



HAL
open science

Études de la fiabilité des réseaux électriques HTA et HTB soumis à des contraintes météorologiques extrêmes vent fort cyclone, canicule, foudre, neige : revue de cas publiés

Philippe Carer, Grégory Michel, Ali El Akoum, Jean-Luc Flejou, Andre Reinert Bruch, Andre Reinert Bruch, Emmanuel Ardillon, Minh Nguyen, Jean Martinon, Jean Martinon, et al.

► To cite this version:

Philippe Carer, Grégory Michel, Ali El Akoum, Jean-Luc Flejou, Andre Reinert Bruch, et al.. Études de la fiabilité des réseaux électriques HTA et HTB soumis à des contraintes météorologiques extrêmes vent fort cyclone, canicule, foudre, neige : revue de cas publiés. Congrès Lambda Mu 23 “ Innovations et maîtrise des risques pour un avenir durable ” - 23e Congrès de Maîtrise des Risques et de Sécurité de Fonctionnement, Institut pour la Maîtrise des Risques, Oct 2022, Paris Saclay, France. hal-03877484

HAL Id: hal-03877484

<https://hal.science/hal-03877484v1>

Submitted on 29 Nov 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Etudes de la fiabilité des réseaux électriques HTA et HTB soumis à des contraintes météorologiques extrêmes vent fort cyclone, canicule, foudre, neige : revue de cas publiés

CARER Philippe
MICHEL Grégory
EL AKOUM Ali
Département SYSTÈME
EDF Lab Paris-Saclay
91120 Palaiseau
philippe.carer@edf.fr

FLEJOU Jean-Luc¹
REINERT BRUCH Andre¹
ARDILLON Emmanuel²
NGUYEN Minh³
Dép. ERMES, EDF Lab Paris Saclay¹
Dép. PRISME, EDF Lab Chatou²
Dép. LME, EDF Lab Les Renardières³

MARTINON Jean
EDF - SEI
Paris La Défense

MATTIA Christophe
ENEDIS DR Paris

RUIZ Romain (ENSAI Rennes)
BAI Yuhe (Master DataSc. X-ENSTA)
AZZOUI Ridwan (Polytech Angers)
MACHKOUR Malake (Poly. Angers)
EL MOUSSAOUI Asmae (Po. Angers)
Stagiaires (2021)

MARTIN Clémence (Centrale Lyon)
TABBAI Aymane (ENSAI Rennes)
GUEYE Sokhna Aicha (Alternance
ENEDIS-CESI Nanterre)
Stagiaires (2022)

Résumé — L'objectif de cet article est de présenter des exemples de méthodes fiabilistes pour traiter des contraintes météorologiques vent, foudre, neige, et température élevées sur les réseaux électriques HTA (<50 kV) et HTB (> 50 kV). Ces contraintes météorologiques peuvent affecter la fiabilité et la disponibilité des réseaux électriques. On décrira les engagements de qualité de fourniture en métropole entre ENEDIS, RTE et la CRE dans le cadre du TURPE. Puis on s'appuiera sur des exemples de contraintes météorologiques déjà publiés sur les tempêtes en France en 2009 sur Gironde, sur les Cyclones aux Antilles (où le réseau électrique HTB géré par EDF/SEI est plus particulièrement exposé à cette contrainte), la foudre en Drôme Ardèche et les canicules sur Paris (réseau HTA souterrain), ou la canicule dans l'ouest de la France fin Juin 2015 qui a affecté des composants HTB de postes électriques de RTE.

Mots-clefs — *Fiabilité des réseaux électriques HTA et HTB, contraintes météorologiques, lignes électriques aériennes HTA ou HTB, câble souterrain HTA, capteur HTB*

Abstract— This paper presents several examples of reliability method applied to treat meteorological constraints wind, lightning, snow and high temperature on the HV (> 50 kV) or MV (<50 kV) electrical network. These meteorological constraints have consequence on the reliability and availability of electrical network. Power quality requirement between the regulator CRE, and ENEDIS (French DSO) and RTE (French TSO) are presented. Some example are presented based on real storm in south west of France or hurricane in the French caribbean island or lightning in the south east of France or heat wave in June 2015 in west of France which has provoke failure of HV sensor in some HV substations of RTE.

Keywords — *HV and MV reliability of electrical network Weather constraints, MV and HV overhead line, MV underground cable, HV sensor*

I. INTRODUCTION

Les réseaux électriques de transport et de distribution sont constitués de lignes électriques et de postes électriques qui sont les nœuds du réseau.

Les lignes des réseaux de distribution HTA (20 kV) sont aériennes ou souterraines. Les lignes HTB du réseau de transport sont à 95 % aériennes car technico-économiquement il est très difficile en l'état actuel du savoir-faire industriel d'enterrer les lignes HTB (HTA < 50 kV, en anglais « MV ou medium voltage » ; et HTB > 50 kV en anglais « HV High Voltage »).

Ainsi les lignes aériennes HTA ou HTB peuvent être sensibles aux contraintes météorologiques de vent, foudre, et neige, et les liaisons HTA souterraines, avec des câbles souterrains peuvent être sensibles à la température.

II. OBJECTIF DE L'ARTICLE

L'objectif de l'article est de présenter des exemples d'impacts de contraintes météorologiques sur les réseaux électriques aérien et souterrain. A partir de ces exemples on montre les axes de modélisation de la fiabilité des composants sous contraintes météorologiques. Dans la mesure du possible on essaye de prendre en compte à la fois les intensités des contraintes et aussi la résistance des composants. Donc on utilise des taux de défaillance avec des modèles d'essai de fiabilité accéléré et/ou de fiabilité « contrainte / résistance ».

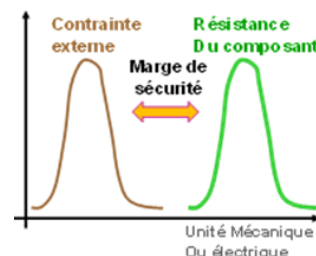


Fig 1 : modèle de fiabilité Contrainte Résistance

Versión simplifiée du taux de défaillance fonction de la résistance de l'équipement et de la contrainte externe appliquée

$$\lambda(C, R) = \lambda_0 \cdot \left(\frac{C}{R}\right)^\alpha$$

III. DESCRIPTION DES RESEAUX ELECTRIQUES ET DES CONTRAINTES REGULATOIRES DE QUALITE DE FOURNITURE

Le réseau de RTE sert de « HUB » où les principaux centres de production injectent l'énergie produite. Les postes sources HTB/HTA (« HV/MV substation ») font l'interface entre les deux réseaux de transport et de distribution.

Le réseau de RTE est maillé et conçu suivant la règle déterministe du « N-1 », c'est-à-dire que le réseau de RTE peut perdre une ligne ou une partie d'un poste électrique sans que cela n'ait de conséquences pour les clients (figure 2).

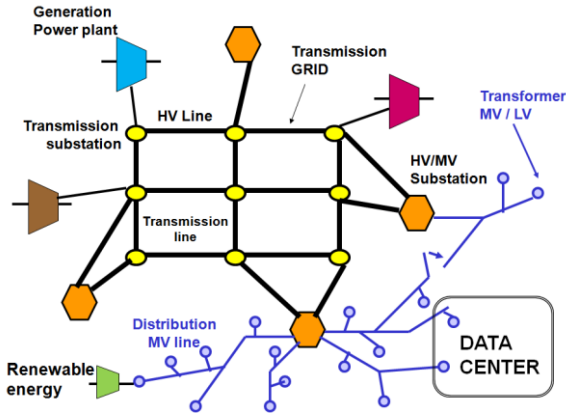


Fig 2 : Schéma simple de réseaux de transport et de distribution

Le réseau électrique de distribution est arborescent. Un ensemble de lignes HTA partent du poste source HTB/HTA pour alimenter les clients (vu du poste source HTB/HTA les clients sont les postes HTA/BT).

De façon très simplifiée, un poste source HTB/HTA (figure 3) est composé d'une ligne électrique HTB venant de RTE, d'un transformateur HTB/HTA, d'un disjoncteur HTA « d'arrivée », puis d'un « jeu de barre » HTA, d'où partent plusieurs lignes HTA (aériennes ou souterraines) dites « lignes départs HTA » (avec chacune un disjoncteur HTA) qui vont alimenter les postes HTA/BT.

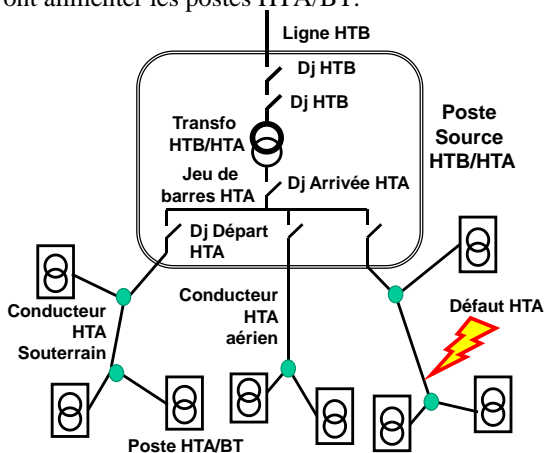


Figure 3 : poste source HTB/HTA

En tête de ligne « départ » HTA, il y a des capteurs (courant, tension) dans le poste source. S'il y a un court-circuit sur la ligne HTA, cela est détecté par les capteurs et la protection du disjoncteur HTA donne l'ordre d'ouvrir le disjoncteur pour isoler le défaut électrique. Si le Disjoncteur (Dj) du départ HTA ne fonctionne pas, alors c'est le « Dj arrivée » qui va s'ouvrir en secours du « Dj du départ HTA ». Mais dans ce cas le « Dj arrivé » coupe également les autres départs HTA reliés au jeu de barre HTA.

Donc les fonctionnements d'ouvertures/fermeture des disjoncteurs de ligne départ HTA, sont enregistrées (et datés) au niveau du poste HTB/HTA. Le poste lui-même est supervisé à distance depuis un centre de contrôle qui peut collecter toutes les informations d'exploitation des plusieurs postes sources HTB/HTA. Actuellement sur le réseau de distribution en France, il y a environ 2400 postes HTB/HTA, 25000 lignes aériennes et souterraines HTA qui alimentent environ 700000 postes HTA/BT.

On verra que ces enregistrements datés (jour heure minute) de fonctionnements des disjoncteurs HTA sont fondamentaux pour les études de fiabilité. En effet ces données sont exhaustives, sans erreur, localisées (poste, ligne HTA)

A. Objectif de qualité de fourniture entre ENEDIS, RTE et la CRE dans le cadre du TURPE

Les critères qui permettent de « mesurer » la qualité d'un réseau électrique sont la fréquence des coupures électriques, et le temps cumulé de coupure annuel pour un client.

Dans le cadre de la dérégulation du Marché de l'électricité initiée au début des années 2000, il y a en France métropolitaine une activité en concurrence (la production) et une activité régulée (transport et distribution de l'électricité).



Fig 4 : Domaines concurrentiel et régulé du marché de l'énergie

RTE et ENEDIS sont dans le domaine régulé, donc ils ont des monopoles de fait, pour l'exploitation respectivement du réseau de transport et du réseau de distribution. Donc c'est la CRE (Commission de Régulation de l'Énergie) qui contrôle ces deux monopoles.

Ainsi RTE et ENEDIS passent des contrats d'engagement tri-annuel de qualité de fourniture avec la CRE dans le cadre du contrat TURPE (Tarif d'Utilisation des Réseaux Public d'Énergie). Les indicateurs retenus pour la qualité de fourniture sont :

- La durée cumulée de coupure moyenne en France métropolitaine pour une année par client (le terme utilisé en anglais est « SAIDI : safety average index for time duration interruption »).
- La fréquence moyenne annuelle de coupures (le terme utilisé en anglais est le « SAIFI : safety average index failure interruption »).

Ainsi dans le TURPE 6 les objectifs définis par la CRE pour ENEDIS sont les suivants pour les années 2021-2024 :

	2021	2022	2023	2024
Durée de coupure moyenne en HTA (minutes)	42.1	41.8	41.5	41.2
Fréquence moyenne annuelle de coupures en HTA	1.87	1.73	1.58	1.43

Tableau 1 : Objectifs de qualité de fourniture pour ENEDIS définis par la CRE dans le cadre du contrat TURPE pour les réseaux HTA

Quelques points très importants :

- Un système de « Bonus/Malus » financier est associé chaque année à l'atteinte des objectifs de qualité de fourniture dans le cadre du TURPE
 - Environ 6 Millions € par minute
 - Environ 4 Millions € par coupure
- Il est évident qu'une forte tempête certaines années serait susceptible de dégrader fortement ces indicateurs de qualité de fourniture. Aussi il a été défini la notion de « jour exceptionnel », ou « jour très perturbé », qui, s'il se produit sera retiré des bilans statistiques annuels de qualité de fourniture.
- La définition de « jour exceptionnel » pour cause météorologique est la suivante : « les phénomènes atmosphériques d'une ampleur exceptionnelle, au regard de leur impact sur les réseaux, caractérisés par une probabilité d'occurrence annuelle inférieure à 5 % pour la zone géographique considérée dès que, lors d'une même journée et pour la même cause, au moins 100 000 consommateurs alimentés par le réseau public de transport et/ou par les réseaux publics de distribution sont privés d'électricité ».

IV. DIMENSIONNEMENT DES RESEAUX AERIENS HTA ET HTB FACE AUX CONTRAINTS CLIMATIQUES

Les réseaux de distribution et de transport aérien sont dimensionnés pour résister à certains niveaux de vitesses de vent de temps de retour de 50 ans.

Zone	Vitesse de vent instantané de référence V _{maxref} de durée de retour T=50 ans	
	En m/s	En km/h
Zone 1	42	151
Zone 2	44	158
Zone 3	47	169
Zone 4	48	174

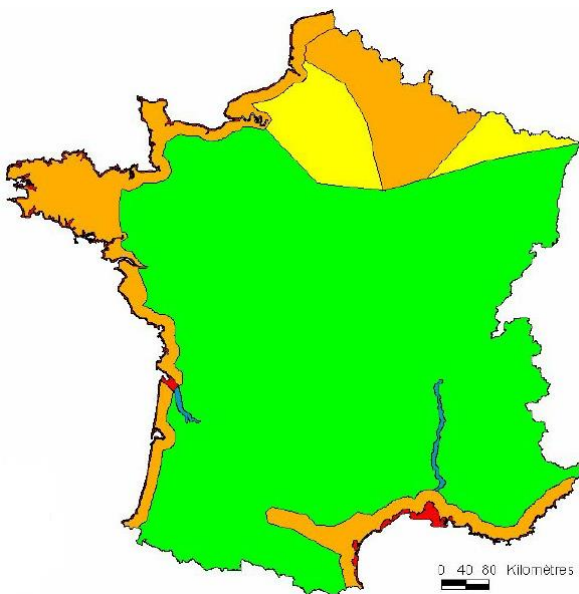


Fig 5 : Exemple de zones de vent en France utilisées pour le dimensionnement des ouvrages HTB aériens

Mais plusieurs questions se posent :

- Les ouvrages sont dimensionnés d'un point de vue mécanique avec des marges de sécurité. Mais avec le temps les ouvrages peuvent vieillir et donc avoir une résistance moindre.
- D'un autre côté compte tenu du réchauffement climatique on pourrait avoir des contraintes qui augmentent en fréquence et/ou en intensité.
- Pour les réseaux de distribution HTA, les zones qui posent problèmes sont les zones boisées. En effet il y a un élagage des arbres les plus proches des lignes électriques. Notamment il ne doit pas y avoir d'arbre à moins de 5 mètres des lignes électriques. Tant que l'arbre oscille avec le vent il ne touche pas la ligne. Mais si le vent devient très fort il y a un risque de chute de l'arbre qui peut alors toucher la ligne (figure 6).

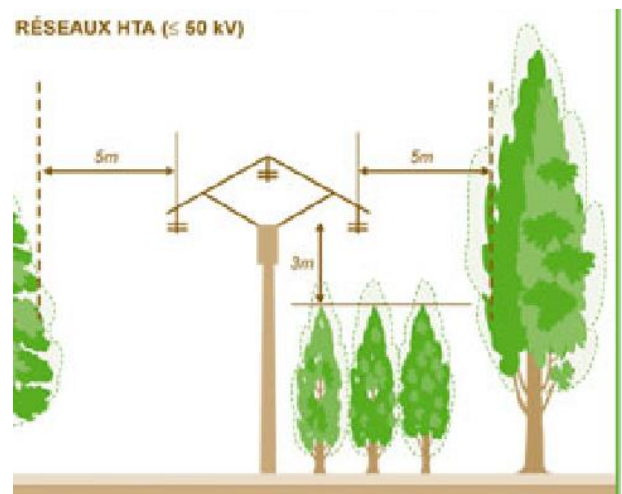


Fig 6 : Elagage des arbres pour les réseaux HTA (20 kV) de distribution

V. EXEMPLES DE CONTRAINTES DE VENT ET DE NEIGE SUR LES LIGNES ELECTRIQUES

Les contraintes de vent et de neige vont créer sur les lignes des efforts mécaniques qui vont se répercuter sur les pylônes.

On indique les types de ruines mécaniques de pylônes HTA.

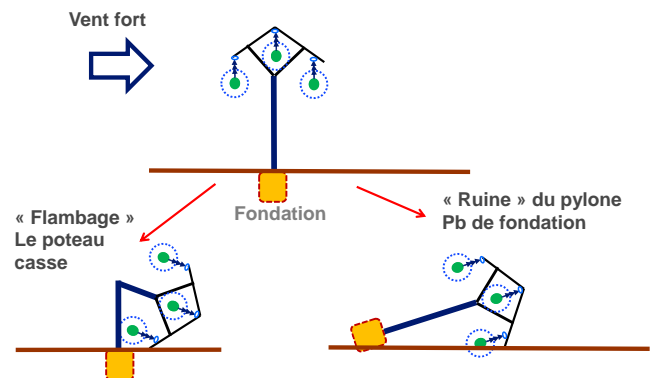


Fig 7 : modes de ruine de pylône ou poteau HTA

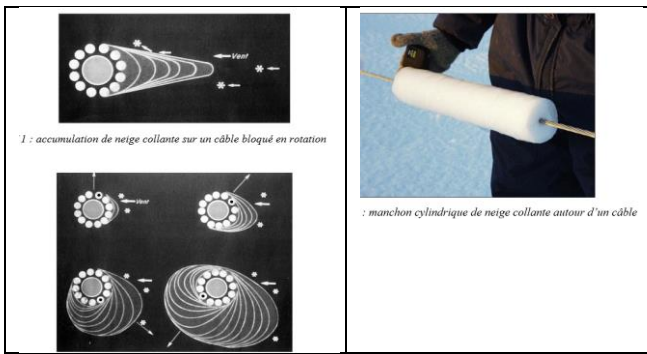


Fig 8 : Accrétion de neige collante sur les lignes avec le vent

■ **Vent et neige**

□ Risque mécanique

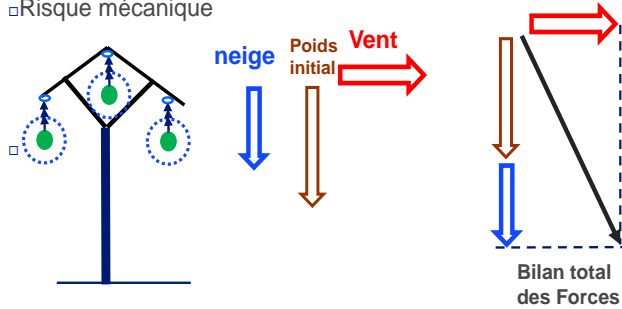


Fig 9 : contraintes de vent et de neige sur les lignes HTA

VI. EXEMPLE DE TEMPETES EN GIRONDE

La région de Gironde est plus particulièrement exposée aux tempêtes venant de l'atlantique. On peut noter les événements suivants :

- **Tempête Martin de Fin 1999**
- **Tempête Renate en 2006**
- **Tempête Klaus en 2009**
- **Tempête Xynthia en 2010**

On voit sur le graphique ci-dessous la superposition des réseaux THT (400 kV et 225 kV) du réseau de transport et les vitesses de vent de la tempête RENATE en 2006.



Figure 10 : Carte de vent de MétéoFrance projetée sur le réseau de RTE (lignes rouges 400 kV et vertes 225 kV) pour la Tempête RENATE (2006)



Figure 11 : Chute d'un pylône 63 kV dans les Landes pour problème de fondation lors de la tempête RENATE en 2006

VII. ANALYSE DE LA TEMPETE KLAUS 2009 AVEC LES POINTS DE VUE ELECTRIQUE ET ARBORICOLE

Du point de vue de la vitesse de vent les deux plus fortes tempêtes dans la zone de Gironde ont été :

- la tempête Martin de fin de 1999.
- et la tempête Klaus de 2009.

ESTIMATION DES RAFALES MAXIMALES
DU 24/01/2009 à 00 UTC au 24/01/2009 à 22 UTC

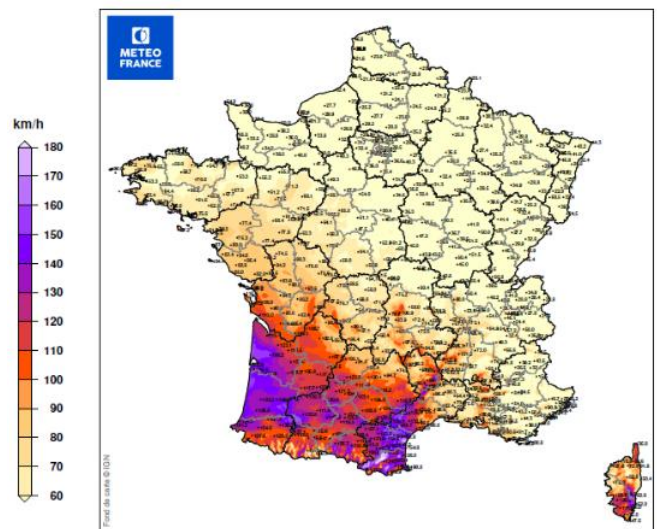


Figure 12 : Cartographie de vent (MétéoFrance) pour la tempête Klaus 2009

La région de Gironde est un lieu de production forestière de Pin. En cas de tempête importante, cela peut provoquer dans les zones boisées des chutes d'arbres.

Malgré les zones d'élagage autour des lignes HTA (à plus de 5 mètres des lignes), en fonction de la hauteur de l'arbre, s'il y a de chute de l'arbre à cause du vent, il peut tomber sur une ligne HTA (20 kV). Donc dans cette région en cas de grosses tempêtes, la fiabilité du réseau électrique va être conditionnée principalement par la fiabilité des arbres autour des lignes électriques HTA face à la contrainte de vent.

Pour traiter ce problème il faut prendre en compte la fiabilité mécanique probabiliste des arbres, et la mécanique des fluides pour représenter les efforts dus au vent (figure 13).

Que se passe-t-il lors de la ruine d'un arbre par le vent?

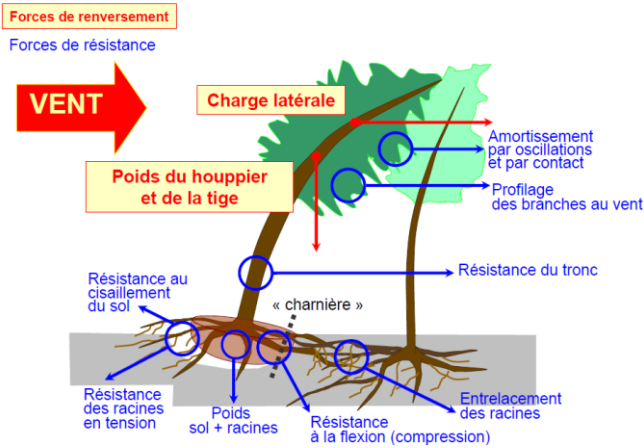


Figure 13 : Représentation des contraintes mécanique sur un arbre [3]

A. Mécanique des fluides en écoulement laminaire pour le vent

L'approche classique est de considérer la formule suivante pour représenter la force du vent sur une surface S

$$Force\ du\ Vent = P_{Vent} \cdot S \cdot C_x = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot C_x \cdot V^2 \quad \text{Newton}$$

Où ρ représente la densité de l'air ; S la section de la surface de prise au vent ; C_x coefficient de prise au vent ; V la vitesse du vent

B. Fiabilité mécanique des arbres en cas de fortes tempêtes

On prend en compte le domaine de la résistance mécanique probabiliste [1], [2] avec des modèles de fiabilité « contraintes/ résistances ».

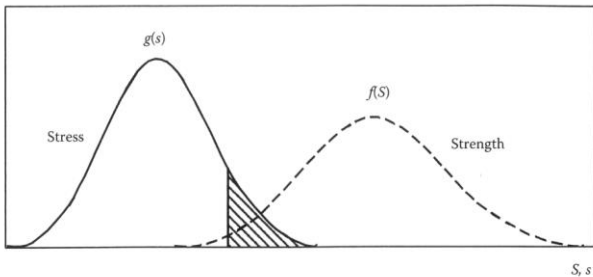


Figure 14 : Modèle de fiabilité contrainte (stress) résistance (Strength)

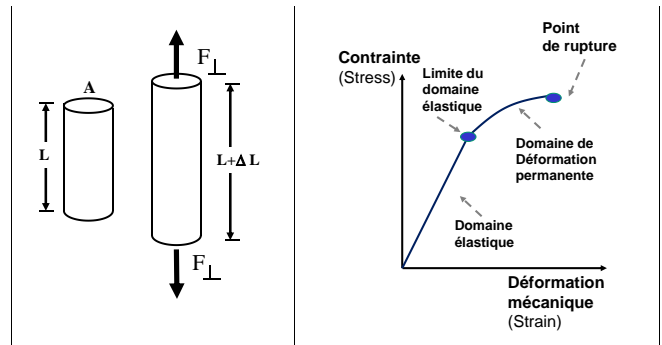
$SM = \frac{E(S) - E(s)}{\sqrt{var(S) + var(s)}}$ <p>Marge de sécurité</p>	$R = \Phi(SM)$ <p>R fiabilité et Φ loi normale standard cumulée</p>
--	---

1) Fiabilité mécanique, loi de Hooke

On indique quelques éléments de mécanique avec les zones :

- Elastique,
- de déformation plastique,
- de déformation permanente.

C'est au niveau du dernier seuil que l'on peut avoir une rupture mécanique de l'ouvrage étudié.



Module elastique = $\frac{Contrainte}{Résistance}$ $\epsilon = \frac{L - L_0}{L_0}$

Loi de Hooke $\epsilon = \frac{\sigma}{E}$

σ : pression ou $\epsilon \cdot E = \sigma$

E : module d'Young
coeff. d'élasticité

**Si $\epsilon > \epsilon_{rupture}$
Alors le matériel
se casse**

Figure 15 : Elément de fiabilité mécanique [1]

2) Fiabilité mécanique probabiliste

On probabilise le risque de rupture mécanique en affectant une probabilité de ruine quand ϵ dépasse une certaine valeur.

Les forces en présence sur un arbre isolé *Formule de Bernoulli D.*

Vent u $F_{vent} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot C_x \cdot S \cdot u^2 (N)$

Moment flexion = $F_{vent} \times \text{Bras de levier} (N \cdot m)$

Rigidité du tronc = $\frac{\pi \cdot D^4(z)}{64} \times \text{Module elasticité } E$

$\epsilon(z, x) = \frac{\text{Moment flexion} \times x}{Rigidité du tronc} \sim \frac{S \times (H-z) \times x}{D^4(z)} \times C_x \times \frac{1}{E} \times u^2 (ss\ dim)$

Le tronc casse si : $\epsilon(z, x) > \epsilon_{rupture}$
L'arbre est déraciné si : Moment de flexion > moment résistant de l'ancrage

Figure 16 : fiabilité mécanique des arbres sous la contrainte de vent

C. Modèle de ruine d'arbre élaboré par l'INRA

L'ONF et l'INRA [3] ont élaboré un modèle de ruine d'arbres en fonction du vent construit à partir de tests réels pour faire chuter des arbres avec des contraintes mécaniques.

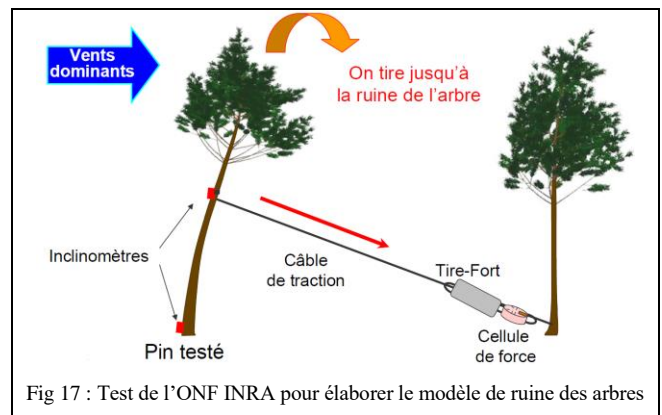


Fig 17 : Test de l'ONF INRA pour élaborer le modèle de ruine des arbres

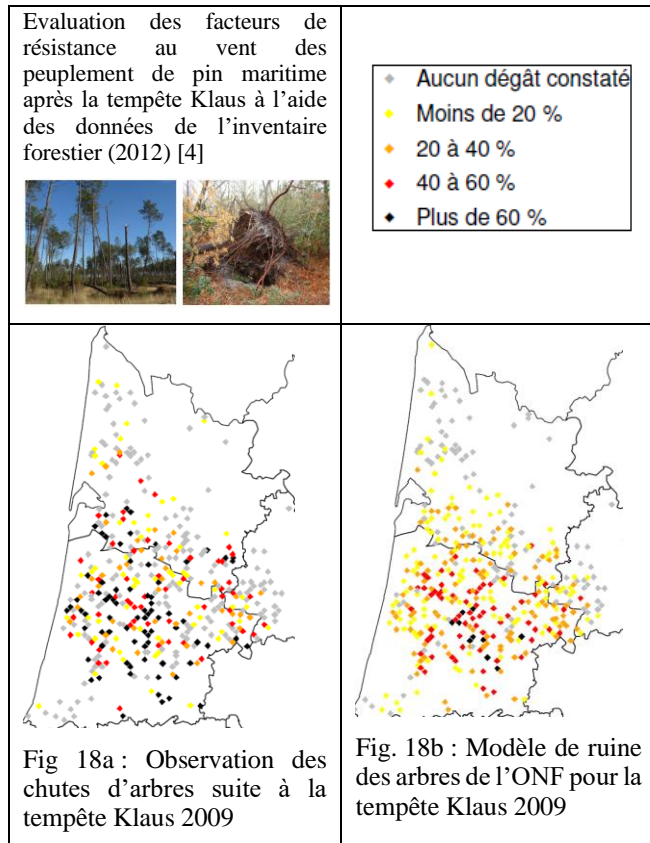
D. Etude spécifique de l'ONF en 2012 suite à la tempête Klaus de 2009 [4]

Ce modèle de ruine d'arbre a été appliqué sur le sud-ouest pour le cas de la tempête Klaus 2009 (voir figure 12).

Cette tempête Klaus 2009 a provoqué des dégâts importants de chutes d'arbres dans la Gironde. Cela a donc fait l'objet d'une étude spécifique par l'ONF [4].

L'ONF définit des échantillons de forêts (ou placette) où toutes les espèces sont inventoriées. En cas de tempête le taux d'arbres ayant chuté dans ces endroits sont répertoriés.

L'ONF -INRA en appliquant leur modèle ont essayé de recalculer le taux de chute d'arbres en fonction des vitesses de vent pour la tempête Klaus 2009. Mais l'outil de calcul de l'ONF a sous-estimé les dégâts observés sur le terrain [4].



On voit (fig 18) que le modèle de ruine d'arbres de l'ONF en fonction du vent sous-estime le taux réel de ruine d'arbres

E. Compléments sur la mécanique des fluides et les causes de ruine des arbres

1) Mécanique des fluides en écoulement turbulent

Au-delà d'une certaine vitesse le vent passe en écoulement turbulent. On indique ci-après fig.19, les types de contraintes qui s'exercent sur les arbres en écoulement turbulent.

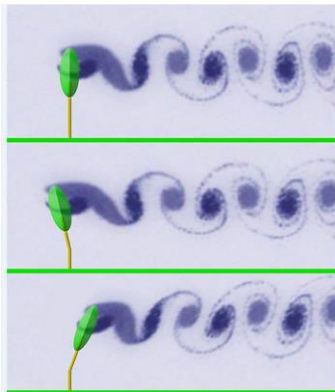


Fig 19 : exemple de « tourbillon de Karman »

2) Contraintes mécaniques avec flexion et torsion

Une autre étude [5] de 2016 indique que les arbres chutent avec des vitesses de vent de 42 m/s (150 km/h). Les auteurs de l'étude [5] ont repris l'exemple de la tempête Klaus 2009 dans le sud-ouest en s'appuyant sur l'étude [4].

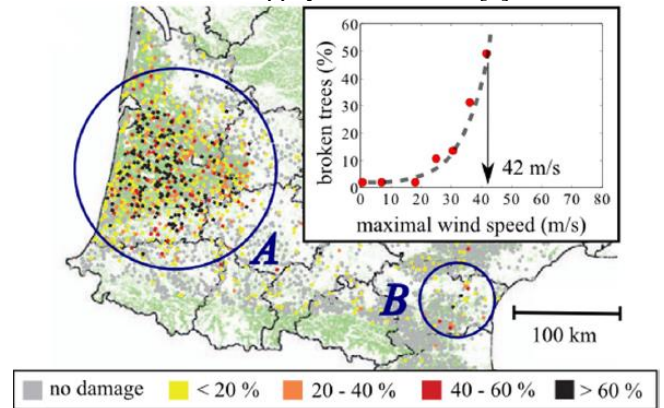


Fig 20 : Représentation de la limite de rupture des arbres face au vent

Comme un arbre n'est jamais complètement symétrique, en cas de vent important, il faut aussi prendre en compte les risques de torsion des arbres en supplément de la flexion [5].

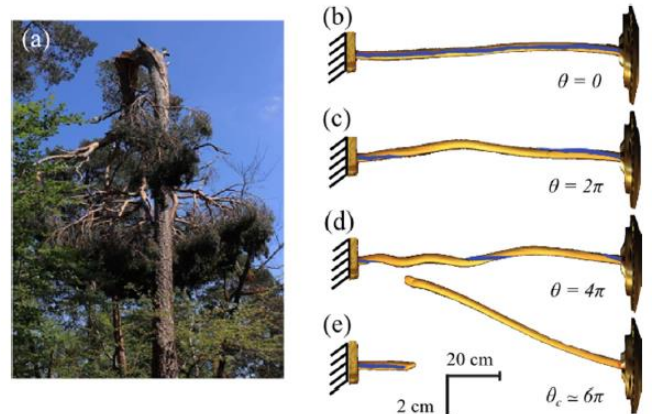


Fig 21 : Représentation des risques de ruine par torsion des arbres [5]

F. Conclusion pour les réseaux électriques HTA en zones boisées vis-à-vis des tempêtes

En zone boisée, la chute des arbres est une des causes principales de pertes des lignes électriques HTA aériennes.

Il apparaît nécessaire de prendre en compte les aspects de flexion et de torsion pour modéliser la chute des arbres due au vent.

Plusieurs hypothèses peuvent être citées pour expliquer les écarts entre les estimations du modèle l'ONF [4] de taux de chute d'arbre en cas de vent et la réalité observée lors de la tempête Klaus en 2009 :

- Le modèle de l'ONF prend-il ou non en compte la simultanéité de forces de flexion et de torsion des arbres en cas de tempête ?
- Une autre question apparue dans les études d'EDF R&D sur ces sujets, est la suivante, si V est la vitesse du vent, quel facteur d'influence faut-il prendre en compte en fonction des régimes de vent (laminaire ou turbulent) : V , V^2 ou V^3 ?

VIII. PRESENTATION DES CONDITIONS CYCLONIQUES AUX ANTILLES ET DANS L'OCEAN INDIEN

On présente le contexte et les premières approches d'une étude initiée en 2021 -2022 par EDF R&D pour EDF SEI (système électrique insulaire) qui gère les réseaux électriques HTA et HTB dans les îles de la Guadeloupe, de la Martinique aux Antilles, et pour l'île de la Réunion dans l'océan indien.

Ces îles sont soumises au risque cyclonique. Les ouvrages HTB (poteau et lignes aériennes) ne peuvent pas être enterrés. Donc les réseaux HTB peuvent être affectés par la contrainte de vent en cas de cyclones.

Les questions qui se posent pour les réseaux HTB par rapport à la contrainte cyclonique sont les suivantes :

- Faut-il se concentrer sur la stratégie de renforcement des réseaux HTB ? et jusqu'à quelle vitesse de vent est-il possible de renforcer mécaniquement le réseau HTB ?
- Ou faut-il mieux travailler sur la remise en état la plus rapide possible du réseau, une fois le cyclone passé ?
- Ou faut-il travailler simultanément sur les deux items précédents ?

A. Exemple d'impact du vent sur des lignes HTB

On indique ci-dessous l'impact du vent sur des lignes HTB 90 kV.



Fig 22 : Exemple de pression du vent sur les lignes HTB

Ci-dessous on a un exemple d'ouragan ayant eu lieu sur la Bretagne en 1987 (pointe de vitesse de vent à 220 km/h). On voit l'impact sur des pylônes HTB 63 kV.

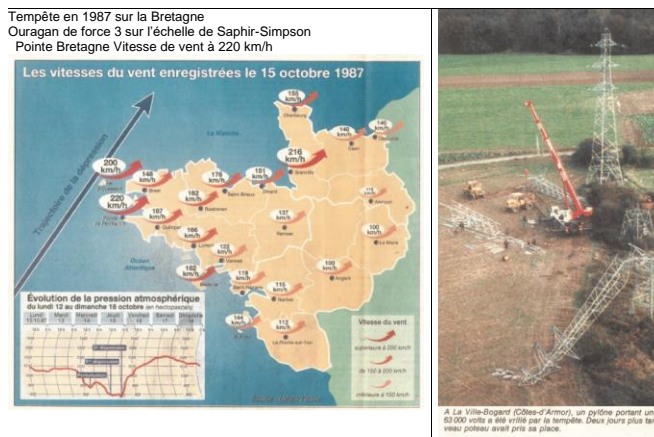


Fig 23 : En octobre 1987 une tempête de force 3 (équivalent sur l'échelle de Saffir Simpson) a touché la Bretagne

B. Type de vent aux Antilles

Ci-après on présente des exemples de cyclones aux Antilles en 2017. Le cyclone est caractérisé par l'œil du cyclone où le vent est très faible. Le cyclone IRMA est passé sur l'île de Saint Martin (voir élément au sous-chapitre suivant)



07 sept 17
MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET SOLIDAIRE / MINISTÈRE DE LA COHÉSION DES TERRITOIRES

Fig 24 : Exemple de cyclones aux Antilles en 2017

L'échelle de « Saffir-Simpson » a été créée pour classer les forces de cyclones.

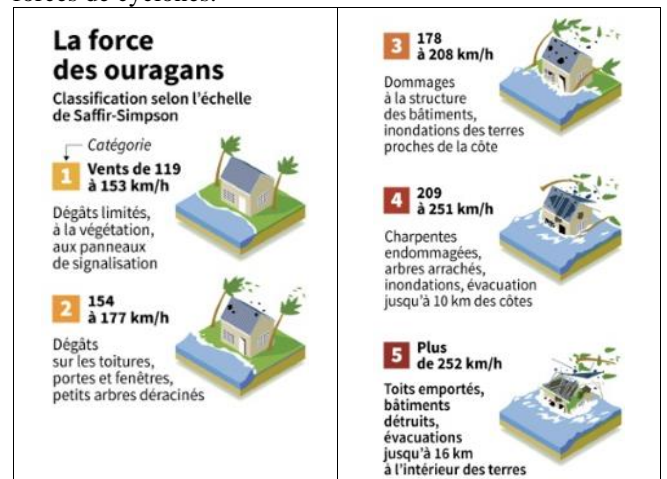


Fig 25 Echelle de Saffir Simpson pour les cyclones



fig 26 : Ouragan Dean 2020

C. Exemple du cyclone Hugo en 1989 en Guadeloupe

Le cyclone Hugo a frappé l'île de la Guadeloupe en 1989. On voit sur la figure suivante le passage de l'œil du cyclone.

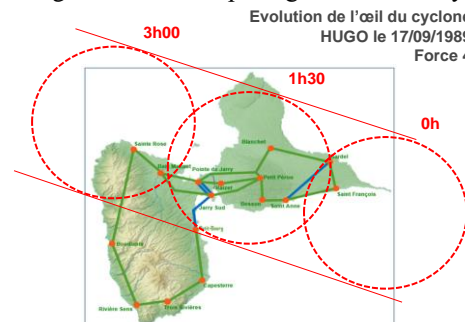


Fig. 27 : exemple du cyclone Hugo sur l'île de la Guadeloupe en 1989

Suite au passage du cyclone HUGO en 1989 sur l'île de la Guadeloupe, le réseau électrique a été en grande partie détruit. Ensuite le réseau HTA (20 kV) aérien a été majoritairement reconstruit en souterrain. Par contre le réseau HTB a été reconstruit en aérien.

D. Passage du cyclone IRMA en 2017 sur l'île de Saint Martin

L'île de Saint-Martin est une petite île Franco-Néerlandaise située au nord de l'île de la Guadeloupe. En 2017 le cyclone IRMA de force 5 (avec des vitesses de vent soutenues de 295 km/h) est passé sur l'île de Saint Martin.

Ci-dessous images des dégâts dus au cyclone IRMA. Ce cyclone a détruit en grande partie les infrastructures de l'île de Saint Martin (batiments, routes, réseau électrique, antennes relais de télécommunication, aéroport...)



Figure 28 : Cyclone IRMA 06/09/2017 de force 5 sur l'île de Saint-Martin

IX. RAPPELS SUR LES COMPETENCES D'EDF R&D EN MECANIQUE CLASSIQUE ET MECANIQUE DES FLUIDES

Dans ce sous-chapitre on veut juste mentionner que pour les différentes problématiques techniques touchant différents « métiers » d'EDF (production, réseau), la R&D d'EDF a développé depuis des dizaines d'années de fortes compétences :

- en mécanique classique avec le code ASTER
- et en mécanique de fluide avec par exemple le code SATURNE.

Ces codes correspondent à une approche déterministe de la physique. Mais pour prendre en compte les incertitudes EDF R&D a développé l'outil « Open TURN » qui peut s'interfacer avec les codes déterministes précédents pour faire des études de sensibilité sur les variables d'entrées.

De plus on peut mentionner qu'avant la dérégulation en 2005, la R&D a travaillé pour RTE sur les calculs en mécanique classique avec le code ASTER pour modéliser la résistance mécanique des pylônes HTB de RTE. On montre dans la figure suivante une modélisation réalisée en 2000 avec l'outil ASTER de modélisation mécanique par éléments finis 3D d'un pylône HTB. Mais cette activité s'est arrêtée en 2010 suite à la séparation entre les activités de R&D d'EDF et de RTE.

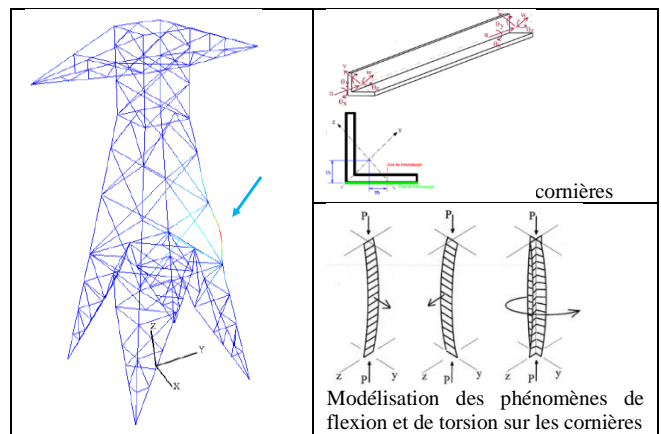


Fig 29 : Modèle en 3D par éléments finis de résistance mécanique de pylônes HTB effectué avec ASTER par EDF R&D en 2000.

X. MODELE MECANIQUE PROBABILISTE POUR CALCULER LA RESISTANCE DES PYLONES ET LIGNES FACE AU VENT

A. Demarche adoptée pour la problématique posée par EDF SEI

Par rapport à la problématique d'EDF SEI pour la prise en compte des cyclones pour les réseaux HTB aérien des îles de la Guadeloupe, de la Martinique et l'île de la Réunion, l'objectif d'EDF R&D est de construire un outil d'aide à la décision selon une approche multifactorielle pour définir la stratégie à adopter face aux cyclones. Les étapes pour cette approche sont les suivantes :

- Prise en compte des réseaux électriques existants et des règles de dimensionnement utilisés par le passé pour les réseaux HTB (90 kV ou 63 kV) dans les îles de la Guadeloupe, de la Martinique et de l'île de la Réunion.
- Analyse de quelques retours d'expérience disponibles sur l'impact des cyclones sur les réseaux électriques dans les Antilles (Hugo, Irma..).
- Première approche simplifiée de modélisation pour prendre en compte les aspects mécanique, électrique, et fiabilité avec une approche probabiliste.
- Seconde approche plus détaillée avec contribution des spécialistes de mécanique classique (ASTER) et de mécanique des fluides (SATURNE) d'EDF R&D.

B. Elements sur la première approche simple

En 2021, un outil de calcul mécanique (RDM7) a été utilisé pour calculer la flexion mécanique d'un pylône en fonction du vent (figure 30).

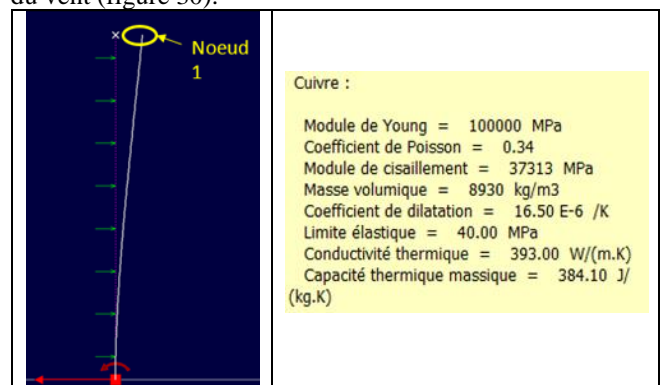


Figure 30 : Exemple de flexion due au vent sur un poteau seul

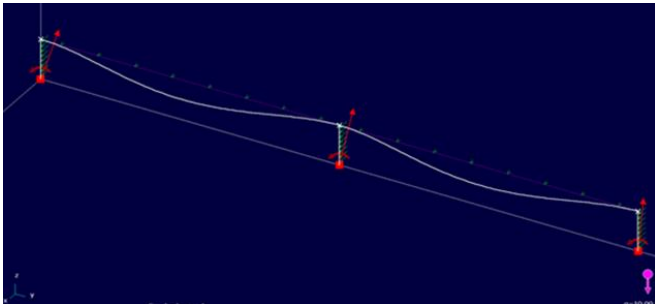


Figure 31 : calcul mécanique de l'impact du vent sur un pylône avec deux lignes de part et d'autre qui ont une prise au vent qui se répercute sur le pylône.

Ensuite on a modélisé un poteau (ou pylône) entouré de deux lignes avec prise au vent sur les lignes. A partir de ces premiers résultats de calcul mécanique, on a pris des hypothèses probabilistes de ruine des poteaux en fonction de la déformation mécanique du poteau. On en déduit une probabilité de ruine d'un poteau en fonction des vitesses de vent.

Ensuite on a considéré une ligne avec 20 pylônes HTB. La fiabilité d'un pylône HTB en fonction du vent a été déduite des résultats précédents.

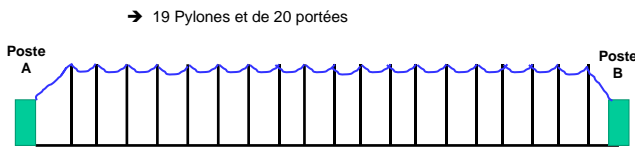


Figure 32 : Ligne HTB avec 19 pylônes et 20 portées

La probabilité d'avoir k poteaux ruinés sur cette ligne est donné par une loi de Poisson :

$$P(X = k) = \frac{(\Lambda_L)^k}{k!} \cdot \text{Exp}(-\Lambda_L)$$

Ensuite on représente de façon très simplifiée (figure 33) un réseau similaire à celui de la Guadeloupe avec des lignes HTB et des centres de production. Dans cet exemple simplifié toutes les lignes HTB ont 20 pylônes. La probabilité de ruine de pylônes sur une ligne prend en compte l'angle du vent par rapport à la ligne.

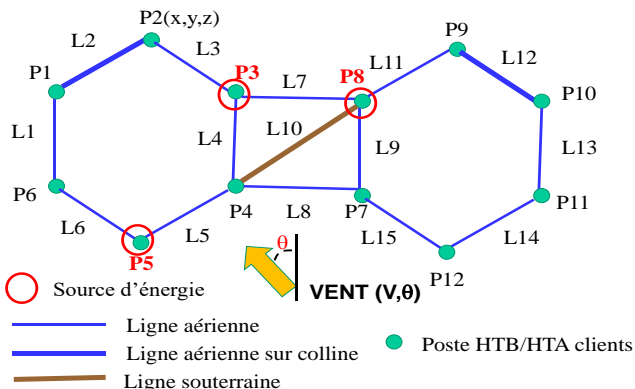


Figure 33 : schéma simplifié d'un réseau HTB sur une île similaire à l'île de la Guadeloupe

On peut ainsi calculer (figure 34) à titre d'exemple la probabilité de ne plus pouvoir alimenter le client P1 en fonction de différentes vitesses de vent qui produisent des chutes de pylônes.

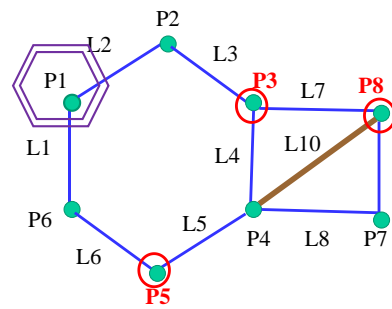


Fig 34 : Exemple de réseau avec un client situé en P1 qui est alimenté par trois sources situées en P3, P8 et P5.

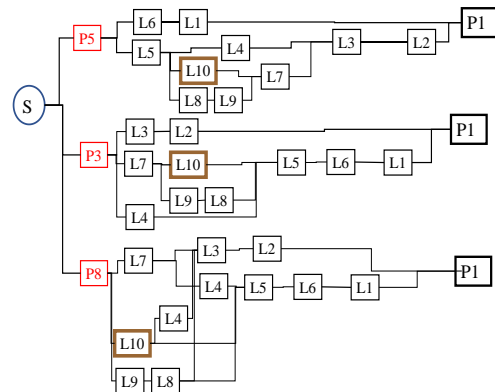


Fig 35 : Exemple de block-diagram pour représenter le risque de perte de l'alimentation de P1 en fonction des différentes vitesses de vent

C. Perspectives pour la suite de l'étude en 2022-2023

Le département calcul mécanique ERMES de d'EDF/ R&D va participer à la suite de l'étude en réactivant sa compétence passée de calcul de fiabilité de pylône avec le code ASTER.

XI. Foudre sur les réseaux électriques HTA dans le sud-est de la France

La figure ci-dessous indique les zones de foudroiement en France. Le région sud-est de la France est la plus foudroyée.

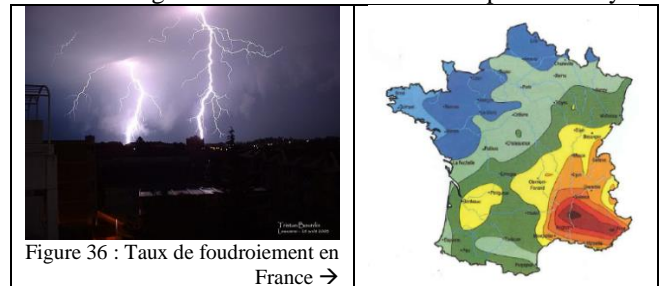


Figure 36 : Taux de foudroiement en France →

Les impacts de foudre sont enregistrés par « Météorage » qui est une filiale de Météofrance. Les impacts de foudre sont datés à la seconde, localisés XY à 500 mètres près, l'intensité(A) et le sens du courant (montant ou descendant) sont également enregistrés.

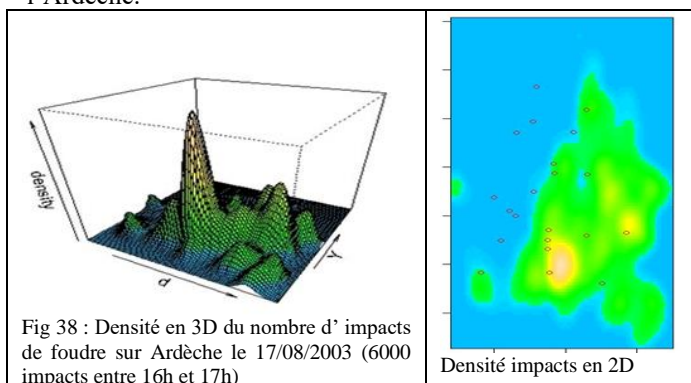


Fig 37 : Transformateur HTA/BT haut de poteau en zone rurale

Le transformateur HTA/BT haut de poteau installé dans les zones rurales est protégé par des parafoudres.

Néanmoins en fonction du foudroiement c'est un des composants électriques plus particulièrement affecté par la contrainte de foudre [6].

Un des épisodes de foudroiement le plus violent depuis 20 ans a eu lieu en Août 2003 sur la zone Drôme Ardèche avec 6000 impacts de foudre en une heure. On représente ci-après la densité des impacts de foudre sur le département de l'Ardèche.



Lors de cet épisode de foudroiement on a pu constater des coupures longues par pertes de départ (ou ligne) HTA suite au fonctionnement du disjoncteur départ (par défaillance de transformateurs HTA/BT à cause de la foudre). Mais il y a eu aussi dans certains postes HTB/HTA des fonctionnements de disjoncteur d'arrivée, ce qui coupe l'alimentation de plusieurs départs (ou lignes HTA). Ces déclenchements de Disjoncteur d'arrivée se produisaient sur des contrôles commande anciens de postes HTB/HTA (en relais électrotechniques ou électronique analogique). Il pouvait s'agir de fonctionnement intempestif de la protection d'arrivée HTA par saturation du système de protection en cas de sollicitations simultanées (dues à la foudre) sur plusieurs départs HTA rattachés sur le même jeu de barres. (Cela ne doit plus se produire avec les derniers contrôle commande numérique de postes sources). Une question se pose du point de vue de l'analyse statistique dans ce type de situation. Comment traiter les événements suivants (tableau 2) ? :

Date d'ouverture des Dj Sur Drôme Ardèche	Poste HTB/HTA	N° Ligne HTA du poste	Cause
17/08/2003 16h10	Poste A	L5	Orage
17/08/2003 16h15	Poste B	L4	Orage
17/08/2003 16h21	Poste C	L1	Orage
17/08/2003 16h21	Poste C	L2	Orage
17/08/2003 16h21	Poste C	L3	Orage
17/08/2003 16h37	Poste D	L6	Orage
17/08/2003 16h42	Poste A	L3	Orage
17/08/2003 16h54	Poste E	L5	Orage

Tableau 2 : Exemple théoriques de liste de lignes HTA coupées sur une région suite à un orage où les coupures sont datées et localisées (poste et n° de ligne)

Sur la période considérée dans le tableau 2, on a 8 coupures de départs HTA. Mais en fait on a que 5 départs coupés (venant d'événements indépendants), et un fonctionnement de Dj Arrivée qui a coupé simultanément 3 départs HTA. Donc faut-il considérer :

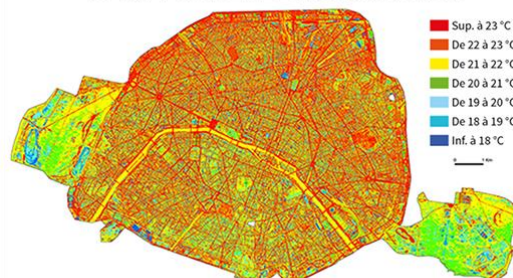
- 8 départs HTA coupés ?
- ou 5 événements indépendants (avec 1 coupure), et en plus 1 événement qui a produit 3 coupures ?

XII. IMPACT DE LA TEMPERATURE SUR LES RESEAUX HTA SOUTERRAIN SUR PARIS

A. Rappel du contexte

Le réseau HTA (20 kV) est constitué de lignes HTA qui sont situées sous les trottoirs des rues de Paris à environ 80 cm dans le sous-sol. Il y a environ 5000 km de câbles HTA souterrains sur Paris Intra-Muros. En cas de court-circuit sur un câble HTA, il faut identifier où se trouve le défaut sous les trottoirs, puis il faut creuser jusqu'au câble où il y a le défaut (court-circuit), réparer le câble, puis reboucher le trottoir. Les tâches de creusement du sol et de remblaiement sont sous-traitées à des sociétés spécialisées en travaux publics. La figure 39 ci-dessous fournie par la mairie de Paris montre que les rues de Paris avec le bitume ont des températures élevées en début de nuit.

THERMOGRAPHIE AÉRIENNE ESTIVALE
16 au 17 août 2016 en début de nuit



SOURCES : AÉRODATA ; MAIRIE DE PARIS

Figure 39 : thermographie infrarouge de Paris

B. Article d'ENEDIS présenté au CIRED 2016

L'article publié par ENEDIS [7] à la conférence CIRED 2016 indique une augmentation du nombre de pannes sur les liaisons HTA souterraines sur le réseau de Paris en phase de périodes avec de fortes températures.

Ces augmentations du nombre quotidien de pannes, qui se produisent en période caniculaire, mettent en contrainte les agents d'ENEDIS (et les sociétés sous-traitantes) chargés de réparer les réseaux. Dans ce cas, on arrive pour le réseau souterrain à une situation de « gestion de crise » (équivalent en souterrain d'une tempête en réseau aérien).

L'objectif de l'article d'ENEDIS du CIRED 2016 était de présenter [7] un nouvel outil permettant de prévoir le nombre de pannes par jour en fonction de prévision de température de Météofrance pour la semaine ou les quinze jours à venir.

Pour continuer à améliorer ce premier modèle, ENEDIS a demandé en 2020 à la R&D d'EDF de travailler sur ce sujet.

C. Rappel du premier modèle de fiabilité développés par EDF R&D en 2010 pour le réseau HTA sur Paris

Le département SYSTEME d'EDF R&D avait déjà travaillé en 2010 sur la fiabilité des réseaux souterrains HTA de Paris dans une optique d'étude de la durée de vie des câbles sur Paris et de l'impact des canicules sur la réduction de la durée de vie des câbles HTA [8], [9]. Le département SYSTEME s'était appuyé sur les expertises menées dès 2003-2006 (suite au premier pic de pannes important à l'été 2003 sur Paris) par le département EDF R&D LME qui étudie, qualifie, et mène des expertises sur les pannes des câbles HTA [10].

Ce département LME avait conclu que les deux paramètres intervenant dans ces augmentations de pannes l'été, étaient l'augmentation de la température ambiante en phase caniculaire et l'humidité qui avait diffusé avec les années dans certains câbles d'ancienne génération (avec isolant papier huilé). Ainsi à partir de ces informations EDF R&D/SYSTEME avait utilisé un modèle issu des essais de fiabilité en électronique, le modèle de fiabilité « Peck (température et humidité) », pour modéliser les augmentations de nombre de pannes par mois sur Paris (voir ci-après le facteur d'accélération) :

$$AF = \left(\frac{HR(an)}{HR_0} \right)^\alpha \cdot \exp \left(- \frac{E_a}{k_B} \left[\frac{1}{T(mois)} - \frac{1}{T_0} \right] \right)$$

AF : Facteur d'accélération avec humidité relative (HR) dans l'isolant du câble qui évolue lentement dans le câble par année, et la température moyenne T qui évolue chaque mois.

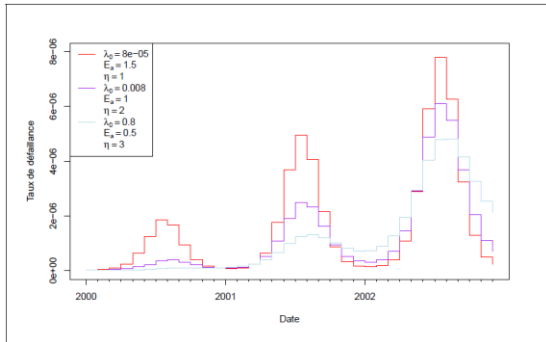


Fig. 40 : exemple de modélisation de l'augmentation de pannes par mois l'été avec le modèle de fiabilité de Peck [9]

D. Nouvelles études d'EDF R&D en 2020-2022

L'objectif de la R&D en 2020 a été de transformer le modèle de fiabilité de 2010 qui était par mois, en un modèle par jour. Les études sont toujours en cours sur le sujet.

Le département SYSTEME continue de travailler sur le sujet en 2022 en bénéficiant de nouvelles données de mesures de températures en sous-sol à différents endroits de Paris.

En effet Météofrance fournissait dès 2003 des mesures de température en sous-sol à la station météo de Paris Montsouris (figure 41).

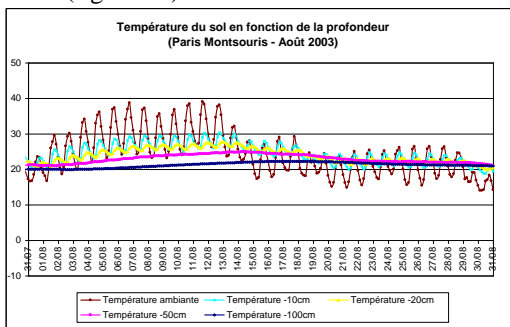


Fig 41 : Données de température en sous-sol à différentes profondeurs en 2003

Mais pour avoir des données plus précises de la température réelle auprès des câbles HTA qui sont situés à 80 cm sous les trottoirs, ENEDIS a installé depuis 2020 des capteurs de température sous les trottoirs à différents endroits de Paris et à différentes profondeurs -30 cm, -60 cm et -90 cm (fig. 42).

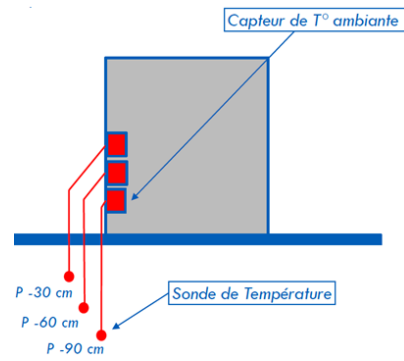


Fig 42 : Expérimentation de la DR de Paris depuis 2020 d'installation à plusieurs endroits dans Paris de la mesure de température en sous-sol sous les trottoirs à -30 cm, -60 cm -90 cm.

On peut ainsi apprécier la variabilité des températures en sous-sol à différents endroits de Paris (voir figure 43 suivante pour les sondes à -30 cm)

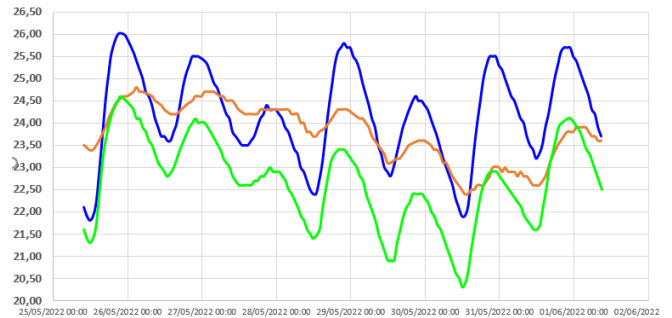


Fig 43 : Exemples de mesures de la variabilité de température à -30 cm sous les trottoirs à 3 endroits de Paris

On peut ainsi prendre en compte, avec des modèles de diffusion de la température dans le sol, les variabilités des données terrain.

Exemple de modèle théorique de diffusion de température dans le sol à différentes profondeurs avec un trottoir à structure homogène
$\begin{cases} T(0, t) = T_0 + \theta_0 \cos(\omega t) \\ \underline{T}(0, t) = T_0 + \theta_0 e^{i\omega t} \end{cases}$
Hypothèses de température au niveau de la surface du sol
$\begin{cases} \underline{T}(z, t) = T_0 + \theta_e^{-(1+i)\frac{z}{\delta}} e^{\omega t} \\ T(z, t) = T_0 + \theta_0 \cos(\omega t - \frac{1}{\delta}z) e^{-\frac{1}{\delta}z} \end{cases}$
Calcul de la température en fonction de la profondeur z du sous-sol
Avec $\delta = \sqrt{\frac{2D_{th}}{\omega}}$ l'épaisseur de peau thermique

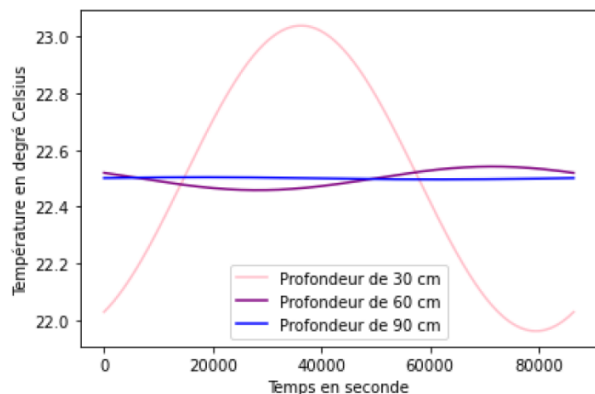


Fig 44 : Exemple de calcul théorique de la température à différentes profondeurs -30 cm, -60 cm, -90 cm.

XIII. EXEMPLE D'IMPACT DE LA CANICULE SUR LES POSTES ELECTRIQUES DU RESEAU DE RTE FIN JUIN 2015

A. Description de l'impact de la canicule sur des composants de postes de RTE fin juin 2015

Fin juin 2015 il y a eu de fortes chaleurs sur l'ouest de la France. Les combinés de mesure (ou transformateur de mesure) servent dans les postes de RTE à mesurer le courant sur les lignes 225 kV. Cet appareil contient un isolant fait d'huile et/ou de papier huilé. Ainsi fin juin 2015, en 24 h, 62 combinés de mesure sont tombés en panne dans 17 postes différents de RTE de l'ouest de la France (il y a environ 500 postes de RTE dans l'ouest de la France). Ces pannes ont provoqué en 24h des coupures de courant de plusieurs heures pour 1 million de clients environ dans l'ouest de la France.



Fig 45 : Combiné de mesure et nombre de clients coupés dans les différents départements de l'ouest de la France fin juin 2015

B. Conséquences de cet événement sur la qualité de fourniture de RTE pour l'année 2015

Le bilan de cet événement de fin juin 2015 a abouti à une augmentation significative de l'indisponibilité moyenne annuelle du réseau de RTE en 2015, (cet événement est responsable à lui seul de 5 minutes de temps de coupures équivalent sur les 7 minutes de l'année 2015 pour RTE).

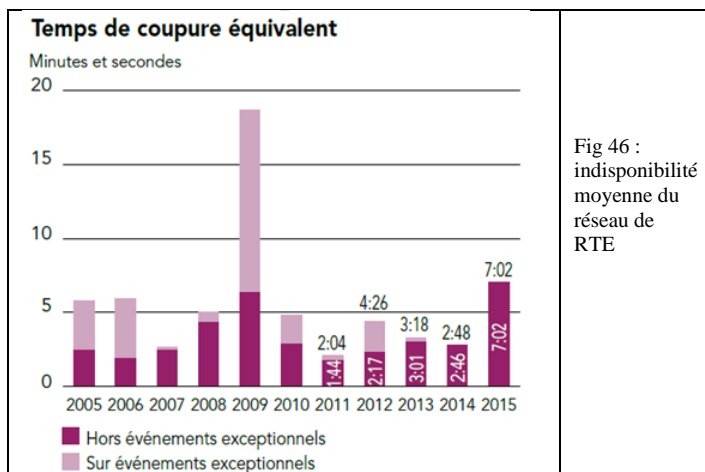


Fig 46 : indisponibilité moyenne du réseau de RTE

C. Description du mode de pannes des combinés de mesure RTE a été surpris de la simultanéité des pannes de ces composants « combiné de mesure » fin juin 2015.

Lorsque ces combinés de mesure sont âgés, il peut y avoir diffusion d'humidité dans l'isolant qui contient de l'huile et/ou du papier huilé. RTE connaissait ce mode de panne, puisque de temps en temps il y avait une panne de combinés de mesure durant les périodes estivales. Mais si un seul combiné de mesure tombe en panne, compte tenu de la « règle du N-1 » du dimensionnement du réseau de RTE, il ne doit pas y avoir de conséquences sur l'alimentation des clients.

Ce qui est inédit fin juin 2015, c'est la simultanéité en moins de 24h, des pannes de plusieurs (62) combinés de mesure dans plusieurs postes électriques dans l'ouest de la France ?

Ainsi les facteurs qui semblent être à l'origine de ces pannes sont : la température élevée le jour, le cyclage de température jour – nuit (ΔT_{jour}), et l'humidité qui pénètrent dans l'isolant pour les matériels en fonction de leur âge. Le facteur d'accélération des pannes des combinés de mesure pourrait être du type suivant :

$$AF = \left(\frac{HR(an)}{HR_0} \right)^\alpha \cdot \left(\frac{\Delta T_{jour}}{\Delta T_0} \right)^\delta \exp \left(- \frac{E_a}{k_B} \left[\frac{1}{T(jour)} - \frac{1}{T_0} \right] \right)$$

XIV. CONCLUSIONS

Cet article a permis d'illustrer l'impact des contraintes climatiques sur les réseaux électriques aérien et souterrain HTA et HTB. On a montré des méthodes de traitement des différentes contraintes météorologiques. Les études se poursuivent sur le sujet à EDF R&D.

REFERENCES

- [1] H. Procaccia, P. Morilhat "Fiabilité des structures des installations industrielles" : théorie et applications de la mécanique probabiliste" Collection EDF R&D n°94 Eyrolles 1996
- [2] P. Lyonnet "Ingénierie de la fiabilité » Ed Tech& Doc Lavoisier 2006
- [3] C. Meredieu et al. « ForestGales : un outil d'aide à la gestion adapté au Pin maritime dans les landes de Gascogne » INRA CIAG 30 Juin 2009
- [4] T. Bélouard et al. "Evaluation des facteurs de résistance au vent des peuplements de pin maritime après la tempête Klaus à l'aide des données de l'inventaire forestiers. IGN, INRA Juin 2012
- [5] E. Viro et al. "Critical wind speed at which trees break" Physical Review E93 2016.
- [6] P. Carer, Lise Guérineau «Evaluation de l'impact des conditions météorologiques sur la fiabilité du réseau électrique par des processus stochastiques » Lambda Mu 19 Dijon 2014
- [7] O. Faivre et al. "Forecast of faults during heat waves in a medium voltage grid and crisis management" CIRED Workshop Helsinki 14-15 June 2016.
- [8] P. Carer et Al. « Modélisation de la fiabilité des matériels électriques HTA (20kV) par l'analyse statistique du retour d'expérience et des contraintes d'environnement » Lambda Mu 17 La Rochelle 2010
- [9] L. Guérineau « Analyse statistique de modèles de fiabilité en environnement dynamique » thèse de Doctorat Université Bretagne Sud 2013
- [10] T. Espilit, F. Zorzi, R. Tambrun "Diagnostic for cable system asset management and preventive maintenance at EDF" 19th International Conference on Electricity Distribution CIRED Vienna 21-24 May 2007