\text{ kV} \times \frac{1}{48,8} \times 1,3 = 3,3\text{ kV crête.}$$

■ une onde 250 / 2500 μ s de 90 kV donne :

$$90\text{ kV} \times \frac{1}{48,8} \times 1,8 = 3,3\text{ kV crête.}$$

Transfert capacitif

Il dépend de la disposition des enroulements primaire et secondaire par rapport à la masse du transformateur.

Généralement pour chaque « colonne » l'enroulement BT est proche du noyau et l'enroulement MT en est relativement éloigné puisque placé autour de l'enroulement BT (cf. **fig. 36**).

La surtension transmise au secondaire, par les différentes « capacités parasites » du transformateur (cf. **fig. 37**), se calcule par la formule :

$$U_s = U_e \frac{C_{BT / Masse}}{C_{HT / Masse} + C_{BT / Masse}}$$

Dans le plus mauvais des cas, selon la CEI 60071-2, elle peut atteindre 0,7 U_e .

Dans la réalité le coefficient de transmission est de l'ordre de 0,3 pour un transformateur MT/BT sans aucun raccordement au secondaire. La présence des capacités entre les conducteurs actifs et la masse au niveau du tableau général BT - TGBT - diminue considérablement ces surtensions.

Rappelons que pour éviter les claquages dans la partie BT des postes alimentés « en aérien », l'appareillage installé doit être à isolation renforcée (10 kV / 50 Hz), et qu'il est fortement recommandé d'installer des parafoudres dans le TGBT. De plus, si le TGBT comporte des auxiliaires de contrôle-commande leur alimentation doit se faire par l'intermédiaire d'un transformateur BT/BT à écran.

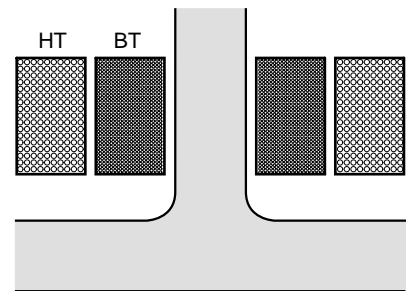


Fig. 36 : position des bobinages sur une colonne de transformateur MT/BT.

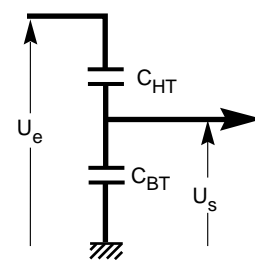


Fig. 37 : schéma des transferts capacitifs des surtensions au sein d'un transformateur MT/BT.

Annexe 2 : la ferrorésonance

En théorie

Le phénomène de résonance série (et parallèle) est bien connu.

Lorsque $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, les tensions développées

par L et C sont identiques, opposées et en valeur absolue bien plus élevées que la tension e (cf. **fig. 38**).

Le phénomène de ferrorésonance série (et parallèle) en est un cas particulier qui intervient lorsque la self est à fer donc saturable.

Si on trace l'évolution des valeurs absolues des diverses tensions pour une fréquence donnée en fonction du courant (cf. **fig. 39**), on observe sur les courbes qu'il existe deux points de fonctionnement stables A et B. Il suffit pour passer de A à B qu'un transitoire, un parasite, augmente temporairement la valeur de e et dépasse la tension limite au point E.

En pratique

Les tensions développées dans L et C sont alors très élevées, il y a risque de claquage diélectrique et un récepteur de faible puissance placé en parallèle sur C risque fort d'être détruit.

Il faut noter que, tant que les courbes $\frac{i}{C\omega}$ et $L_0\omega i$

se coupent, le risque de ferrorésonance existe, donc :

- La ferrorésonance peut se produire pour une large plage de fréquences, dont le 50 Hz et ses harmoniques, dans ce cas, l'onde de tension à 50 Hz est surmodulée par une tension importante à 150 Hz par exemple,

- Pour être certain de l'éviter il faut que $\frac{1}{C\omega}$ soit supérieur à $L_0\omega$ ($L_0 = L$ à faible induction), ou que le circuit soit toujours chargé (amorti).

En conclusion

Le concepteur de matériel BT doit tenir compte du risque de ferrorésonance, qui peut se manifester sur les « réseaux » à vide, en ce qui concerne :

- la tenue diélectrique phase/masse de l'appareillage (≥ 8 à $10 U_n$),
- la tension d'alimentation des récepteurs de très faible puissance (les protections électroniques à propre tension par exemple).

Pour plus d'informations sur ce phénomène consulter le Cahier Technique n° 190.

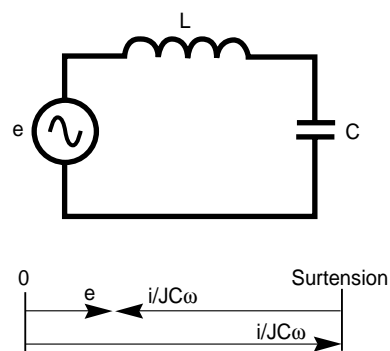


Fig. 38 : un circuit résonant.

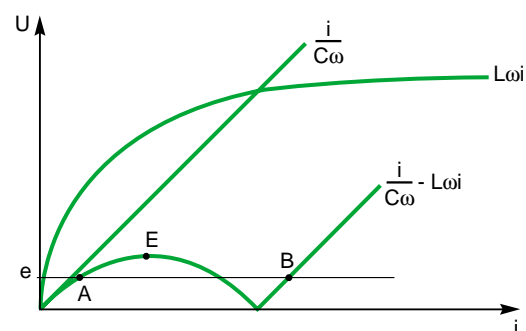


Fig. 39 : principe de la ferrorésonance.

Annexe 3 : bibliographie

Normes

■ EN 50160 : Caractéristiques de la tension fournie par les réseaux publics de distribution. Cette norme spécifie en MT et en BT :

- fréquence,
- amplitude de la tension fournie,
- variation de la tension fournie,
- variation rapide de la tension,
- creux de la tension,
- coupures brèves de la tension fournie,
- coupures longues de la tension fournie,
- surtensions temporaires sur le réseau entre phase et terre,
- surtensions transitoires entre phase et terre,
- déséquilibre de la tension fournie,
- tensions harmoniques,
- tensions interharmoniques,
- transmission de signaux d'information sur le réseau.

■ CEI 60038 : Tensions normales de la CEI.

■ CEI 60060-2 : Techniques des essais à haute tension - Partie 2 : Systèmes de mesure.

■ CEI 60071-2, NF C 10-102 : Coordination de l'isolement - Partie 2 : Guide d'application.

■ CEI 60364, NF C 15-100 : Installation électrique des bâtiments.

■ CEI 60664 : Coordination de l'isolement des matériels dans les systèmes (réseaux) à basse tension.

■ CEI 61000 : Compatibilité électromagnétique (CEM), avec ci-après une sélection de ses parties les plus intéressantes pour une première approche :

□ 1.1 : Définitions et termes fondamentaux.

□ 2 : Environnement :

- Environnement électromagnétique pour les perturbations conduites basse fréquence et la transmission de signaux sur les réseaux publics d'alimentation.
- Niveaux de compatibilité pour les perturbations conduites basse fréquence et la transmission de signaux sur les réseaux publics d'alimentation à basse tension.
- Phénomènes rayonnés et phénomènes conduits à des fréquences autres que celles du réseau.
- Champs magnétiques basse fréquence en environnements divers.

□ 3 : Limites :

- Limites pour les émissions de courant harmonique (appareils ≤ 16 A par phase).
- Limitation des fluctuations de tension et du flicker dans les réseaux basse tension pour les équipements ayant un courant appelé ≤ 16 A.
- Transmission de signaux dans les installations électriques à basse tension.

□ 4 : Techniques d'essai et de mesure :

- Essais d'immunité aux décharges électrostatiques.
- Essai d'immunité aux champs électromagnétiques rayonnés aux fréquences radioélectriques.
- Essais d'immunité aux transitoires électriques rapides en salves.
- Essai d'immunité aux ondes de choc.
- Guide général relatif aux mesures d'harmoniques et d'interharmoniques.
- Essai d'immunité au champ magnétique à la fréquence du réseau. Publication fondamentale en CEM.
- Essai d'immunité au champ magnétique impulsionnel.
- Essai d'immunité au champ magnétique oscillatoire amorti.
- Essais d'immunité aux creux de tension, coupures brèves et variations de tension.
- Essai d'immunité aux ondes oscillatoires.
- Essai d'immunité aux perturbations conduites en mode commun dans la gamme de fréquences de 0 Hz à 150 kHz.

Nota :

Le lecteur particulièrement intéressé par les documents normatifs peut consulter les sites internet.

■ Pour la CEI : « <http://www.iec.com> »,

■ Pour l'UTE : « <http://www.ute-fr.com> ».

Cahiers Techniques Schneider Electric

■ Les dispositifs différentiels résiduels.
R. CALVAS, Cahier Technique n° 114.

■ La compatibilité électromagnétique.
F. VAILLANT, Cahier Technique n° 149.

■ Les perturbations harmoniques dans les réseaux industriels, et leur traitement.
P. ROCCIA et N. QUILLON,
Cahier Technique n° 152.

- Permutation automatique des alimentations dans les réseaux HT et BT, G. THOMASSET, Cahier Technique n° 161.
- La foudre et les installations électriques HT. B. DE METZ-NOBLAT, Cahier Technique n° 168.
- Les schémas des liaisons à la terre en BT, (régimes du neutre). B. LACROIX, R. CALVAS, Cahier Technique n° 172.
- Flicker ou scintillement des sources lumineuses R. WIERDA, Cahier Technique n° 176.
- Perturbations des systèmes électroniques et schémas des liaisons à la terre. R. CALVAS, Cahier Technique n° 177.
- Surtensions et parafoudres en BT - coordination de l'isolement en BT -. Ch. SERAUDIE, Cahier Technique n° 179.
- Coexistence courants forts - courants faibles. R. CALVAS, J. DELABALLE, Cahier Technique n° 187.
- La ferrorésonance P. FERRACCI, Cahier Technique n° 190.

Ouvrages divers

- Caractéristique de la tension d'alimentation BT. Rapport UNIPED (Union Internationale des Producteurs et Distributeurs d'Electricité) 1981.
- Qualité de l'alimentation électrique. EDF, 09-90, Cahiers de l'ingénierie.
- La compatibilité électromagnétique A. KOUYOUMDJIAN, Institut Schneider Formation, 07-96.

Schneider Electric

Direction Scientifique et Technique,
Service Communication Technique
F-38050 Grenoble cedex 9
Télécopie : (33) 04 76 57 98 60

Réalisation : Schneider Electric
Edition : Schneider Electric
Impression : Imprimerie du Pont de Claix - Claix - .
- 100 FF -