

Qualité de la tension des réseaux de distribution électrique : Estimations des proportions d'utilisateurs mal desservis

Hélène CASTERMANT ()*, *Michel DIEBOLT (**)*,
*Myriam MAUMY-BERTRAND (***)*, *Claire REINHARDT (****)*

() Université de Strasbourg*
*(**) Électricité de Strasbourg*
*(***) IRMA, Université de Strasbourg*
*(****) Université de Strasbourg*

Introduction

Le décret 2007-1826 du 24 décembre 2007¹ contraint chaque gestionnaire de réseau public d'électricité à évaluer annuellement le pourcentage d'utilisateurs de son réseau qui sont mal alimentés en électricité. L'un des critères étant la qualité de la tension, Électricité de Strasbourg, distributeur local dans le département du Bas-Rhin (département 67), a souhaité estimer la proportion d'utilisateurs de son réseau qui subissent des chutes de tension ou des surtensions excessives.

De façon un peu plus détaillée, le décret impose tous les ans que « chaque gestionnaire de réseau public de distribution d'électricité évalue le pourcentage d'utilisateurs du réseau mal alimentés, c'est-à-dire le pourcentage d'utilisateurs dont les points de connexion connaissent au moins une fois dans l'année une valeur efficace de la tension BT ou HTA, moyennée sur 10 minutes, inférieure à 90% de la valeur de la tension nominale correspondante (...) ou supérieure à 110% de cette tension nominale ».

Un utilisateur BT (Basse Tension) est un client d'Électricité de Strasbourg, c'est-à-dire une personne, qu'il s'agisse d'une entreprise ou d'un particulier, ayant souscrit à un abonnement auprès d'Électricité de Strasbourg pour une puissance n'excédant pas 250kW.

Actuellement, les bases de données d'Électricité de Strasbourg ne permettent pas d'automatiser l'évaluation des problèmes de tension, mais Électricité de Strasbourg y travaille. De plus, il n'existe pas d'appareil de mesure de la tension chez les utilisateurs. Les compteurs actuels n'assurent pas cette fonction, mais une nouvelle génération de compteurs devrait l'intégrer, mais ils ne seront pas opérationnels en masse avant une dizaine d'années.

Ce document se concentrera sur le cas du réseau Basse Tension (BT). Sur ce réseau, la tension nominale, c'est-à-dire la tension distribuée en théorie, est de 230V en monophasé (400V en triphasé). Cependant la tension effectivement reçue par un utilisateur peut varier au cours du temps en fonction de divers paramètres tels que la puissance appelée sur le réseau, l'emplacement de l'utilisateur dans le réseau... Les valeurs de ces variables sont pour la plupart inconnues.

¹ Décret en détail disponible en ligne sur : <http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000017754536&dateTexte=> (date d'accès : 26 février 2009).

Afin de mieux appréhender la problématique, cet article commence par expliquer les notions d'électricité nécessaires. La section suivante aborde le plan de sondage adopté pour l'estimation de la proportion d'utilisateurs du réseau subissant des chutes de tension excessives, ce plan ayant été choisi à partir des données disponibles et des études de données préliminaires. Dans cette section est également détaillée la première campagne de mesures menée au cours de l'hiver 2007-2008. Enfin, la dernière section traite de la méthode choisie pour l'estimation de la proportion d'utilisateurs du réseau subissant des surtensions excessives.

1. Notions d'électricité

Afin de bien comprendre le problème posé dans ce document, nous allons rappeler au lecteur certaines notions d'électricité.

1.1. Notions principales

Dans ce document, il sera régulièrement question de puissance et de tension. Nous rappelons donc que la tension est exprimée en Volts (V), l'intensité du courant est exprimée en Ampères (A) et la puissance est exprimée en Watts (W). De plus la puissance est calculée en fonction de la tension et de l'intensité du courant.

La tension reçue par un utilisateur est inconnue en général et peut varier au cours du temps. La tension « autorisée » peut varier de plus ou moins 10% par rapport à la tension nominale. Si la valeur efficace de la tension moyennée sur dix minutes est en dehors de ces limites, l'utilisateur est considéré comme mal desservi par rapport au décret cité en début de document. Une tension inférieure à 207V correspond à une chute de tension excessive et une tension supérieure à 253V correspond à une surtension excessive.

1.2. Le réseau électrique

1.2.1. Les différents réseaux

Le réseau électrique se compose de l'ensemble des câbles électriques connectés entre eux. Il existe différents types de réseaux :

- le réseau HT (Haute Tension) qui est utilisé pour le transport et la répartition de l'électricité. Il se décompose en deux sous-réseaux :
 - le réseau HTB (Haute Tension B) qui sert à l'alimentation générale du niveau national (réseau 400kV) au niveau régional (réseau 63kV ou 90kV) ;
 - le réseau HTA (Haute Tension A) qui est le réseau de distribution local en moyenne tension (rayon de 10 à 20km autour d'un poste source) ;
- le réseau BT (Basse Tension) (tension inférieure à 1000V) qui sert à la distribution électrique dans les quartiers ou communes (rayon d'environ 500m autour des postes de distribution).

Chaque réseau est relié à un autre par l'intermédiaire d'un transformateur qui permet d'élever ou de diminuer la tension. Il existe des transformateurs de puissances diverses. Ce sont les transformateurs qui fixent le niveau de tension au départ d'un réseau. Cette tension chute généralement au fur et à mesure que l'on s'éloigne du poste d'alimentation (du transformateur).

1.2.2. Précisions sur le réseau BT

Les câbles reliant les utilisateurs aux postes d'alimentation sont de types divers. En effet, il existe plusieurs sections de câbles. De plus, les câbles sont soit en aluminium, soit en cuivre et ils sont soit aériens (sur des « poteaux »), soit souterrains.

La figure 1 représente un poste d'alimentation et le réseau BT qu'il alimente.

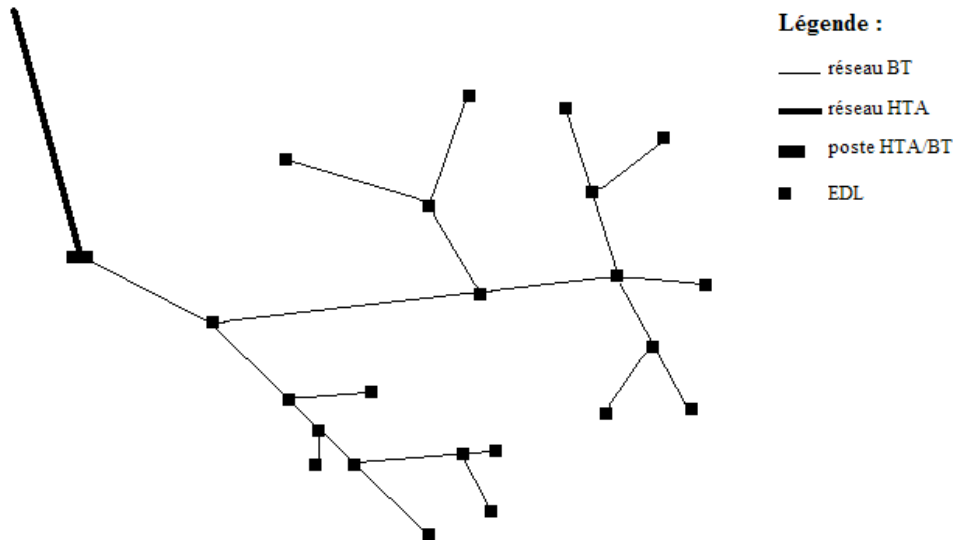


Figure 1 : Schéma simplifié d'un réseau BT

Un EDL (Espace De Livraison) est un coffret ou un potelet électrique. Il s'agit du « point d'entrée » du réseau électrique dans un bâtiment. Il y a un seul EDL par bâtiment. Un EDL peut comprendre un (une maison) ou plusieurs utilisateurs (par exemple un immeuble) et un utilisateur est raccordé à un unique EDL. De plus, chaque utilisateur n'est raccordé qu'à un seul poste d'alimentation électrique. Il faut noter que la longueur totale des câbles reliant l'utilisateur au poste d'alimentation est jugée importante si elle s'approche des 500 mètres.

1.3. Système triphasé et monophasé

L'alimentation d'un utilisateur en monophasé nécessite deux fils, le neutre et une phase. La majeure partie des particuliers sont alimentés en courant alternatif monophasé. Par contre, lors de la production d'électricité et de son transport jusque chez l'utilisateur, l'énergie électrique est sous forme triphasée. L'alimentation électrique triphasée utilise quatre câbles : trois phases et le neutre qui est relié à la terre. Chaque phase est parcourue par un courant alternatif sinusoïdal décalé de 120 degrés par rapport aux deux autres phases. Lorsque la somme vectorielle des trois phases est nulle le courant est dit équilibré.

Afin de rester le plus équilibré possible entre les phases, le Distributeur répartit au mieux les utilisateurs sur les trois phases. Le déséquilibre entre les phases est un des facteurs qui peut modifier la tension chez l'utilisateur.

2. Estimation de la proportion d'utilisateurs subissant des chutes de tension excessives

Une chute de tension se produit lorsque la tension est inférieure à la tension nominale. Le décret 2007-1826 cité au début de ce document autorise une baisse de la tension moyennée sur dix minutes jusqu'à -10% de la tension nominale (c'est-à-dire 207V) avant de considérer qu'il s'agit d'une chute de tension excessive.

2.1. Phénomène de chute de tension

2.1.1. Calcul de la chute de tension en réseau 230/400V

Le réseau est dimensionné et construit de telle sorte qu'entre le tableau de basse tension (dans le poste de transformation) et le coffret de branchement le plus mal desservi, la chute de tension maximale soit de 10%. Cependant, il peut arriver que les chutes de tension dépassent la valeur admissible. En effet, bien qu'à la base le réseau soit monté de sorte à ne pas connaître ce problème de tension, les cinq points suivants énoncent les raisons possibles :

- les calculs qui doivent être faits pour savoir comment ajouter un raccordement ne sont pas toujours traités jusqu'au bout par manque de temps ;
- les puissances consommées des utilisateurs peuvent augmenter selon les ajouts d'installations des utilisateurs ;
- les industries se développent sur le réseau BT ;
- pour raisons économiques, les rajouts de raccordement ne sont pas toujours faits comme il le faudrait ;
- le réseau est mis en place sachant que dans 95% des cas, les utilisateurs ne consomment pas simultanément leur puissance maximale. Mais des problèmes de tension peuvent survenir dans les 5% de cas restants.

La chute de tension relative en système triphasé peut être calculée par l'expression suivante :

$$\left(\frac{\Delta U}{U}\right)^{\%} = PL \frac{R_0 + X_0 \tan \varphi}{U} \times 100$$

avec :

- ΔU : chute de tension en triphasé en Volts ;
- U : tension composée du réseau en Volts (= 400V) ;
- P : puissance active transitant dans le tronçon en Watts ;
- L : longueur du tronçon en kilomètres ;
- R_0 : résistance linéique du conducteur en $\Omega \cdot km^{-1}$;
- X_0 : réactance linéique du conducteur en $\Omega \cdot km^{-1}$;
- φ : déphasage entre la tension et l'intensité qui sont en régime alternatif sinusoïdal. En l'absence de mesure du déphasage, on considère en pratique que $\tan \varphi = 0,4$.

Cette expression montre que la chute de tension relative est proportionnelle à la distance du tronçon et à la puissance active transitant dans le tronçon. Les résistances et réactances linéiques du conducteur dépendantes de la nature des câbles (aluminium, cuivre...) et de leur section jouent également un rôle dans la chute de tension relative.

Après avoir fait le calcul des chutes de tension relatives de chaque tronçon du réseau BT, il suffit de les sommer sur le trajet EDL-poste pour obtenir une estimation de la chute de tension constatée effectivement chez l'utilisateur étudié.

2.1.2. Exemple de calcul de chute de tension

Considérons le schéma électrique de la figure 1 :

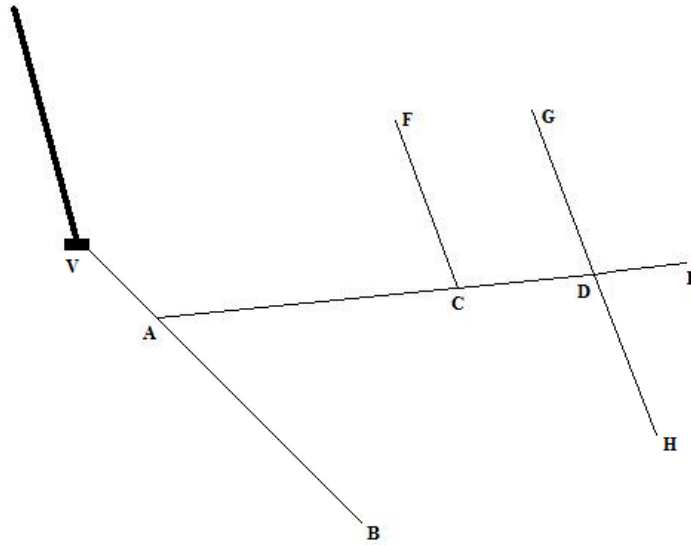


Figure 2 : Schéma électrique

Calculons les chutes de tension sur chaque tronçon avec les éléments suivants :

Tronçon	Section (mm ²)	Longueur (km)	R_0 ($\Omega.km^{-1}$)	X_0 ($\Omega.km^{-1}$)	Puissance (W)
VA	240	0,03	0,125	0,1	89000
AB	70	0,13	0,443	0,1	17000
AC	70	0,12	0,443	0,1	12000
CD	70	0,05	0,443	0,1	12000
DE	50	0,04	0,641	0,1	9000
CF	70	0,06	0,443	0,1	13000
DG	70	0,06	0,443	0,1	13000
DH	70	0,06	0,443	0,1	13000

Tableau 1 : Données du réseau BT

Noter que nous considérons sur chaque tronçon la puissance de pointe (pour estimer la chute de tension maximale possible) et des câbles en aluminium. Le tronçon VA contient la puissance cumulée à desservir pour tous les EDL de ce poste.

Nous en déduisons que :

$$\left(\frac{\Delta U}{U}\right)_{VA}^{\%} = 89000 \times 0,03 \frac{0,125 + 0,1 \times 0,4}{400^2} \times 100 \approx 0,27\%.$$

$$\left(\frac{\Delta U}{U}\right)_{AB}^{\%} = 17000 \times 0,13 \frac{0,443 + 0,1 \times 0,4}{400^2} \times 100 \approx 0,67\%.$$

$$\left(\frac{\Delta U}{U}\right)_{AC}^{\%} = 12000 \times 0,12 \frac{0,443 + 0,1 \times 0,4}{400^2} \times 100 \approx 0,43\%.$$

$$\left(\frac{\Delta U}{U}\right)_{CD}^{\%} = 12000 \times 0,05 \frac{0,443 + 0,1 \times 0,4}{400^2} \times 100 \approx 0,18\%.$$

$$\left(\frac{\Delta U}{U}\right)_{DE}^{\%} = 9000 \times 0,04 \frac{0,641 + 0,1 \times 0,4}{400^2} \times 100 \approx 0,15\%.$$

$$\left(\frac{\Delta U}{U}\right)_{CF}^{\%} = 13000 \times 0,06 \frac{0,443 + 0,1 \times 0,4}{400^2} \times 100 \approx 0,23\%.$$

$$\left(\frac{\Delta U}{U}\right)_{DG}^{\%} = 13000 \times 0,06 \frac{0,443 + 0,1 \times 0,4}{400^2} \times 100 \approx 0,23\%.$$

$$\left(\frac{\Delta U}{U}\right)_{DH}^{\%} = 13000 \times 0,06 \frac{0,443 + 0,1 \times 0,4}{400^2} \times 100 \approx 0,23\%.$$

À partir de ces calculs, nous pouvons déterminer la chute de tension sur les EDL :

	Cumul $\frac{\Delta U}{U}$ en %
Chute de tension en B : VA + AB	0,94
Chute de tension en G : VA + AC + CD + DG	1,13
Chute de tension en E : VA + AC + CD + DE	1,03

Tableau 2 : Calcul des chutes de tension en certains points du réseau

2.2. Données disponibles

Un certain nombre de variables sont à considérer pour estimer la chute de tension en un point du réseau : longueur du réseau entre l'utilisateur et le poste d'alimentation, type et section des câbles, puissances appelées sur le ou les tronçons concernés.

Il est possible, à partir des données de réseau cartographiées, de restituer ces données de façon ponctuelle pour un utilisateur donné. Cependant, à l'heure actuelle, Électricité de Strasbourg ne dispose d'aucune de ces données de façon automatique. De plus, il existe une base de données sur les EDL (Espaces De Livraison), mais non pour les utilisateurs, population sur laquelle nous cherchons à faire des estimations.

L'unique base de données accessible répertorie la distance à vol d'oiseau entre chaque EDL et le poste d'alimentation le plus proche. À noter que dans le fichier des réclamations, 95% des utilisateurs étaient reliés au poste d'alimentation le plus proche à vol d'oiseau.

À partir des réclamations, une liaison linéaire a pu être établie entre la distance réelle, notée *DRE*, du réseau entre l'utilisateur et le poste d'alimentation (c'est la longueur totale des câbles reliant l'utilisateur au poste) et la distance à vol d'oiseau, notée *DVO*, entre l'utilisateur et le poste d'alimentation. Pour cela, une régression linéaire simple a été appliquée aux données des réclamations (après validation des conditions d'application de la méthode). L'équation de la droite de régression estimée est :

$$DRE = 0,96 * DVO + 155.$$

2.3. Etude du fichier des réclamations

Lorsqu'un utilisateur du réseau d'Électricité de Strasbourg formule une réclamation, orale ou écrite, pour des problèmes de chute de tension, celle-ci est enregistrée et analysée (des mesures sont faites auprès de cet utilisateur ainsi que des calculs). Si le problème est avéré et qu'il provient effectivement du réseau d'Électricité de Strasbourg, des travaux sont entrepris pour consolider le réseau.

Entre janvier 2004 et avril 2007, parmi toutes les réclamations enregistrées, 52 réclamations ont été faites pour chutes de tension excessives. Voici une première analyse de la distance utilisateur-poste, à partir de ces 52 cas :

Moyenne	Ecart-type	Médiane	Mode	Etendue	Min.	Max.
517	173	485	565	942	288	1230

Tableau 3 : Résumés numériques sur la distance en mètres utilisateur – poste

Nous constatons l'importance de la distance entre un utilisateur et un poste d'alimentation dans le problème de chute de tension. En effet, la moyenne et le mode de cette distance se situent au-delà du rayon moyen de 500m autour des postes de distribution. La médiane quant à elle est inférieure à 500m mais est tout de même élevée (485m).

Une analyse factorielle en correspondances multiples sur les 52 réclamations identifiées a permis de constater que 66% des réclamants étaient situés dans des villes de petite taille (moins de 900 habitants). D'autre part, 44% des réclamations correspondaient à des utilisateurs reliés au poste d'alimentation exclusivement avec des câbles aériens, alors que seulement 7,5% concernaient des utilisateurs reliés au poste d'alimentation majoritairement avec des câbles souterrains.

2.4. Plan de sondage

Le plan de sondage détaillé ci-dessous a été choisi en fonction des données disponibles, de la connaissance du phénomène des chutes de tension, mais également pour des raisons économiques et techniques.

Soient N la taille de la population totale des utilisateurs du réseau BT d'Électricité de Strasbourg et M le nombre total d'EDL. Ces deux quantités sont connues². Nous avons $N = 476980$ utilisateurs répartis dans la population des $M = 174624$ EDL.

La taille de l'échantillon des EDL, $m = 228$, a été choisie par Électricité de Strasbourg en fonction des moyens techniques et financiers.

2.4.1. Constitution de strates

Pour chaque EDL, nous disposons de sa distance à vol d'oiseau avec le poste d'alimentation le plus proche. Cette variable étant suffisamment corrélée avec le problème de chute de tension, nous l'avons utilisée pour diviser la population des EDL en $H = 4$ strates :

² Données relevées durant l'été 2007.

Indice de la strate	Limite de la strate en mètres	Risque de chute de tension ³	Nombre d'EDL	Nombre de réclamations
1	[0 ; 50[Quasi nul	17267	0
2	[50 ; 150[Faible	91690	0
3	[150 ; 300[Moyen	61182	15
4	≥ 300	Élevé	4485	37

Tableau 4 : Répartition des EDL dans chaque strate

Le nombre d'EDL à tirer dans l'échantillon (228) a été choisi par Électricité de Strasbourg. En prenant en compte le fait que la taille de l'échantillon global risque d'être faible par rapport au nombre total d'EDL (174624), il faut s'assurer d'un nombre suffisant d'EDL tirés dans chaque strate afin d'avoir des estimations suffisamment précises dans chaque strate.

Soit M_h le nombre d'EDL dans la strate h , M_h est connu. Nous avons :

$$\sum_{h=1}^H M_h = M .$$

Soit N_h le nombre d'utilisateurs dans la strate h , N_h est inconnu. Nous avons :

$$\sum_{h=1}^H N_h = N .$$

Dans chaque strate h ($h = 1, \dots, 4$) un échantillon d'EDL de taille m_h est tiré selon un sondage aléatoire simple à probabilités égales sans remise (cela permet de ne privilégier aucun EDL par rapport aux autres dans chaque strate au moment du tirage de l'échantillon).

Le choix des différentes tailles m_h des échantillons tirés dans chaque strate h a été laissé au soin d'Électricité de Strasbourg. En effet, l'allocation proportionnelle est inadéquate dans notre situation car elle attribuerait à une « grande » strate une « grande part » de l'échantillon. Or, notre strate la plus à risque, suite à nos observations, est la plus petite en taille, et c'est néanmoins celle-ci que nous voulons privilégier quant à la précision de la proportion d'utilisateurs subissant des chutes de tension excessives.

Nous avons :

$$\sum_{h=1}^H m_h = m .$$

2.4.2. Application d'un sondage par stratification

Plusieurs utilisateurs peuvent être raccordés à un même Espace De Livraison (EDL) et un utilisateur n'est raccordé qu'à un seul EDL.

Les utilisateurs raccordés à chaque EDL de l'échantillon sont dénombrés (cette quantité est inconnue en général) et une mesure est faite chez un seul utilisateur de l'EDL. L'hypothèse émise par Électricité de Strasbourg est que tous les utilisateurs d'un même EDL ont la même tension, dans la mesure où ils ont la même position sur le réseau et sont reliés au même poste d'alimentation.

³ Les risques ont été déterminés d'après les dires des experts, des calculs et l'analyse du fichier des réclamations.

2.4.3. Estimateur dans chaque strate

Soient i l'indice de l'EDL dans l'échantillon de la strate h ($i = 1, \dots, m_h$).

$N_{i,h}$ est la taille de l'EDL i de la strate h , l'EDL i fait partie de l'échantillon tiré dans la strate h . Les tailles des EDL sont inconnues, sauf dans le cas où l'EDL fait partie de l'échantillon, c'est-à-dire que les $N_{i,h}$ sont connues.

Soit $Y_{i,k,h}$ la valeur de la variable d'intérêt pour l'utilisateur k de l'EDL i tiré dans l'échantillon de la strate h . Cette quantité vaut 1 s'il y a une chute de tension excessive pour l'utilisateur considéré et vaut 0 sinon. Nous rappelons que cette valeur est la même pour tous les utilisateurs d'un même EDL.

Le nombre d'utilisateurs raccordés à l'EDL i de la strate h qui ont des problèmes de chutes de tension excessives, est égal à :

$$Y_{i,h} = \sum_{k=1}^{N_{i,h}} Y_{i,k,h}.$$

$Y_{i,h}$ vaut soit $N_{i,h}$ (si une chute de tension excessive a été relevée chez un utilisateur de l'EDL i tiré dans l'échantillon de la strate h), soit 0 (si aucune chute de tension excessive n'a été relevée chez un utilisateur de cet EDL).

Avec le plan de sondage adopté, dans chaque strate h , nous cherchons à calculer une estimation de la proportion $P_{CT,h}$ d'utilisateurs subissant des chutes de tension excessives.

Le nombre d'utilisateurs dans la strate h , N_h , étant inconnu, l'estimateur de Hájek⁴ est choisi. Il est biaisé et est égal à :

$$\hat{P}_{CT,h} = \frac{M_h}{m_h \hat{N}_h} \sum_{i=1}^{m_h} Y_{i,h}$$

avec $\hat{N}_h = M_h \frac{\sum_{i=1}^{m_h} N_{i,h}}{m_h}$.

2.4.4. Estimateur global

À partir des estimateurs des proportions d'utilisateurs subissant des chutes de tension excessives dans chaque strate h , nous allons donner l'estimateur sur l'ensemble des strates, de la proportion P_{CT} d'utilisateurs d'Électricité de Strasbourg subissant des chutes de tension excessives. Étant donné que tous les utilisateurs d'un EDL sélectionné dans l'échantillon sont enquêtés, la probabilité d'inclusion d'un utilisateur est égale à la probabilité d'inclusion de son EDL. La probabilité d'inclusion d'un EDL dépend de la strate dans laquelle il se trouve. La probabilité d'inclusion d'un utilisateur qui appartient à la strate h , est égale à :

$$\pi_h = \frac{m_h}{M_h}.$$

⁴ Yves Tillé, *La théorie des sondages*, Dunod, Paris, 2001, p. 38.

L'estimateur \hat{P}_{CT} de la proportion d'utilisateurs subissant des chutes de tension excessives est égal à :

$$\hat{P}_{CT} = \frac{1}{N} \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^{m_h} \sum_{k=1}^{N_{i,h}} \frac{Y_{i,k,h}}{\pi_h} = \frac{1}{N} \sum_{h=1}^H \frac{M_h}{m_h} \sum_{i=1}^{m_h} Y_{i,h} = \frac{1}{N} \sum_{h=1}^H \hat{N}_h \hat{P}_{CT,h}.$$

Cette quantité permet de fournir une estimation ponctuelle de la proportion d'utilisateurs du réseau BT d'Électricité de Strasbourg subissant des chutes de tension excessives.

La variance estimée de cet estimateur est égale à :

$$\hat{\text{var}}(\hat{P}_{CT}) = \frac{1}{N^2} \sum_{h=1}^H \hat{\text{var}}\left(\frac{M_h}{m_h} \sum_{i=1}^{m_h} Y_{i,h}\right) = \frac{1}{N^2} \sum_{h=1}^H \left(\frac{M_h^2}{m_h} \left(1 - \frac{m_h}{M_h}\right) \frac{1}{m_h - 1} \sum_{i=1}^{m_h} (Y_{i,h} - N_{i,h} \hat{P}_{CT})^2\right).$$

Enfin, nous déduisons un intervalle de confiance estimé à 95% de P_{CT} :

$$\left[\hat{P}_{CT} - 1,96 \times \sqrt{\hat{\text{var}}(\hat{P}_{CT})} ; \hat{P}_{CT} + 1,96 \times \sqrt{\hat{\text{var}}(\hat{P}_{CT})} \right]^5.$$

2.5. Campagne de mesures l'hiver 2007-2008

Suite au plan de sondage énoncé précédemment, une première campagne de mesures a été réalisée durant l'hiver 2007-2008. La volonté de réaliser la campagne entre novembre 2007 et mars 2008 s'explique par le fait que les chutes de tension sont plus importantes et plus abondantes durant cette période en raison des puissances supérieures appelées sur le réseau (chauffage électrique, éclairage plus important...).

Une étude sur les EDL de l'échantillon a montré que la moyenne de la longueur des câbles entre l'utilisateur et le poste d'alimentation est de 501m, et que 74% des EDL étaient reliés au poste d'alimentation le plus proche à vol d'oiseau.

À partir de l'échantillon sélectionné, nous avons tenté d'affiner le modèle linéaire établi entre la longueur du réseau entre l'EDL et le poste d'alimentation et la distance à vol d'oiseau entre ces deux éléments. Pour cela, une régression linéaire simple a été appliquée aux données de l'échantillon (après validation des conditions d'application de la méthode). Le modèle établi est valable dans les cas où les EDL sont proches ou éloignés des postes et est défini par:

$$DRE = 1,2 * DVO + 74,5.$$

Comme attendu, les chutes de tension se sont produites dans les strates 3 et 4. Il n'y a eu aucune chute de tension dans les deux premières strates.

Rappelons que les strates 3 et 4 ont été privilégiées pour le tirage des EDL étant donné que le risque de subir des chutes de tension excessives est plus important dans ces deux strates. Normalement, il ne peut pas y avoir de chutes de tension excessives dans les deux premières strates du fait de la structure du réseau ; si une chute de tension excessive devait se produire dans l'une de ces deux strates, elle serait due à un problème majeur lors de la construction du réseau.

⁵ Nous supposons que l'estimateur \hat{P}_{CT} suit une loi normale dans la mesure où la taille m , de l'échantillon tiré sans remise, est suffisamment grande et \hat{P}_{CT} est une somme pondérée de moyennes. De plus, 120 échantillons indépendants d'EDL ont été tirés selon le plan de sondage défini précédemment. Pour chaque échantillon, nous avons dénombré les utilisateurs raccordés à chaque EDL, nous avons choisi aléatoirement le nombre de cas de chutes de tension, puis nous avons estimé la proportion d'utilisateurs subissant des chutes de tension excessives. Plusieurs tests de normalité (au seuil 5%) ont été effectués, la majorité d'entre eux ne rejettent pas l'hypothèse de normalité.

Cette première campagne de mesures a permis d'évaluer la proportion d'utilisateurs du réseau BT d'Électricité de Strasbourg subissant des chutes de tension excessives pour l'année 2008. Les résultats sont les suivants :

	Nombre total d'EDL	Nombre d'EDL tirés dans l'échantillon	Nombre d'utilisateurs raccordés aux EDL de l'échantillon	Nombre d'EDL mal desservis dans l'échantillon	Nombre d'utilisateurs mal desservis dans l'échantillon	Estimation
Strate 1	17 267	10	46	0	0	0%
Strate 2	91 690	25	64	0	0	0%
Strate 3	61 182	99	150	6	6	4%
Strate 4	4 485	94	128	14	16	12,5%
Total	174 624	228	388	20	22	0,94%

Tableau 5 : Résultats de la campagne de mesures

L'estimation ponctuelle de la proportion d'utilisateurs BT d'Électricité de Strasbourg subissant des chutes de tension excessives pour l'année 2008 vaut :

$$\hat{P}_{CT} = 0,94\%$$

et l'intervalle de confiance à 95% associé à cette estimation est égal à :

$$[0,33\% ; 1,55\%].$$

2.6. Conclusion

En résumé, le plan de sondage retenu pour évaluer la proportion d'utilisateurs du réseau Basse Tension d'Électricité de Strasbourg subissant des chutes de tension excessives consiste à :

- séparer la population d'EDL en quatre strates selon la distance à vol d'oiseau EDL-poste d'alimentation corrélée au risque de chutes de tension (le nombre d'EDL dans chaque strate est connu mais le nombre d'utilisateurs dans chaque strate est inconnu) ;
- tirer à probabilités égales et sans remise un échantillon d'EDL dans chaque strate en privilégiant les strates où le risque est le plus important. Nous rappelons que le choix des tailles des échantillons tirés dans chaque strate a été laissé au soin d'Électricité de Strasbourg. La strate la plus à risque est la plus petite en taille et c'est néanmoins celle-ci que nous voulons privilégier quant à la précision de la proportion d'utilisateurs subissant des chutes de tension excessives ;
- faire une mesure à chaque EDL de l'échantillon pour déterminer le nombre d'utilisateurs subissant des chutes de tension excessives à chaque EDL de l'échantillon.

Nous rappelons que le plan de sondage retenu a été choisi en fonction du phénomène de chute de tension et surtout des données disponibles (base de données des EDL reliée à la cartographie du réseau d'Électricité de Strasbourg). Il pourra être amélioré, voire complètement modifié, pour une meilleure précision, lorsque Électricité de Strasbourg disposera de bases de données complètes sur la structure de son réseau et concernant les positions des EDL et/ou des utilisateurs.

3. Estimation de la proportion d'utilisateurs subissant des surtensions excessives

Une surtension se produit lorsque la tension s'élève au-dessus de la tension nominale. Jusqu'à la publication du décret 2007-1826 cité au début de ce document, la norme autorisait une hausse de la tension jusqu'à +6% de la tension nominale (244V) avant de considérer qu'il s'agissait d'une surtension excessive. La nouvelle norme, appliquée depuis la publication du décret 2007-1826, autorise une hausse de la tension moyennée sur dix minutes jusqu'à +10% de la tension nominale (253V en tension moyennée sur dix minutes).

3.1. Les données disponibles pour l'étude

Afin de choisir le plan de sondage le mieux adapté à la problématique des surtensions, nous avons commencé par étudier ce phénomène. Pour cela, nous nous sommes intéressés aux surtensions répertoriées sur le réseau Basse Tension (BT) d'Électricité de Strasbourg.

3.1.1. Les réclamations

Nous rappelons que lorsqu'un utilisateur du réseau d'Électricité de Strasbourg formule une réclamation, orale ou écrite, celle-ci est enregistrée et analysée (des mesures sont faites auprès de cet utilisateur ainsi que des calculs). Si le problème est avéré et qu'il provient effectivement du réseau d'Électricité de Strasbourg, des travaux sont entrepris pour renforcer le réseau.

Les réclamations émises entre fin 2003 et fin 2007 ont été triées dans le but d'isoler les réclamations pour surtensions. Cela n'a permis d'isoler que quatre cas avérés de surtension qui étaient dus au réseau d'Électricité de Strasbourg, les autres provenaient de l'installation interne des utilisateurs, de la foudre, ou alors la surtension n'a pas été mesurée chez le réclamant. Notons cependant que les quatre cas retenus sont des surtensions par rapport à l'ancienne norme (+6%) mais pas par rapport à la nouvelle norme (+10%), c'est-à-dire que les tensions mesurées dépassaient 244V mais pas 253V en valeur efficace moyennée sur dix minutes. Techniquement il ne s'agit pas de surtension par rapport au décret cité en début de document.

3.1.2. La campagne de mesures pour les chutes de tension

Lors de l'hiver 2007-2008, une campagne de mesures a été réalisée afin d'estimer la proportion d'utilisateurs subissant des chutes de tension excessives⁶. Cinq cas de *surtension* ont été détectés au cours de cette campagne, ils ont été retenus pour l'étude de ce phénomène. Cependant, pour ces cinq cas, il s'agissait de surtension par rapport à l'ancienne norme mais pas pour la nouvelle norme. Là encore, techniquement il ne s'agit pas de surtension par rapport au décret.

Finalement, il n'a été possible de constituer qu'un fichier de neuf cas seulement pour l'étude du phénomène des surtensions. Bien que par rapport au décret il ne s'agisse plus de surtensions, cela nous permet tout de même d'avoir quelques éléments pour étudier le phénomène d'élévation de tension. Dans le reste de l'étude nous considérons tout de même ces neuf cas comme des surtensions.

⁶ Cette campagne de mesures est détaillée dans la partie sur les chutes de tension.

3.2. Les résultats de l'étude des surtensions

Le fait qu'il n'y ait que très peu de surtensions répertoriées n'est pas surprenant car il s'agit d'un phénomène rare. Par contre, ce qui était inattendu était leurs emplacements dans le réseau. En effet, nous nous attendions à ce que les surtensions se situent à proximité des postes d'alimentation électrique mais les cas répertoriés étaient situés partout sur le réseau, aussi bien à proximité des postes d'alimentation, qu'en milieu ou en fin de réseau.

Les causes des surtensions étaient de plusieurs types :

- problème de réglage au niveau du transformateur (causant les surtensions près des postes) ;
- problème d'équilibrage des phases ou encore rupture du neutre conducteur (causant les surtensions en milieu et fin de réseau).

Dans tous les cas il s'agissait de dysfonctionnements imprévisibles du réseau.

L'étude de ces quelques cas de surtension n'a pas permis de « dégager » de population à risque comme il avait été possible de le faire dans le cas des chutes de tension. En effet, en plus des constatations précédentes, nous avons remarqué que :

- les surtensions répertoriées se produisent aussi bien dans des grandes villes (réseau dense et souterrain) que dans des petites villes (réseau étiré et aérien) ;
- les postes d'alimentation sont de puissance diverses ;
- les câbles sont de longueurs et de types variables ;
- aucun départ HTA n'est plus susceptible de subir des surtensions que les autres.

De plus, contrairement aux chutes de tension, les surtensions semblent se produire tout au long de l'année.

3.3. Le plan de sondage

Le plan de sondage détaillé ci-dessous a été choisi en fonction des données disponibles, de la connaissance du phénomène des surtensions, mais également pour des raisons techniques.

Dans un premier temps, un échantillon d'EDL (Espaces De Livraisons) est tiré selon un sondage aléatoire simple à probabilités égales. Cela permet de ne privilégier aucun EDL par rapport aux autres au moment du tirage de l'échantillon, de plus cette méthode de tirage a été choisie du fait du manque d'information sur le phénomène.

Plusieurs utilisateurs peuvent être raccordés à un même EDL et un utilisateur n'est raccordé qu'à un seul EDL.

Les utilisateurs raccordés à chaque EDL de l'échantillon sont dénombrés (cette quantité est inconnue en général) et une mesure est faite chez un seul utilisateur de l'EDL. Comme pour les chutes de tension, nous faisons l'hypothèse que tous les utilisateurs d'un même EDL ont la même tension.

Ce plan de sondage permet de limiter le risque de non réponse qui a été un problème assez important lors de la campagne de mesures de l'hiver 2007-2008. De plus, les surtensions sont liées au réseau et non aux utilisateurs, en effet les rares cas de surtension répertoriés étaient dus à des dysfonctionnements du réseau.

Soit P_s la proportion d'utilisateurs d'Électricité de Strasbourg subissant des surtensions excessives.

Étant donné que tous les utilisateurs d'un EDL sélectionné dans l'échantillon sont enquêtés, la probabilité d'inclusion d'un utilisateur est égale à la probabilité d'inclusion de son EDL. La probabilité d'inclusion d'un utilisateur est donc :

$$w = \frac{m}{M}.$$

L'estimateur de la proportion d'utilisateurs subissant des surtensions est égal à :

$$\hat{P}_S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^{N_i} w Y_{ik}$$

avec $Y_{ik} = 1$ si l'utilisateur k de l'EDL i subit une surtension excessive et 0 sinon.

N est le nombre total d'utilisateurs, N_i est le nombre d'utilisateurs raccordés à l'EDL i de l'échantillon, M le nombre total d'EDL et m est le nombre d'EDL dans l'échantillon.

L'expression de la variance estimée est :

$$\text{vâr}(\hat{P}_S) = \frac{M(M-m)}{2N^2m^2(m-1)} \sum_{j=1}^m \sum_{\substack{j'=1 \\ j' \neq j}}^m (Y_j - Y_{j'})^2$$

avec $Y_i = \sum_{k=1}^{N_i} Y_{ik}$.

L'intervalle de confiance estimé à 95% de P_S est :

$$\left[\hat{P}_S - 1,96 \times \sqrt{\text{vâr}(\hat{P}_S)} ; \hat{P}_S + 1,96 \times \sqrt{\text{vâr}(\hat{P}_S)} \right].$$

Dans un premier temps, les mesures s'étaleront sur une année entière, mais afin de voir si les surtensions sont plus importantes à certaines périodes de l'année, l'échantillon d'EDL est divisé aléatoirement en V « sous échantillons » de même taille n_v . Pendant la période v ($v = 1, \dots, V$), les mesures sont faites aux n_v EDL du sous échantillon v .

Si des périodes se dégagent par rapport aux autres, il faudrait déterminer si les causes des surtensions sont liées aux périodes en question. Si tel était le cas, les mesures seraient alors plutôt faites durant ces périodes.

3.4. Conclusion

Le plan de sondage retenu a été choisi en fonction des données disponibles et de la connaissance du phénomène des surtensions. Il pourra peut-être être amélioré en terme de précision, voire totalement modifié, si une première campagne de mesures mettait en évidence des données influentes que nous ne connaissons pas à l'heure actuelle.

Pour l'instant, aucune campagne de mesures n'a été lancée pour évaluer la proportion d'utilisateurs subissant des surtensions excessives. En effet, aucun cas de surtension, au sens du décret, n'a été relevé, ni dans la campagne de mesures de l'hiver 2007-2008, ni dans l'analyse des réclamations. Une campagne pourrait cependant être lancée si ce phénomène devait s'accroître à l'avenir, en particulier en raison de la multiplication d'installations de production sur les réseaux BT (source d'élévation de tension).

⁷ Nous supposons que l'estimateur \hat{P}_S suit une loi normale dans la mesure où la taille m , de l'échantillon tiré sans remise, est suffisamment grande et \hat{P}_S est une fonction simple de moyennes. 107 échantillons indépendants d'EDL ont été tirés selon un tirage aléatoire simple sans remise. Pour chaque échantillon, nous avons dénombré les utilisateurs raccordés à chaque EDL, nous avons choisi aléatoirement le nombre de cas de surtension, puis nous avons estimé la proportion d'utilisateurs subissant des surtensions excessives. Plusieurs tests de normalité (au seuil 5%) ont été effectués, la majorité d'entre eux ne rejettent pas l'hypothèse de normalité.

Conclusion générale

Afin de répondre au décret sur la qualité de la tension délivrée par Électricité de Strasbourg aux utilisateurs de son réseau BT, nous avons proposé deux plans de sondage différents selon le problème de tension à étudier. À partir de ces énoncés, nous pouvons donner la proportion d'utilisateurs BT d'Électricité de Strasbourg recevant une tension (en valeur efficace moyennée sur dix minutes) inférieure à 207V ou supérieure à 253V.

Soit P la proportion d'utilisateurs Basse Tension d'Électricité de Strasbourg mal alimentés et \hat{P} l'estimateur associé. Étant donné que la chute de tension est un phénomène indépendant de la surtension, les estimateurs pour les chutes de tension et les surtensions sont indépendants et nous considérons les résultats suivants :

- l'estimateur de la proportion d'utilisateurs subissant des surtensions ou des chutes de tension excessives est égal à :

$$\hat{P} = \hat{P}_{CT} + \hat{P}_S ;$$

- la variance de cet estimateur est :

$$\text{var}(\hat{P}) = \text{var}(\hat{P}_{CT}) + \text{var}(\hat{P}_S) ;$$

- l'intervalle de confiance estimé à 95% de P est :

$$\left[\hat{P} - 1,96 \times \sqrt{\text{var}(\hat{P})}; \hat{P} + 1,96 \times \sqrt{\text{var}(\hat{P})} \right] .$$

À l'heure actuelle, seule la proportion d'utilisateurs subissant des chutes de tension excessives est prise en compte pour évaluer la proportion d'utilisateurs mal alimentés.

La campagne de mesures faite durant l'hiver 2007-2008 a donc donné :

$$\hat{P} = \hat{P}_{CT} = 0,94\%$$

avec l'intervalle de confiance estimé à 95% de P qui est alors :

$$[0,33\% ; 1,55\%].$$

Bibliographie

- [1] Ardilly, Pascal (2006) *Les techniques de sondage*. Technip, Paris, Nouvelle édition.
 [2] Tillé, Yves (2001) *La théorie des sondages*. Dunod, Paris.