



**HAL**  
open science

## Modélisation floue des énergies intermittentes raccordées au réseau de distribution

Wendy Carolina Briceno Vicente Briceño Vicente, Raphaël Caire, Nouredine  
Hadjsaid

► **To cite this version:**

Wendy Carolina Briceno Vicente Briceño Vicente, Raphaël Caire, Nouredine Hadjsaid. Modélisation floue des énergies intermittentes raccordées au réseau de distribution. *Électrotechnique du Futur* 2011, Dec 2011, Belfort, France. hal-01809979

**HAL Id: hal-01809979**

**<https://hal.science/hal-01809979>**

Submitted on 7 Jun 2018

**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.

# Modélisation floue des énergies intermittentes raccordées au réseau de distribution

Wendy Carolina BRICENO VICENTE, Raphaël CAIRE, Nouredine HADJSAID  
G2ELAB, UMR 5529 INPG/UJF-CNRS, BP 46, 38402 Saint Martin d'Hères Cedex, France  
[Wendy.BRICENO-VICENTE@g2elab.grenoble-inp.fr](mailto:Wendy.BRICENO-VICENTE@g2elab.grenoble-inp.fr), [caire@g2elab.grenoble-inp.fr](mailto:caire@g2elab.grenoble-inp.fr),  
[Nouredine.Hadjsaid@g2elab.grenoble-inp.fr](mailto:Nouredine.Hadjsaid@g2elab.grenoble-inp.fr)

**RESUME** – La connaissance de la répartition des charges à court et long terme est une donnée essentielle pour le dispatching, la planification ou l'analyse des réseaux électriques de distribution. La prise en compte de sources d'énergie alternatives dans ce calcul est indispensable pour décider du plan de production ou de la gestion des charges afin de minimiser le coût d'exploitation en respectant les contraintes de fonctionnement et de fiabilité des réseaux électriques. Le but de ce travail de recherche est de développer des stratégies pour la résolution du problème de la répartition de charges, base de la planification et de l'exploitation des réseaux électriques, en tenant compte du caractère incertain de la production de puissance décentralisée et des charges. Deux méthodes sont utilisées: la méthode probabiliste de Monte Carlo et la méthode possibiliste de l'arithmétique floue.

**RÉSUMÉ** – The Load flow study in the short and long term is an essential element for planning, dispatching, and analysis of electrical distribution networks. The consideration of renewable energy sources (RES) in load flow calculation is needed to determine the production planning and load management to minimize the cost of operation, respecting the network constraints and reliability of power systems. The objective of this work is to develop a strategy to solve balanced load flow, basic for planning and operation of electrical networks, taking into account the uncertainty of distributed generation and load variations. Two methods are used: the probabilistic method of Monte Carlo and the method of possibilistic fuzzy arithmetic.

**MOTS-CLES** – Calcul de répartition de charges, Méthode de Monte Carlo, arithmétique floue, variables aléatoires, nombre flou, intervalle arithmétique.

## 1. Introduction

Les évolutions récentes des systèmes énergétiques ont des répercussions importantes sur les réseaux électriques, en particulier de distribution, où une large part de la production décentralisée est, ou sera, raccordée. L'incertitude de prévision de la production renouvelable ajoute une contrainte forte sur des réseaux qui ont été conçus, à l'origine, uniquement pour accueillir des consommateurs et peuvent, ainsi, se trouver en limites de fonctionnement. Il faut donc disposer de modèles qui permettent de mieux évaluer les capacités des réseaux ainsi que leurs évolutions dans un environnement incertain.

Au cours des dernières années, de nouvelles approches de calcul de répartition de charges ont émergé. Ces approches sont basées sur des méthodes qui permettent d'inclure les incertitudes liées au problème et de les modéliser en tenant compte du caractère aléatoire ou incertain de certaines productions renouvelables.

## 2. Calcul de répartition de charges

Le calcul de répartition de charges (acronyme LF, en anglais) est la base de la planification et de l'exploitation des réseaux électriques. La méthode classique est une méthode déterministe, où les données d'entrée sont considérées constantes ; elle permet de donner un aperçu du point de fonctionnement statique du réseau. Le LF calcule la tension à chaque noeud (amplitude et angle) ainsi que les puissances (active et réactive) transitant dans les lignes.

## 3. Calcul de répartition de charges probabiliste

Le calcul de répartition de charges probabiliste a été proposé et appliqué en 1974 par Borkowska et Allan [1] pour un

système sous conditions normales d'exploitation. Dans le PLF les entrées sont définies comme des fonctions de densité de probabilité (acronyme PDF, en anglais) et les résultats des variables du système et du flux de puissance dans les lignes sont aussi des PDFs, qui contiennent les incertitudes des modèles d'entrée prises en compte. Le PLF peut être effectué en utilisant :

- a) soit une approche numérique, en utilisant la méthode de Monte Carlo (MC), qui fait la substitution des valeurs stochastiques pour les variables du système et effectue une analyse déterministe pour chaque tirage de valeurs.
- b) soit une approche analytique en utilisant comme entrées les expressions mathématiques des variables aléatoires et en obtenant des résultats en termes d'expressions mathématiques.

### 3.1 Approche numérique

C'est une méthode approximative de simulation de processus stochastiques. Cette méthode est moins exigeante en termes d'hypothèses que la méthode analytique du PLF. La méthode de MC se caractérise par l'utilisation d'un générateur de nombres pseudo aléatoires des variables d'incertitude, modélisées comme des PDF ; elle résout d'une manière répétitive un grand nombre de fois des DLF (acronyme de Deterministic Load Flow, en anglais) pour chaque valeur d'échantillonnage des variables d'incertitude. C'est une méthode applicable à des problèmes de type numérique, ou bien à des problèmes de nature eux-mêmes probabilistes.

## 4. Calcul de répartition de charges possibiliste

La méthode de l'arithmétique floue modélise les incertitudes grâce à des nombres flous (qui ont une équivalence dans le domaine de probabilité) et implémente les opérations arithmétiques floues dans les algorithmes conventionnels. Les nombres flous sont définis par leur fonction d'appartenance  $\mu_A(x)$  qui prend en compte le degré de certitude  $\alpha_j$  compris entre 0 et 1 pour chaque intervalle du nombre flou.

Les différences par rapport à la méthode MC sont résumées dans le Tableau 1 ci-dessous :

**Tableau 1. Comparaison entre méthodes probabilistes et possibilistes**

Méthode	Itérative	Evolution du temps	Evaluation des extrêmes	Linéarisation des équations	Temps de simulation
Monte Carlo	Oui	Non	Non	Non	Long
Arithmétique floue	Non	Oui	Oui	Oui	Court

### 4.1 Les nombres flous

La fonction d'appartenance  $\mu_A(x)$  d'un nombre flou A de  $\mathfrak{R}$  doit satisfaire au moins trois propriétés [2]:

- a) L'ensemble des points pour lesquels la valeur maximum de  $\mu_A(x)$  est égale à 1 est appelé le noyau de la fonction d'appartenance. La valeur moyenne du noyau est appelée la valeur modale.
- b) La fonction d'appartenance  $\mu_A(x)$  du nombre flou est monotone croissante jusqu'au noyau et monotone décroissante à partir du noyau.
- c) La largeur de tout intervalle de  $\mu_A(x=\alpha)$  pour  $\alpha \in [0,1]$  est un intervalle fermé qui indique le degré d'imprécision.

### 4.2 Nombre flou trapézoïdal

Les fonctions d'appartenance trapézoïdales sont déterminées par quatre paramètres qui se réfèrent aux points  $a_1, a_2, a_3$  et  $a_4$  de la fonction d'appartenance. La forme exacte de la fonction d'appartenance trapézoïdale est définie comme suit [HA-05]:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} \frac{x - a_1}{a_2 - a_1}, & \text{pour } a_1 \leq x \leq a_2 \\ 1, & \text{pour } a_2 \leq x \leq a_3 \\ \frac{a_4 - x}{a_4 - a_3}, & \text{pour } a_3 \leq x \leq a_4 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (1)$$

Ce modèle à quatre paramètres peut également être utilisé pour représenter les fonctions d'appartenance triangulaire ou rectangulaire en fixant  $a_2=a_3$  (triangulaire) ou  $a_1 = a_2$  et  $a_3 = a_4$  (rectangulaire).

### 4.3 Opérations arithmétiques sur les nombres flous

Les Règles pour les opérations arithmétiques entre les nombres flous peuvent être déduites du principe d'extension de

Zadeh [5].

S'il existe deux nombres flous A et B définis par leurs fonctions d'appartenance à gauche et à droite du noyau, tels que :  
 $A : \mu_A(x) = [\mu_{A,G}(x), \mu_{A,D}(x)]$  et  $B : \mu_B(x) = [\mu_{B,G}(x), \mu_{B,D}(x)]$ , les opérations mathématiques suivantes sont possibles :

$$A + B = [\mu_{A,G}(x) + \mu_{B,G}(x), \mu_{A,D}(x) + \mu_{B,D}(x)] \quad (2)$$

$$A - B = [\mu_{A,G}(x) - \mu_{B,D}(x), \mu_{A,D}(x) - \mu_{B,G}(x)] \quad (3)$$

$$A \times B = [\mu_{A,G}(x) \times \mu_{B,G}(x), \mu_{A,D}(x) \times \mu_{B,D}(x)] \quad (4)$$

$$A / B = [\mu_{A,G}(x) / \mu_{B,D}(x), \mu_{A,D}(x) / \mu_{B,G}(x)] \quad (5)$$

## 5. Calcul de répartition des charges équilibré dans un réseau de distribution

Ce modèle suppose que le système triphasé peut être représenté par son équivalent monophasé direct. Le modèle comprend les éléments suivants:

- Les lignes de distribution sont représentées par leurs résistance et réactance directes en p.u.
- Les paramètres shunt des lignes ont été négligés, pratique courante pour les lignes courtes du réseau de distribution.
- Toutes les charges comprises sur le réseau sont représentées par leurs puissances actives et réactives en p.u.

### 5.1 Description du réseau de distribution

C'est un réseau de distribution « 28-bus test » présenté dans [3]. Le système original est un système réel de distribution en 11 kV et 100kVA auquel on a raccordé sur le nœud 6 une source éolienne. Dans ce système, tous les nœuds sont des nœuds de type PQ à l'exception du nœud 1 qui est un nœud bilan de tension 1 p.u.

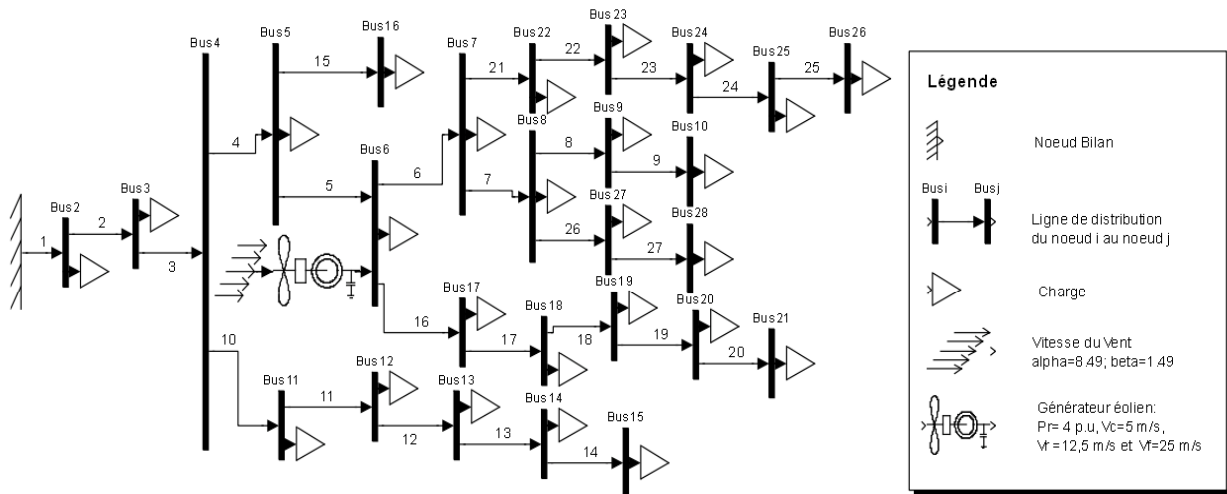


Figure 1. Diagramme unifilaire du réseau étudié

### 5.2 Modèle de la génération éolienne

Le modèle pour la génération éolienne prend comme point de départ la PDF des données de la vitesse du vent, qui sont ensuite transmises au modèle de l'aérogénérateur pour obtenir la distribution de probabilité des puissances de sortie de l'éolienne.

#### 1.1.1 Détermination de la fonction de distribution de vent

Sur la base des données annuelles de la vitesse du vent d'une région en France pendant un an, la meilleure PDF déterminée sur le test d'ajustement avec une précision de 95 %, correspond à une PDF type de Weibull avec paramètres  $\alpha = 8,494$  et  $\beta = 1,487$ .

$$f_v(v) = \frac{\beta}{\alpha} \left[ \frac{v}{\beta} \right]^{\beta-1} e^{-\left(\frac{v}{\alpha}\right)^\beta} \quad (6)$$

Où  $v$  représente la vitesse du vent,  $\alpha$  le facteur de forme et  $\beta$  le facteur d'échelle.

#### 1.1.2 Modèle de l'aérogénérateur

À partir de la vitesse du vent  $V_C$  la puissance de sortie éolienne peut être approchée par une fonction linéaire jusqu'à la valeur  $V_R$  (certaines autres modélisations considèrent l'évolution en  $v^3$  typique des turbines éoliennes). La puissance maximale  $P_R$  est atteinte lorsque la vitesse du vent varie entre  $V_R$  et la vitesse maximale  $V_F$ . À partir de  $V_F$ , le système de

conversion de l'énergie éolienne est arrêté pour des raisons de dimensionnement et de sécurité. Le modèle de la turbine utilise les paramètres suivants :  $V_C = 5$  m/s,  $V_R = 12,5$  m/s et  $V_F = 25$  m/s. L'équation (7) présente ce modèle qui lie la puissance de sortie à la vitesse du vent  $v$ .

$$P_w = \begin{cases} \left( \frac{P_R}{V_R - V_C} \right) (v - V_C) & \text{pour } V_C \leq v \leq V_R \\ P_R & \text{pour } V_R \leq v \leq V_F \end{cases} \quad (7)$$

Où  $P_R$  est la puissance maximale,  $V_C$  vitesse du vent au démarrage,  $V_R$  vitesse du vent nominale,  $V_F$  vitesse maximale.

La génération éolienne est modélisée avec un facteur de puissance de 90%. Elle est composée d'une machine asynchrone et d'un banc de condensateur en parallèle pour produire la puissance réactive. La puissance active maximale éolienne correspond à 20% de la puissance consommée par les charges [4].

### 5.3 Modèle de la charge

Les charges suivent une PDF normale donnée par l'équation (8)

$$f_{PL}(P_L) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(P_L - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (8)$$

De manière similaire, pour l'étude de la répartition de charges possibiliste la fonction d'appartenance est caractérisée par un nombre gaussien flou [2].

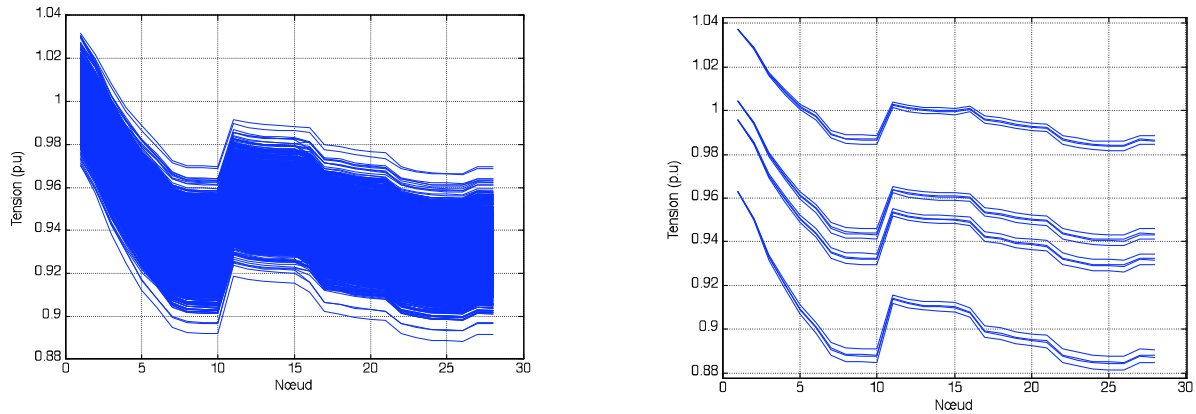
$$(9)$$

Où  $\mu$  est l'espérance mathématique et  $\sigma$  est l'écart type.

## 6. Résultats obtenus

Les paramètres d'incertitude maximum pris en compte sont : distribution de probabilité normale pour l'impédance des lignes (10%); la tension du nœud source (5%), la demande sur la charge (10%), et une distribution de probabilité Weibull pour la vitesse du vent de la production décentralisée.

Le modèle possibiliste de la génération éolienne a été transformé en une fonction d'appartenance trapézoïdale pour réaliser la répartition de charges possibiliste afin de comparer les résultats obtenus des deux méthodes présentées.



**Figure 2. Profil de tension du réseau de distribution « 28-bus test » obtenu par: (a) la méthode de MC (b) la méthode de l'arithmétique floue**

Pour les résultats obtenus par la méthode de Monte Carlo pour 1200 itérations, on constate une erreur marginale de 0,0475 pour un degré de confiance de 99,9%.

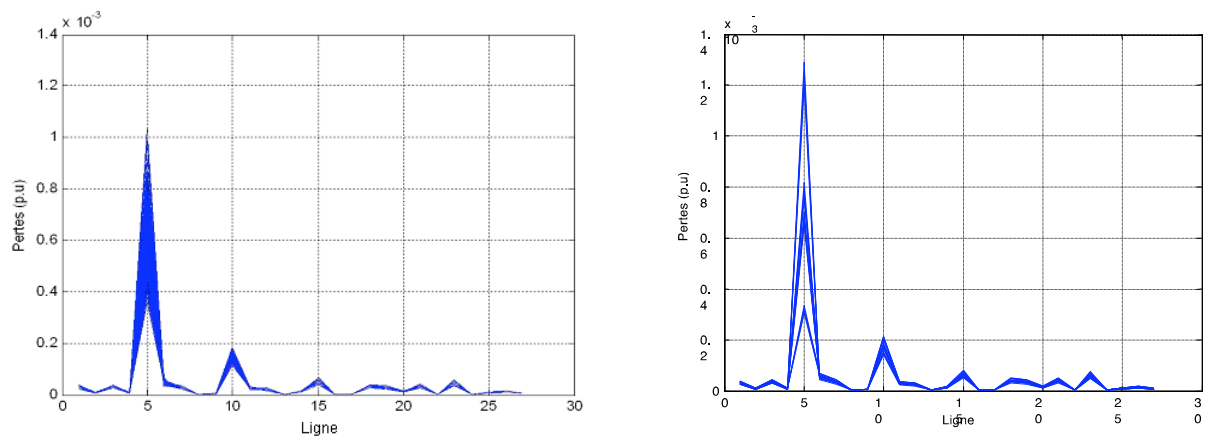


Figure 2. Profil de tension pertes « 28-bus test » obtenu par: (a) la méthode de MC (b) la méthode de l'arithmétique floue

On peut observer que la méthode de l'arithmétique floue permet d'obtenir les valeurs extrêmes de la tension et pertes de lignes sur les nœuds, étant donné que l'arithmétique floue réalise les opérations arithmétiques avec les valeurs extrêmes d'incertitude des variables d'entrée. De cette manière, la méthode de l'arithmétique floue n'a pas besoin d'itérer beaucoup pour évaluer les extrêmes : c'est une méthode plus performante au niveau du temps de calcul.

## 7. Conclusion

La méthode MC permet d'obtenir des valeurs de référence pour comparer avec de nouvelles méthodes d'analyse comme la méthode de l'arithmétique floue. Par contre, elle nécessite d'exécuter un minimum d'itérations afin d'obtenir le degré de confiance désiré et de réaliser un grand nombre des échantillonnages de tous les valeurs probables des PDFs d'entrée ; donc elle consomme plus de temps pour un réseau de grand taille.

La méthode de l'arithmétique floue (basée sur l'extension de la logique floue aux nombres flous) permet d'évaluer des incertitudes liées aux paramètres d'entrée. Elle permet d'établir les limites supérieures et inférieures des contraintes électriques du réseau de distribution dans un environnement incertain. C'est une méthode qui n'a pas besoin de se répéter pour évaluer tous les intervalles de variations d'incertitude des variables d'entrée, raison pour laquelle sur des réseaux de grande taille la méthode est plus rapide que la méthode de MC.

Dans la deuxième étape du travail de recherche, nous ferons des études d'insertion de la production décentralisée en augmentant le taux de pénétration des Energies Renouvelables et en prenant en compte le caractère incertain de la production et toutes autres incertitudes liées au réseau.

## Références

- [1] J-H, Teng. A direct approach for distribution system load flow solutions. Power Delivery, IEEE Transactions on, vol.18, no.3, pp. 882- 887, July 2003.
- [2] G.J. Klir, B. Yuan. Fuzzy Sets & Fuzzy Logic - Theory & Applications. Prentice Hall P T R Upper Saddle River, New Jersey. 1995.
- [3] H. M. Khodr , L. Ocque , J. M. Yusta, M. A. Rosa. New Load Flow Method S-E Oriented For Large Radial Distribution Networks. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 42, March 2006.
- [4] Global Wind Energy Council. Perspectives Globales de la Energía Eólica. September, 2006. p.p 5 – 24.
- [5] L. A. Zadeh. Fuzzy Sets as a Basis for a Theory of Possibility. Fuzzy Sets and Systems, Vol. 1, 1978, pp. 3-28.

### Contexte et objectifs

L'essor de la production décentralisée et la dérégulation au niveau Européen bouleverse la gestion des réseaux électriques. C'est particulièrement le cas pour la distribution (MT et BT), où se raccorde une large part de la production décentralisée. Ces réseaux ont été conçus à l'origine, pour acheminer le courant uniquement vers les consommateurs finaux. D'autre part, la production renouvelable, généralement intermittente, est incertaine car soumise aux aléas, ce qui ajoute une contrainte forte sur des réseaux qui peuvent ainsi se trouver en limites de fonctionnement. Le gestionnaire de réseau doit donc disposer de modèles stochastiques et d'algorithmes adaptés pour mieux évaluer les points de fonctionnement sur les réseaux, ainsi que leurs évolutions dans un environnement incertain.

Ce travail propose des méthodes de résolution du problème de répartition de charges, base de la planification et de l'exploitation des réseaux, en y intégrant l'incertitude de la production décentralisée et des charges. Deux méthodes sont comparées : la méthode probabiliste de Monte-Carlo et la méthode possibiliste de l'arithmétique floue.

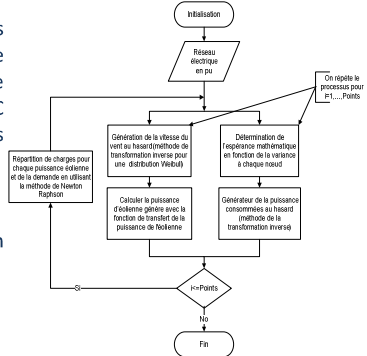
### Méthode « Monte-Carlo »

La méthode de Monte-Carlo est une simulation qui représente le comportement du système par la génération pseudo aléatoire d'un grand nombre de réalisations des variables aléatoires à partir de leurs fonctions de distribution de probabilités.

A chaque valeur de tirage des variables aléatoires, on résout de manière déterministe le calcul de répartition de charges. Le résultat de la méthode MC est la statistique de l'ensemble des résultats.

Les incertitudes prises en compte sont :

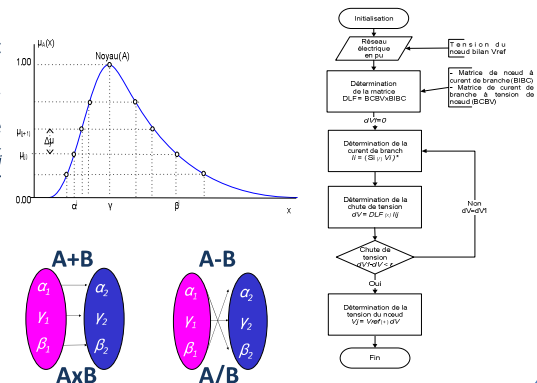
- Impédance des lignes (R, X).
- Tension au nœud source avec régulateur en charge MT (V).
- Demande sur la charge (-P, Q).
- Facteur de puissance (cos φ).
- Production décentralisée (+P, Q).



### Méthode « Arithmétique Floue »

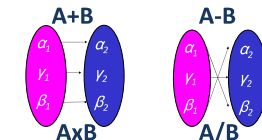
La méthode de l'arithmétique floue modélise les incertitudes par des nombres flous et implémente les opérations arithmétiques floues dans les algorithmes conventionnels.

Les nombres flous sont définis par une fonction d'appartenance  $\mu_A(x)$  qui prend en compte le degré de certitude  $\alpha_j$  compris entre 0 et 1 par chaque intervalle du nombre flou.



### Arithmétique des intervalles flous

Soit les nombres flous A et B



### Résultats par MC

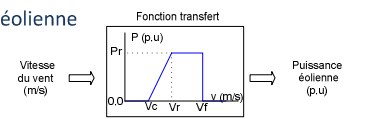
Les variables électriques ont été modélisées comme des variables aléatoires de distribution normale, avec les paramètres  $\mu$  et  $\sigma$ .

$$f_x(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

La vitesse du vent est modélisée avec une distribution Weibull, de paramètres  $\alpha$  et  $\beta$ .

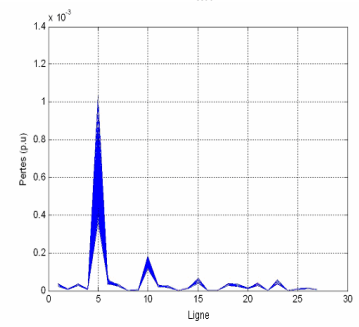
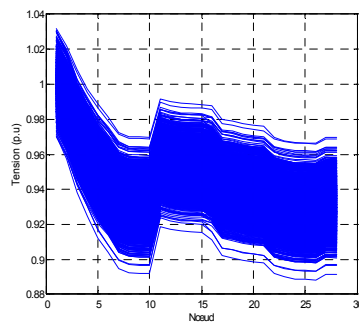
$$f_v(v) = \frac{\beta}{\alpha} \left[ \frac{v}{\beta} \right]^{\beta-1} e^{-\left(\frac{v}{\alpha}\right)^\beta}$$

La distribution de puissance éolienne produite est ensuite obtenue, en utilisant la fonction de transfert de la chaîne éolienne



### Critères de performance

Erreur marginale (e) = 0,0475 pour un degré de confiance de 99,90% avec z=3,29 et 1200 itérations (n)



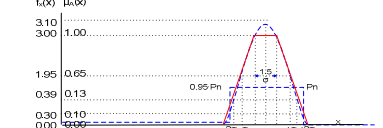
### Résultats par AF

Les variables incertaines ont été modélisées avec des fonctions d'appartenance trapézoïdales (rouge) à partir de leurs distributions de probabilités prédéfinies pour MC (bleu).

• Fonction d'appartenance des variables gaussiennes

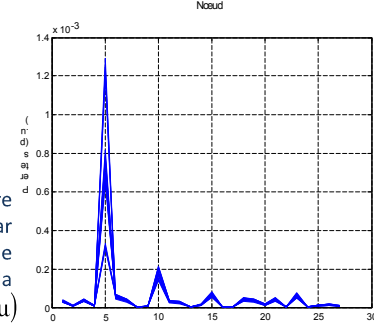
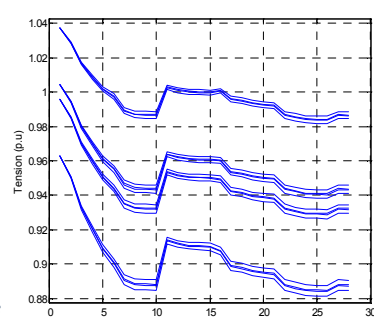


• Fonction d'appartenance de la puissance éolienne produit



### Erreur des intervalles flous

Elle provient de l'approximation linéaire pour les opérations avec des intervalles par rapport aux fonctions floues, ex: le coefficient d'estimation de l'erreur due à la multiplication :  $e_\mu = (\alpha_2 - \alpha_1)(\beta_2 - \beta_1)(\mu^2 - \mu)$



### Conclusions

Ce travail sur le calcul de la répartition de charges en présence d'incertitude permet de comparer la méthode de l'arithmétique floue et la méthode de Monte-Carlo.

**Méthode MC**  
Permet d'obtenir des valeurs de référence pour comparer à des nouvelles méthodes d'analyse. Nécessite d'exécuter un grand nombre minimum d'itérations afin d'obtenir le degré de confiance désiré. Le nombre d'itérations augmente de manière quadratique par rapport à l'erreur désirée.

**Méthode de l'arithmétique floue**  
Permet d'évaluer les bornes des contraintes électriques du réseau, d'une manière plus rapide que la méthode de MC, mais moyennant un compromis sur la précision. C'est une méthode très performante au niveau de temps de calcul et facile à implémenter.

**Perspectives**  
Ces méthodes ont été ensuite implémentées pour des calculs de courant de court-circuit, de fiabilité SAIDI et SAIFI. Cela sera complété par la suite dans des études de stabilité dynamique du réseau.