

CHAPITRE 3

MODÈLE TEMPOREL DU SYSTÈME ÉOLIEN HORS RÉSEAU

Afin d'évaluer les performances du système éolien, un modèle permettant une simulation temporelle a été développé à l'aide du logiciel Matlab/Simulink. Puisque le vent et la demande électrique ne sont pas corrélés dans le temps, l'ajout d'une batterie d'accumulateurs est nécessaire, rendant impossible une étude analytique des performances du système. Il est donc nécessaire de réaliser une simulation temporelle sur une certaine période de fonctionnement afin d'estimer les performances. Un modèle temporel est intéressant, il permet d'évaluer si un système éolien donné répond à la demande de puissance pour une certaine distribution de vent donnée. Il permet également d'étudier l'influence des différentes composantes, le rotor, l'alternateur, le type de batterie, la capacité de la batterie, la stratégie d'opération du contrôleur de charge, la ressource éolienne et la charge électrique sur les performances du système. Les modèles des différentes composantes, exposés dans les sections précédentes, ont été rassemblés afin d'en étudier l'interaction. Le logiciel Matlab/Simulink a été utilisé car il permet une approche modulaire; il est possible d'ajouter ou de modifier facilement une partie du système. Le fonctionnement général du programme de simulation sera présenté, pour ensuite enchaîner avec la description de chaque composante.

3.1 Principe général de fonctionnement

Le simulateur est divisé en 6 parties : il est composé du générateur de séries temporelles de vitesse de vent, de l'éolienne, du régulateur de charge, de la batterie d'accumulateurs, de la charge de délestage et de la charge électrique. Le schéma du système est présenté à la figure 31. Le principe de fonctionnement est simple. Une série temporelle, présentant la vitesse du vent à chaque seconde, est d'abord établie à partir de différentes caractéristiques désirées, afin de représenter les conditions d'un site donné. Une série temporelle est également établie pour la consommation électrique. À chaque pas de temps, à partir de la vitesse du vent et du niveau de voltage de la batterie à cet instant donné, la puissance de sortie de l'éolienne est calculée. Ensuite, on calcule le courant de la batterie en comparant la puissance de l'éolienne et la demande de puissance de la charge. Si l'éolienne fournit

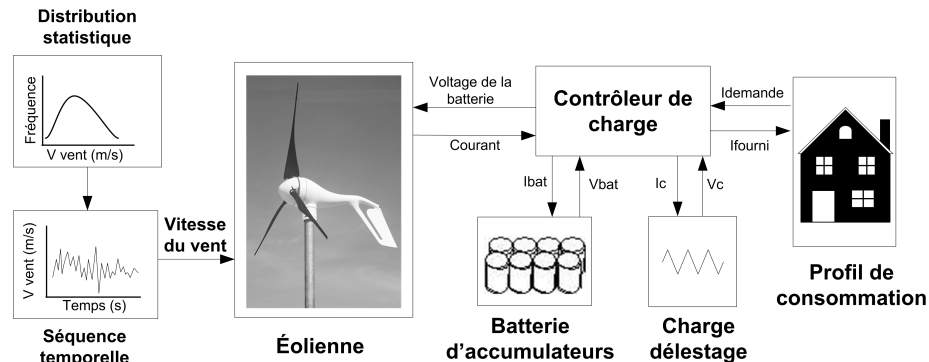


Figure 31 Schéma du programme de simulation du système éolien

davantage de puissance que n'en demande la charge, l'énergie en surplus est envoyée à la batterie, ce qui recharge la batterie. À l'inverse, si la puissance de l'éolienne ne peut répondre à la demande de la charge, c'est la batterie qui alimentera la charge, déchargeant la batterie. On peut ainsi à chaque pas de temps recalculer l'état de charge de la batterie, selon la production de l'éolienne et de la demande de la charge. Si la batterie est complètement chargée, l'éolienne est branchée à la charge de délestage afin de protéger la batterie. Si elle est complètement déchargée, la charge électrique est déconnectée, occasionnant une panne d'alimentation. Le voltage de la batterie est calculé en fonction de l'intensité du courant de charge ou de décharge et du niveau de charge. À la fin de la période de simulation, on peut par exemple avoir une mesure de la quantité d'énergie produite par l'éolienne, de la quantité d'énergie perdue dans la charge de délestage ou encore de la durée totale des interruptions de l'alimentation. On peut ainsi savoir si une éolienne donnée, avec un vent donné, parvient à répondre aux besoins énergétiques d'une charge donnée.

3.2 Génération d'une série temporelle de la vitesse du vent

Afin de simuler le comportement du système dans le temps, une séquence temporelle de vent est nécessaire. Il serait possible d'utiliser une vraie séquence de vent, mesurée sur le terrain, mais on se limiterait ainsi à cette seule séquence. Il est plus intéressant d'être en mesure de générer des séquences synthétiques de vent, ayant différentes caractéristiques, afin de représenter différents sites. Plusieurs modèles statistiques et stochastiques ont été élaborés afin de générer des séries temporelles. En génie civil, ces méthodes peuvent ser-

vir à générer de longues séquences de vent, permettant d'étudier les chargements dynamiques qu'il occasionne sur les bâtiments et les structures. En énergie éolienne, ces modèles peuvent être utilisés pour faire des prévisions sur la vitesse du vent afin d'estimer la production d'un parc éolien par exemple ou encore, comme dans notre cas, afin de faire la simulation d'éoliennes. Dans un premier temps, un résumé des caractéristiques importantes du vent sera présenté, dans le but de déterminer les différents paramètres permettant de qualifier le vent. Ensuite, une revue des différentes approches utilisées dans la littérature, pour la génération d'une série synthétique de vent, sera exposée. Puis, la méthode élaborée pour le programme de simulation sera présentée.

3.2.1 Les caractéristiques du vent

Le vent est hautement variable, à la fois géographiquement et dans le temps. Il varie d'un endroit à l'autre, d'une année à l'autre, d'une journée à l'autre, d'une seconde à l'autre. Ces fluctuations étant influencées par le déplacement des masses d'air en altitude, mais également par le relief, le type de recouvrement du sol et la stabilité thermique de l'atmosphère. Le vent varie en direction et en intensité, mais pour les besoins du modèle, on se limite à l'étude de la variation du vent en intensité, dans une seule direction. Les caractéristiques du vent seront présentées afin de déterminer comment reproduire par la suite une séquence valable et représentative de vents réels.

3.2.1.1 Vitesse moyenne et distribution statistique

Afin d'analyser le potentiel éolien d'un site, on peut utiliser la vitesse moyenne du vent, mais il est plus intéressant de présenter la distribution des vitesses de vent. Le plus souvent, on utilise des mesures de vent prises à la seconde, pendant 1 mois, que l'on moyenne sur des périodes de 10 minutes ou d'une heure. On divise ensuite la plage de vitesse en intervalles de 0.5 m/s et on fait le compte du nombre de valeurs moyennes pour chaque intervalle. On présente ensuite ces données sous forme d'histogramme et on évalue quelle distribution statistique peut représenter le vent observé. Cette méthode statistique fournit davantage d'information que l'utilisation de la valeur moyenne uniquement. Elle permet de présenter avec une fonction de distribution statistique la répartition des vitesses de vent et de comparer différents sites entre eux ou encore d'estimer la production énergétique

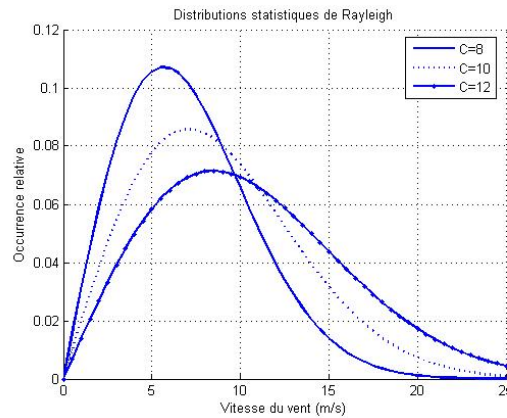


Figure 32 Distributions statistiques de Rayleigh ($k=2$) ayant différents facteurs d'échelle

d'une éolienne pour un site donné. La distribution statistique la plus utilisée pour présenter la distribution du vent sur une longue période est la distribution de Weibull (équation (3.1)). La distribution de Weibull est une distribution qui a deux paramètres, un paramètre de forme c et un paramètre d'échelle k . Elle offre ainsi plus de flexibilité pour représenter la distribution du vent d'un site spécifique que la distribution normale, d'autant plus qu'il apparaît que la distribution du vent n'est pas symétrique, comme la distribution normale, mais présente généralement davantage de vents faibles que de vents forts. La distribution de Rayleigh, une distribution particulière de Weibull avec $k = 2$, est fréquemment utilisée. Elle n'a ainsi qu'un seul paramètre, soit le facteur d'échelle. La figure 32 présente différentes distributions de Rayleigh ayant différents facteurs d'échelle.

$$p(U) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{U}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right] \quad (3.1)$$

3.2.1.2 Variations cycliques temporelles

Pour un même endroit, les vitesses moyennes horaires, journalières, annuelles et même décennales peuvent varier d'une période à l'autre. Les météorologistes se basent généralement sur trente années de mesures afin de conclure sur le climat d'une région [8]. Cependant, il a été avancé qu'on peut se baser statistiquement sur les mesures d'une seule

année et obtenir des résultats ayant une précision de 10%, et un niveau de confiance de 90% [8]. À une échelle de temps plus petite que l'année, les variations saisonnières sont mieux connues et plus prévisibles [11], mais pour des périodes plus courtes, les variations restent difficiles à prévoir plus que quelques jours à l'avance, étant reliées aux passages des systèmes météorologiques. À l'échelle de la journée, on retrouve bien souvent un cycle diurne, correspondant à la variation régulière du vent d'une journée à l'autre. Elle est occasionnée par la différence de température entre le jour et la nuit.

On peut ainsi diviser la variation de la vitesse du vent dans le temps en cinq catégories :

- a. inter-annuelle;
- b. annuelle ou saisonnière;
- c. synoptique;
- d. diurne ou journalière;
- e. court terme, coup de vent et turbulence.

Van der Hoven [11] a présenté la densité spectrale du vent, calculée à partir d'enregistrements à court et long terme (figure 33). On peut voir clairement trois composantes cycliques, ayant trois périodes bien distinctes : le sommet turbulent, le sommet diurne et le sommet synoptique. La figure montre qu'il y a peu d'énergie entre le cycle diurne et le sommet turbulent, signifiant que le cycle diurne peut être traité de façon indépendante des fluctuations de turbulence.

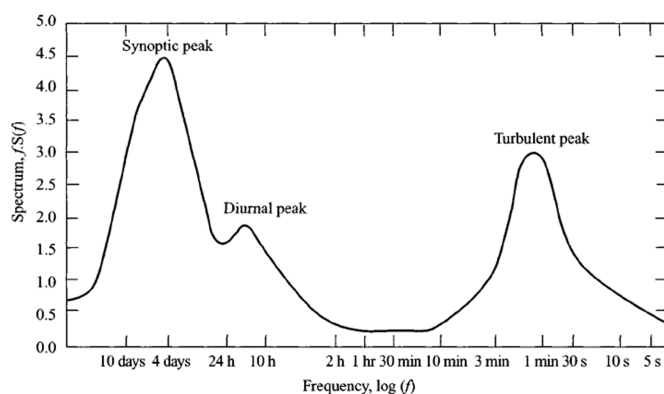


Figure 33 Contenu fréquentiel du vent. Source [11]

3.2.1.3 Turbulence

Les mesures de vent sont généralement faites à la seconde et sont moyennées ensuite sur des périodes de 10 minutes. Ces variations de vent, en deçà d'une période de 10 minutes, ont un caractère stochastique et sont appelées "turbulence". Ces variations, de courtes périodes, doivent être considérées lors de la conception des éoliennes afin de calculer les charges dynamiques; nécessaires pour les prédictions en fatigue, le contrôle de l'éolienne et l'étude de la qualité de l'onde.

La turbulence, c'est-à-dire la vitesse du vent sur une courte période de temps, est définie par :

- a. une intensité de turbulence;
- b. une distribution statistique;
- c. une autocorrélation;
- d. une longueur de turbulence;
- e. une densité spectrale.

Distribution statistique et intensité de turbulence :

Le vent peut être décomposé en trois composantes; les composantes longitudinales, latérales et verticales. La composante longitudinale étant dans la direction principale de propagation. Chaque composante peut être vue comme étant constituée d'une valeur moyenne U et d'une valeur aléatoire \tilde{u} normalement distribuée autour de 0. La turbulence peut être ainsi vue comme une variation aléatoire autour d'une valeur moyenne. La distribution statistique qui représente le mieux le comportement de la turbulence est donc la distribution normale.

$$u = U + \tilde{u} \quad (3.2)$$

Où u représente la valeur instantanée du vent dans la direction longitudinale.

La mesure du vent ne se fait pas en continu, il s'agit plutôt d'un échantillonnage, fait à une certaine fréquence, généralement à la seconde. On calcule ensuite la valeur moyenne des

échantillons sur une période plus longue que la longueur caractéristique des fluctuations de la turbulence, sur des périodes d'une heure tout au plus. En énergie éolienne, on calcule les moyennes sur des périodes de 10 minutes par convention [8].

$$U = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i \quad (3.3)$$

Où N est le nombre de mesures prises au cours de la période et u_i est la lecture instantanée de la vitesse du vent.

L'intensité de turbulence, IT , est définie comme le ratio de l'écart type sur la valeur moyenne. Plus les mesures sont dispersées autour de la valeur moyenne, plus le vent est considérée comme étant turbulent.

$$IT = \frac{\sigma}{U} \quad (3.4)$$

Où σ est l'écart type, donné pour un échantillonnage par :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (u_i - U)^2} \quad (3.5)$$

Généralement, l'intensité de turbulence varie entre 0.1 et 0.4 [8]. Les valeurs élevées d'intensité de turbulence sont le plus souvent observées à de basses vitesses moyennes. L'intensité de turbulence varie en fonction de la topographie du terrain, du type de recouvrement du sol et la stabilité thermique.

L'autocorrélation :

Une distribution statistique donne la probabilité de retrouver les différentes vitesses de vent, sur une certaine période, mais ne fournit aucune indication quant à la structure temporelle du vent. Si on connaît le vent à un temps donné, en partant seulement de la distribution statistique, on n'a aucune indication sur la vitesse que le vent aura à l'instant suivant.

En réalité, la vitesse du vent, d'un instant à l'autre, n'est pas complètement indépendante. Intuitivement, si le vent a une vitesse de 6 m/s à un instant donné, à l'instant suivant, il risque fort d'être près de 6 m/s. Ceci s'appelle "la persistance". La mesure de la persistance est donnée par la fonction d'autocorrélation, qui est la corrélation d'une série temporelle avec elle-même, mais décalée dans le temps. La fonction d'autocorrélation mesure ainsi l'effet d'instant passés sur les instants futurs. Elle permet d'évaluer la persistance d'une onde sur toute la série et d'identifier ainsi, par exemple, les cycles diurnes ou annuels. En considérant que la variance et la valeur moyenne sont constantes sur la période, l'autocorrélation pour une série échantillonnée (ou discrète) est donnée par la multiplication de chaque terme de la série, auxquelles ont été retranchées la valeur moyenne, par ces mêmes valeurs, mais décalé d'un instant r . La somme est ensuite calculée et divisée par la variance et le nombre d'élément, moins le décalage, afin de normaliser. Le calcul est répété pour plusieurs décalages r , où $r = (1, 2, 3, \dots, N)$, afin d'obtenir la fonction d'autocorrélation.

$$R(r\Delta t) = \frac{1}{\sigma^2(N-r)} \sum_{i=1}^{N-r} u_i u_{i+r} \quad (3.6)$$

La fonction d'autocorrélation varie entre -1 et 1. Une autocorrélation de 1 signifiant que le signal est identique, ou il n'y a pas de décalage, -1 donne un signal identique, mais inversé et 0 indique qu'il n'y a plus de persistance. En d'autres mots, deux vitesses de vent séparées par un intervalle de temps ne donnant plus de corrélation sont complètement indépendantes et suivent un processus aléatoire.

Une mesure du temps moyen durant lequel la variation de la vitesse du vent est corrélée est donnée par l'intégrale de la fonction d'autocorrélation de 0 décalage jusqu'à l'instant où il n'y a plus de corrélation. Si on multiplie ensuite le résultat par la vitesse moyenne, on obtient la longueur de turbulence. Cette mesure donne la distance sur le terrain de la limite de corrélation.

Densité spectrale :

Il peut être intéressant de décomposer une séquence de vent afin d'observer l'amplitude de ses différentes composantes fréquentielles. Pour un signal continu, cette information

est donnée par sa densité spectrale. Une connaissance du contenu fréquentiel permet, par exemple, de déterminer si une des composantes fréquentielles du signal a suffisamment d'énergie pour faire entrer en résonance une structure donnée. Ou encore, les spectres de puissance peuvent être utilisés pour conduire des études sur la résistance de la structure en fatigue. Lorsque le spectre de densité de puissance du vent, pour un site donné, n'est pas disponible, on utilise le plus souvent le spectre de von Karman et de Kaimal [11]. Le spectre de Kaimal est une bonne représentation de la densité spectrale de la turbulence dans la couche limite de surface. Il est donné par :

$$f(\varpi) = \frac{\sigma^2 * 4L/\bar{U}}{(1 + 6\varpi L/\bar{U})^{5/3}} \quad (3.7)$$

Le spectre de von Karman représenterait mieux la turbulence du vent en soufflerie [11], il est donné :

$$f(\varpi) = \frac{\sigma^2 * 4L/\bar{U}}{(1 + 70.8(\varpi L/\bar{U})^2)^{5/6}} \quad (3.8)$$

Où ϖ est la fréquence, \bar{U} la vitesse moyenne, σ^2 la variance et L l'échelle de longueur de turbulence.

3.2.2 Revue des différentes méthodes utilisées pour générer une série temporelle

Plusieurs modèles probabilistes et stochastiques ont été proposés afin de générer une série synthétique de vent. La génération peut être vue comme un processus aléatoire, mais pas complètement. Car, on désire que la série générée ait certaines caractéristiques bien précises, afin d'obtenir une série réaliste et représentative d'une vraie séquence de vent. On a vu que plusieurs paramètres permettent de caractériser un vent; la distribution statistique, la présence d'effets cycliques de différentes périodes, l'autocorrélation, l'intensité de turbulence et la densité spectrale.

L'objectif est donc d'obtenir un modèle mathématique permettant de générer une séquence de vent ayant les caractéristiques désirées. Il existe plusieurs méthodes pour générer et

analyser une série temporelle et plusieurs ouvrages en font la synthèse [23, 24, 25]. Les principales méthodes ayant été utilisées en génie civil, mécanique ou éolien, pour générer une série temporelle de vent sont les suivantes :

- a. variable aléatoire indépendante;
- b. auto-regressifs (AR);
- c. auto-regressifs à moyenne mobile (ARMA ou Box-Jenkins);
- d. chaîne de Markov;
- e. transformée de Fourier inverse (méthode de Shinozuka);
- f. méthode des ondelettes (wavelets);
- g. systèmes experts, réseaux de neurones et logique floue.

En général, les modèles proposés nécessitent l'analyse d'une vraie séquence de vent afin de déterminer les valeurs de différents paramètres entrant dans le modèle mathématique. Ceci permet ensuite de générer des séquences synthétiques ayant les mêmes caractéristiques que la série mesurée. Certaines méthodes parviennent mieux que d'autres à retrouver, dans la série synthétique, les caractéristiques de la vraie série de mesure de vitesse de vent. Les principales méthodes de génération synthétique seront brièvement explicitées.

3.2.2.1 Variable aléatoire indépendante

Il est possible d'utiliser une fonction d'une variable aléatoire continue et générer une série dont les termes, si le nombre est suffisamment important, auront la distribution statistique désirée. La série aura ainsi une distribution statistique convenable, une distribution normale pour une courte période de temps ou une distribution de Weibull sur une plus longue période, mais ne présentera aucune structure temporelle cohérente, aucune autocorrélation. Chaque vitesse étant indépendante de la précédente. Une telle méthode peut être utile pour certains calculs, pour estimer les vents que devra supporter une construction par exemple, mais est inadéquate pour générer une série où il est important de considérer la progression dans le temps. Aksoy et al. [26] et Kaminsky et al.[27] présentent cette méthode pour générer le vent turbulent et pour générer les moyennes horaires.

3.2.2.2 Modèle autorégressif (AR)

Le modèle autorégressif se sert d'une ou plusieurs valeurs précédentes de la série de vitesse de vent pour établir la valeur suivante X_t au temps t . Le nombre de valeurs précédentes n donne l'ordre du modèle. La vitesse du vent est vue comme étant composée d'une partie des vitesses précédentes à laquelle on ajoute un terme aléatoire, ayant une distribution normale avec 0 de moyenne (bruit blanc ou distribution Gaussienne). Il s'agit donc d'une méthode statistique extrapolant les états du passé immédiat pour faire une prévision à court terme. La séquence générée est aléatoire, mais inclue ainsi une corrélation temporelle.

$$X_t = \phi_1 X_{t-1} + \phi_2 X_{t-2} + \dots + \phi_n X_{t-n} + Z_t \quad (3.9)$$

Où X_{t-n} est la vitesse du vent au temps $t - n$, n est l'ordre du modèle et Z_t est un nombre aléatoire ayant une distribution Gaussienne. Les paramètres autorégressifs ϕ_n sont déterminés afin d'obtenir une fonction d'autocorrélation désirée. Un modèle d'ordre 4 a été utilisé par Baran et Infield [28] pour simuler un vent turbulent et Nfaoui et al. [29] ont utilisé un modèle d'ordre 2 pour générer un vent horaire.

La série obtenue aura une distribution statistique normale. Ce qui est convenable pour une courte série représentant le vent turbulent (<10 minutes), mais inadéquat pour une séquence sur une plus longue période. Les coefficients du modèle et l'ordre du modèle sont déterminés afin d'obtenir la fonction d'autocorrélation désirée. Plus l'ordre est élevé, plus la structure temporelle sera préservée. La procédure pour déterminer la valeurs des coefficients d'autorégression et l'ordre est bien documentée [23, 25]. Pour déterminer les valeurs des coefficients d'autocorrélation, on peut se baser sur une série temporelle réellement mesurée, sur une fonction d'autocorrélation désirée ou encore sur la densité spectrale désirée, puisque la transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation donne la densité spectrale. De plus, on doit s'assurer que la série converge. Baran et Infield [28] développent les équations pour un modèle AR(4) dont la série finale a la densité spectrale de Kaimal. Il obtient de bons résultats, mais ce n'est valable que pour des séries de courtes périodes, car les coefficients du modèle AR sont définis pour une vitesse moyenne donnée,

puisque la fonction de densité spectrale de Kaimal change selon la vitesse moyenne. Pour une longue période, il faudrait recalculer périodiquement les paramètres autorégressifs du modèle.

La méthode est donc intéressante pour générer de courtes périodes, ayant une distribution normale et une période d'autocorrélation assez courtes. Pour de longues périodes, la série générée ne présentera pas de cycle diurne. La méthode est utilisée et comparée à d'autres par Kaminsky et al. [27] et Aksoy et al. [26].

3.2.2.3 Auto-regressifs à moyenne mobile (ARMA ou Box-Jenkins)

Un autre modèle fréquemment utilisé est le modèle autorégressif à moyenne mobile (ARMA) développé par Box et al.[25]. Cette méthode est semblable à la précédente mais avec l'ajout de la sommation des chiffres aléatoires ajoutés aux états précédents. La nouvelle vitesse est une sommation de fraction des vitesses passées, mais également de fraction des nombres générés aléatoirement lors des estimations précédentes. Le modèle ARMA(m,n) utilise n vitesses précédentes et m valeurs aléatoires.

$$X_t = \phi_1 X_{t-1} + \phi_2 X_{t-2} + \dots + \phi_p X_{t-n} + Z_t + \beta_1 Z_{t-1} + \dots + \beta_m Z_{t-m} \quad (3.10)$$

Où X_{t-p} est la vitesse du vent au temps $t - p$, m et n sont reliés à l'ordre du modèle et Z_{t-p} est un nombre aléatoire ayant une distribution Gaussienne générée au temps $t - p$. Les paramètres autorégressifs ϕ_i sont déterminés afin d'obtenir une fonction d'autocorrélation désirée. Déterminer l'ordre du modèle est difficile. Mais Box et al. [25] proposent une démarche empirique afin de déterminer l'ordre du modèle. Il a été démontré qu'une série stationnaire stochastique peut être approximée par un modèle ARMA de l'ordre (m, m-1). Billinton et al.[30] montrent comment l'ordre du modèle ainsi que la valeur des coefficients autorégressifs varient selon le site simulé.

Selon l'ordre du modèle, la série générée présente une meilleure autocorrélation que le modèle autorégressif simple, mais la distribution statistique pour une longue période est inadéquate. Billinton et al.[30] arrivent à conserver un cycle diurne avec un modèle

ARMA(3,2), mais pas Kamal et Jafri [31]. Kaminsky et al. [27] utilisent et comparent également la méthode, pour conclure que l'autocorrélation est insuffisante.

3.2.2.4 Chaîne de Markov

Afin de générer une série synthétique de vent, de nombreuses études utilisent la chaîne de Markov [27, 32, 33, 26, 29]. Des ouvrages généraux décrivent également la méthode [34]. Elle ne sera donc qu'explicitée brièvement ici. Cette méthode utilise une matrice de probabilité de transition élaborée à partir d'une séquence de vent mesurée sur le terrain. Les éléments p_{ij} de la matrice sont définis comme étant la probabilité que le vent passe à la vitesse j si sa vitesse actuelle est i . Il s'agit donc d'un procédé stochastique paramétrisé avec une séquence empirique. La procédure pour générer la matrice de transition et pour en faire ensuite l'utilisation est expliquée par Shamshad et al.[32]. On peut également utiliser une chaîne d'ordre deux, en utilisant deux matrices de transition afin de tenir compte des deux états précédents pour générer l'état suivant. On peut utiliser un ordre plus élevé, mais les matrices deviennent rapidement de trop grandes dimensions. Avec la chaîne de Markov, on arrive à retrouver la distribution statistique des données utilisées pour faire la table de transition. On peut donc obtenir une distribution de Weibull à partir de vitesses moyennées à l'heure ou au dix minutes [32]. Plus l'ordre de la chaîne est élevé, plus l'autocorrélation se rapprochera de l'autocorrélation de la série réelle de vent. Il n'est cependant pas possible de retenir les effets de basse fréquence, comme le cycle diurne ou saisonnier. De plus, la méthode demande l'utilisation d'une vraie séquence mesurée, qui n'est parfois pas disponible. Il ne s'agit donc pas d'une méthode toujours accessible.

Kaminsky et al. [35] utilisent cette technique pour générer des éléments manquants d'une série temporelle. Il analyse les mesures figurant dans la série pour créer la matrice de transition, puis génère aléatoirement les valeurs manquantes en se servant de cette matrice de transition.

3.2.2.5 Méthode de Shinosuka

La méthode Shinosuka utilise la transformée de Fourier inverse discrète afin de générer la série temporelle. Elle permet de générer une série temporelle ayant une densité spectrale désirée; partant du principe que l'on peut reconstruire un signal à partir d'une sommation

de sinusoides de différentes amplitudes, fréquences et déphasage. À partir de la longueur de la série à générer et de la densité spectrale visée, le plus souvent celle de von Karman ou Kaimal, on détermine le nombre de sinusoides nécessaires, ainsi que l'amplitude et la fréquence de chacune. La phase est donnée aléatoirement, donnant le caractère stochastique à la série générée. Puisque l'on a une approximation discrète d'un spectre continu, le signal généré sera périodique et sa densité spectrale présentera des sauts. Plus le nombre de sinusoides sera important, plus la période du signal sera longue et moins les oscillations dans le spectre de fréquence seront importantes. Pour une longue série, le nombre de sinusoides nécessaires pour éviter la périodicité du signal devient important rapidement, ce qui constitue le principal inconvénient de la méthode. Cependant, elle permet d'obtenir la densité spectrale ainsi que l'autocorrélation désirée. Pour générer une série temporelle de 10 minutes, échantillonnée à la seconde, la méthode demande la sommation d'au moins 600 sinusoides. De plus, puisque la série générée n'est qu'à la seconde, elle ne peut présenter les fréquences ayant une période plus courte que deux secondes, selon le théorème de Nyquist. Limitant ainsi le contenu fréquentiel à 0.5 Hz et moins. Des études dynamiques à des fréquences plus élevées demanderaient que la série ait une période plus courte, ce qui augmenterait le nombre de sinusoides à sommer. La distribution de la série obtenue est une distribution normale, dont la moyenne et la variance sont déterminées par le choix de la densité spectrale cible. Jeffries [36] et Kaminsky [27] détaillent et comparent la méthode.

3.2.2.6 Ondelettes (Wavelet)

La méthode des ondelettes (wavelet) a été utilisée et comparée à d'autres méthodes par Aksoy et al. [26] afin de générer une série temporelle de vent sur une longue période, donnant la vitesse moyenne du vent à chaque heure. Cette méthode consiste à faire la corrélation entre un signal, dans notre cas, le vent mesuré sur un site, et un signal variant en amplitude et en fréquence afin de pouvoir analyser l'importance de différentes composantes fréquentielles. Avec ce qui a été mesuré, on peut générer une série aléatoire. Cette méthode s'est avérée la plus efficace pour représenter l'autocorrélation du vent. Elle permet de prendre en compte les cycles diurnes du vent. Toutefois, la série générée ne peut avoir qu'une distribution symétrique : obtenir une distribution de Weibull est donc impossible. Cette méthode peut être adéquate pour certaines applications, pour des études

structurelles de génie civil par exemple, mais pour l'estimation de la production énergétique d'une éolienne, ceci constitue un inconvénient important.

3.2.3 Méthode développée pour générer une série synthétique de vent

Pour notre simulation du système éolien, nous nécessitons une série temporelle de l'intensité de la vitesse du vent, dans la direction principale de propagation. La série doit comporter les caractéristiques suivantes :

- a. être établie pour une longue période de temps, 1 mois ou plus;
- b. avoir une distribution de Weibull pour les valeurs moyennes aux 10 minutes;
- c. présenter une autocorrélation adéquate;
- d. présenter des cycles diurnes et saisonniers;
- e. fournir l'intensité du vent à chaque seconde;
- f. avoir une distribution normale sur de courtes périodes de temps (<10 minutes);
- g. présenter une intensité de turbulence donnée.

Aucune des méthodes présentées dans la section précédentes ne peut permettre d'obtenir directement une série ayant toutes ces caractéristiques. Par exemple, certaines méthodes peuvent permettre d'obtenir la distribution statistique désirée, mais pas la fonction d'autocorrélation. De plus, la plupart de ces méthodes demande d'avoir à la disposition une série temporelle de mesures, afin de déterminer les différents paramètres du modèle. La méthode développée doit se baser sur un minimum d'information, pour ainsi avoir davantage de flexibilité et permettre de simuler des vents représentant différents sites. On doit pouvoir générer rapidement une série réaliste, comportant différentes caractéristiques bien précises. La méthode élaborée se base sur les paramètres suivants :

- a. paramètres de forme et d'échelle de la distribution de Weibull désirée, pour les valeurs moyennes aux 10 minutes, pour un mois de données;
- b. degré d'autocorrélation désiré;
- c. intensité relative du cycle diurne;

d. intensité de turbulence désirée.

La méthode procède en deux temps. Tout d'abord, une première série temporelle est générée, pour une période d'un mois, représentant les valeurs moyennes de la vitesse du vent aux 10 minutes. Ce qui permet de prendre en considération les caractéristiques du vent sur une longue période; distribution de Weibull, autocorrélation et cycle diurne. Dans un deuxième temps, à partir de la série générée précédemment, une seconde série fournissant la vitesse du vent à la seconde est générée. Celle-ci ayant une autocorrélation donnée et une distribution normale sur chaque période de 10 minutes, permettant de représenter la turbulence.

3.2.3.1 Générer la série temporelle aux dix minutes

Dans un premier temps, on génère une série temporelle représentant l'intensité du vent aux 10 minutes. La méthode comporte les étapes suivantes :

- a. générer une séquence aléatoire avec un modèle autorégressif d'ordre 1;
- b. ajouter la composante cyclique diurne;
- c. modifier les éléments de la série afin d'obtenir la distribution de Weibull désirée.

Le modèle autorégressif a été utilisé pour générer la série temporelle. Les modèles nécessitant l'usage d'une série réellement mesurée ont été exclus. On utilise le modèle AR d'ordre 1, avoir un ordre supérieur est inutile puisque l'on ne dispose pas d'une vraie série pour calibrer le modèle. Pour un ordre 1, avec $n=1$, à partir de l'équation (3.9) on obtient :

$$X_t = \phi X_{t-1} + Z_t \quad (3.11)$$

La variable ϕ est le coefficient d'autocorrélation, il s'agit d'un paramètre du modèle compris entre 0 et 1. Avec $\phi = 0$, on obtient une série complètement aléatoire, ne présentant aucune structure temporelle et $\phi = 1$ indique que la vitesse suivante est constituée de la vitesse précédente plus un terme aléatoire, portant le nom de "marche aléatoire" (random walk). La variable Z_t est une variable indépendante aléatoire, générée à chaque pas de

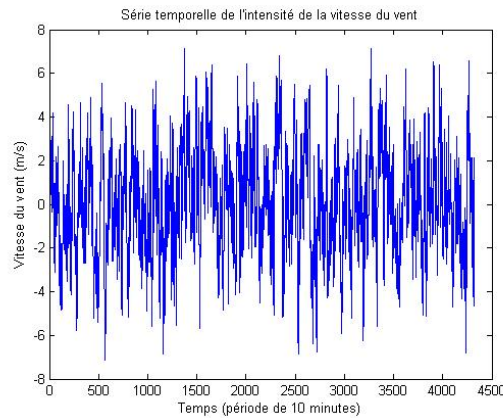


Figure 34 Première série temporelle présentant la vitesse du vent aux dix minutes, sur une période d'un mois, avec $\phi = 0.9$

temps, ayant une distribution normale centrée à zéro et une variance de 1. La série débute avec une vitesse de initiale de 0. La série ainsi générée X a une distribution normale avec zéro de moyenne et une fonction d'autocorrélation Ac donnée par :

$$Ac(r) = \phi^r \quad (3.12)$$

Où r est la période de décalage et ϕ est le coefficient d'autocorrélation [23]. Il s'agit d'une fonction exponentielle décroissante; plus le coefficient d'autocorrélation tend vers 0, plus la fonction décroît rapidement. La série générée présentera ainsi une structure temporelle plus ou moins persistante selon la valeur du coefficient d'autocorrélation, mais ne pourra présenter d'effet cyclique, comme le cycle diurne. La valeur du coefficient d'autocorrélation constitue un paramètre du générateur de séries synthétiques de vent. La figure 34 présente cette première série temporelle, avec $\phi = 0.9$. La figure 35 présente la fonction d'autocorrélation obtenue.

L'étape suivante consiste à ajouter à la première série une composante cyclique afin de prendre en considération le cycle diurne. On ajoute une sinusoïde ayant une période de 24 heures et un certain déphasage permettant d'obtenir le maximum du cycle à l'heure désirée. L'amplitude de la sinusoïde est un paramètre du modèle et donne l'importance

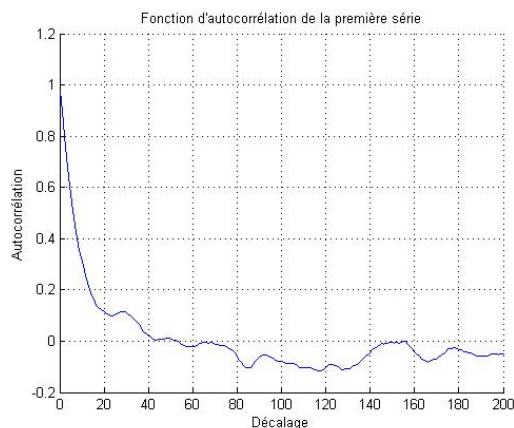


Figure 35 Fonction d'autocorrélation de la première série temporelle présentant la vitesse du vent aux dix minutes, sur une période d'un mois, avec $\phi = 0.9$

du cycle diurne dans la série. Un second paramètre est l'heure de la journée à laquelle on désire avoir le maximum du cycle. Une simple sinusoïde est utilisée, mais une autre fonction pourrait être utilisée afin de représenter le cycle diurne avec plus de justesse.

La série ainsi obtenue présente une structure temporelle adéquate, mais a cependant une distribution normale, centrée autour de zéro. On procède alors à une transformation statistique afin d'obtenir une série ayant la distribution de Weibull désirée. Pour ce faire, on calcule la fonction de distribution cumulée (FDC) de la série générée précédemment et la FDC de la distribution de Weibull désirée (avec par exemple $k=2$, $C=10$), figure 36. On fait ensuite la correspondance entre les deux FDC afin de modifier chacun des éléments de la série temporelle. Par exemple, on prend une valeur de la série, disons que l'on a une vitesse de 0 m/s, on vérifie sur la FDC de la normale sa fréquence, on obtient environ 58%, on regarde ensuite sur la FDC de Weibull à quelle vitesse correspond une fréquence de 58% et on lit 9 m/s. On doit alors modifier toutes les vitesses de 0 m/s de la série en des vitesses de 9 m/s. En effectuant la transformation pour tous les éléments de la première série, on obtient une seconde série ayant la distribution de Weibull désirée. La figure 37 présente la série temporelle résultante, la figure 38 sa distribution statistique et la figure 39 la fonction d'autocorrélation obtenue. Pour générer une série présentant les variations saisonnières, on peut générer 12 séries, une pour chaque mois de l'année, ayant des paramètres différents de forme, d'échelle et d'autocorrélation.

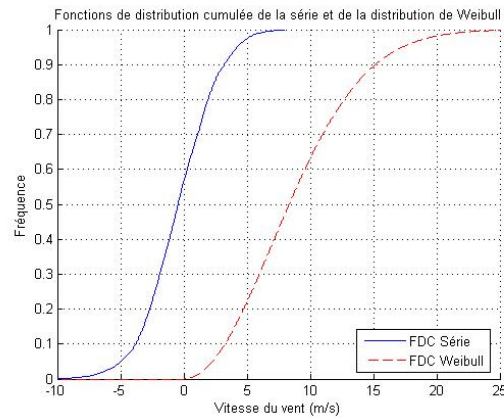


Figure 36 Fonctions de distribution cumulée de la première série générée et de la distribution de Weibull désirée ($k=2$, $C=10$)

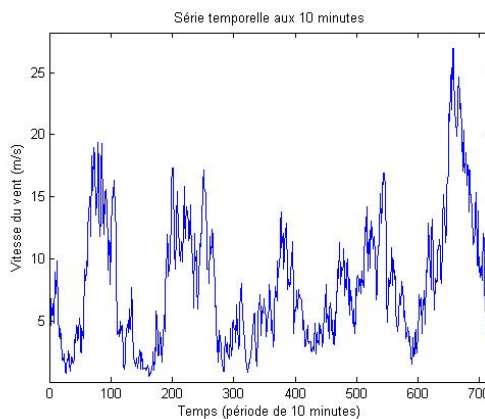


Figure 37 Série temporelle résultante, avec $k = 2$, $C = 10$, $\phi = 0.9$ et un cycle diurne d'intensité 1 à 14h, la série présente l'intensité du vent pendant 5 jours

3.2.3.2 Série temporelle à la seconde

La série générée obtenue présente la distribution statistique désirée et une autocorrélation adéquate pour des vents aux dix minutes. On veut maintenant générer une seconde série temporelle représentant la turbulence à partir de la première série. Ainsi, pour chaque vitesse de la série précédente, correspondant à la vitesse moyenne sur une période de 10 minutes, une nouvelle série de 600 points est générée. Comme précédemment, la première

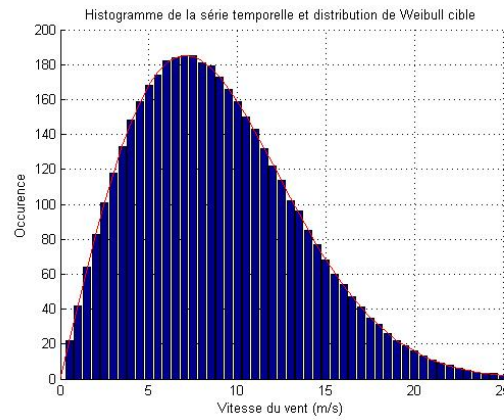


Figure 38 Histogramme de la série temporelle générée et de la distribution de Weibull cible

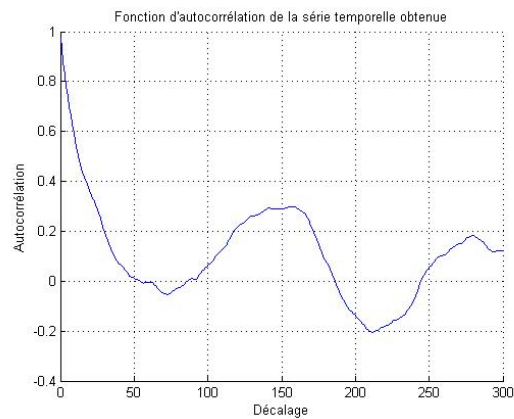


Figure 39 Fonction d'autocorrélation de la série temporelle obtenue

étape consiste à générer une série avec une fonction d'autorégression d'ordre 1, ayant un coefficient d'autocorrélation fourni en paramètre. La série de 600 points est ensuite modifiée afin qu'elle ait une distribution ayant comme valeur moyenne, la valeur de la première série, pour cet intervalle de temps et un écart-type donné par l'intensité de turbulence désirée.

$$\sigma = IT * U \quad (3.13)$$

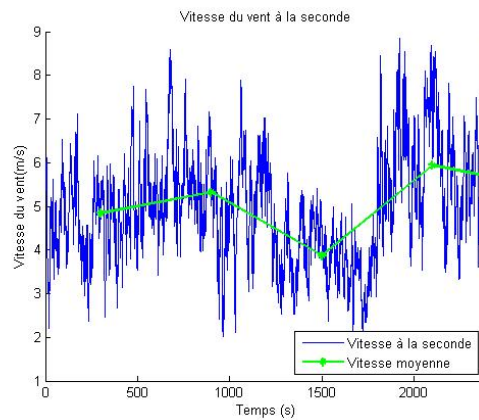


Figure 40 Série temporelle de la vitesse du vent à chaque seconde, présentant 40 minutes de vent

Où σ est l'écart type de la distribution normale sur une période de 10 minutes, IT est l'intensité de turbulence désirée et U est la vitesse moyenne sur cette période, correspondant à une valeur de la première série. Ensuite, afin de normaliser et dénormaliser la série, on a la transformation statistique suivante, où Z est la série normalisée de moyenne 0 et d'écart type de 1, X est la série de moyenne U et d'écart type σ .

$$Z = \frac{X - \sigma}{U} \quad (3.14)$$

En générant une série de 600 secondes pour chacune des valeurs de la première série, on obtient une série de 1 mois donnant la vitesse du vent à chaque seconde. La série a ainsi la distribution et l'autocorrélation désirées et représente également la turbulence de façon satisfaisante. Pour plus de précision, avec une série ayant un pas de temps plus court que la seconde, on pourrait utiliser la méthode de Shinosuka afin d'obtenir une série ayant la densité spectrale désirée, celle de von Karman ou de Kaimal par exemple. Pour un pas de temps d'une seconde, la méthode utilisée représente suffisamment bien le vent sur de courtes et de longues périodes de temps. La figure 40 montre une série de 40 minutes, générée à la seconde. Il y est également présenté les valeurs de la première série, donnant la vitesse moyenne sur 10 minutes.

3.3 Le système éolien

3.3.1 L'éolienne

Le schéma complet du programme de simulation du système éolien, élaboré sous Simulink, est présenté à la figure 41. Simulink a une approche graphique modulaire, permettant de travailler chaque composante indépendamment les unes des autres, en les reliant seulement par les variables d'intérêt. Chaque bloc que l'on peut voir sur le schéma est ainsi constitué d'autres composantes. Simulink dispose d'une librairie qui inclut déjà des modèles de génératrices (SimPowerSystems). Cette librairie utilise des modèles complexes pour les alternateurs et l'électronique de puissance alors nécessaire. Le modèle de l'alternateur, par exemple, fait la lecture des trois phases de courant et calcule à chaque pas de temps la transformée de Park, telle que présentée à la section 1.3.6. Les simulations réalisées avec ces modèles demandent ainsi beaucoup de temps de calcul, servant alors principalement à observer des phénomènes transitoires de courtes durées. Afin d'étudier les performances de l'éolienne sur une longue période, deux autres approches ont alors été développées en utilisant les équations simplifiées, représentant le régime permanent.

Un premier modèle, basé sur les équations de l'alternateur (tel que présenté à la section 2.3) et sur la courbe C_p du rotor, a d'abord été élaboré, figure 42. À partir du vent, de la vitesse de rotation et de la courbe C_p du rotor, le couple mécanique transmis à l'alternateur est obtenu. Ensuite, à partir de la tension vue par l'alternateur et la vitesse de rotation de l'alternateur, on obtient le couple électromécanique de l'alternateur, s'opposant au couple du rotor. En connaissant le moment d'inertie de l'éolienne, on calcule ensuite l'accélération du rotor, donnant la nouvelle vitesse de rotation (équation (1.53)). Cette façon de faire est intéressante, car elle permet de prendre en considération l'inertie de l'éolienne. Cependant, elle présente des limites. Premièrement, en réalité, le modèle du rotor et celui de l'alternateur ne permettent pas une étude dynamique complète. Les équations utilisées pour l'alternateur et pour le rotor supposent un régime permanent. La simulation obtenue avec ces équations ne pouvant ainsi être que quasi-statique et non dynamique. De plus, la courbe C_p donnant la puissance du rotor lors du fonctionnement en régime permanent seulement, il n'est pas possible d'obtenir le couple de démarrage de l'éolienne à partir de celle-ci, demandant alors certains ajustements afin de faire démarrer l'éolienne lors de

l'augmentation de la vitesse du vent. Deuxièmement, la simulation s'est avérée également trop lente, demandant trop de temps de calcul à Simulink pour simuler de longues périodes de fonctionnement. Simuler quelques heures de fonctionnement peut demander plusieurs minutes de temps de simulation. Puisque l'objectif du simulateur est d'évaluer le fonctionnement global du système sur de longues périodes de temps, plusieurs jours, le modèle a donc été rejeté.

Un second modèle, utilisant directement la courbe de puissance de l'éolienne, pré calculée dans Matlab, a ensuite été développé (figure 43). Ce modèle demande moins de temps de simulation en raison du nombre moins élevé de boucles dans la représentation Simulink, mais ne peut cependant pas tenir compte de l'inertie du rotor et de l'alternateur. Le modèle utilise deux séries de courbes de puissance : une lorsque l'éolienne est reliée à la batterie et une autre lorsqu'elle est reliée à la charge de délestage. Le calcul des courbes de puissance se fait selon la méthode présentée au chapitre 2, en calculant les points d'équilibre entre le rotor et l'alternateur pour différentes vitesses de vent. Pour l'éolienne reliée à la batterie, plusieurs courbes sont calculées pour différents niveaux de voltage. Ces courbes de puissance sont ensuite insérées dans deux tables de vérité. Elles donnent ainsi la puissance électrique de l'éolienne en fonction de la vitesse du vent et du niveau de tension vu aux bornes de l'alternateur, selon si l'éolienne est reliée à la batterie ou à la charge de délestage. À partir de la puissance fournie et du niveau de tension, on peut ensuite calculer l'intensité du courant qui est envoyé au contrôleur de charge.

3.3.2 La batterie d'accumulateurs

La batterie d'accumulateurs la plus largement utilisée pour les réseaux autonomes est la batterie acide-plomb à décharge profonde. Le modèle de la batterie nécessaire pour faire la simulation temporelle a été présenté à la section 1.4.6.1. Cependant, puisqu'il nécessite l'évaluation de plusieurs paramètres de façon empirique, comme la résistance interne et la capacité en fonction de l'état de charge, les courbes de charge et de décharge, tirées d'un article [37], ont plutôt été utilisées directement. Les figures 44 et 45 montrent les courbes de voltage utilisées pour modéliser la batterie dans Simulink. Ces courbes donnent le voltage aux bornes de la batterie en fonction de l'état de charge de la batterie ainsi que de l'intensité du courant. Les données obtenues sont pour la batterie Trojan L-16W à décharge

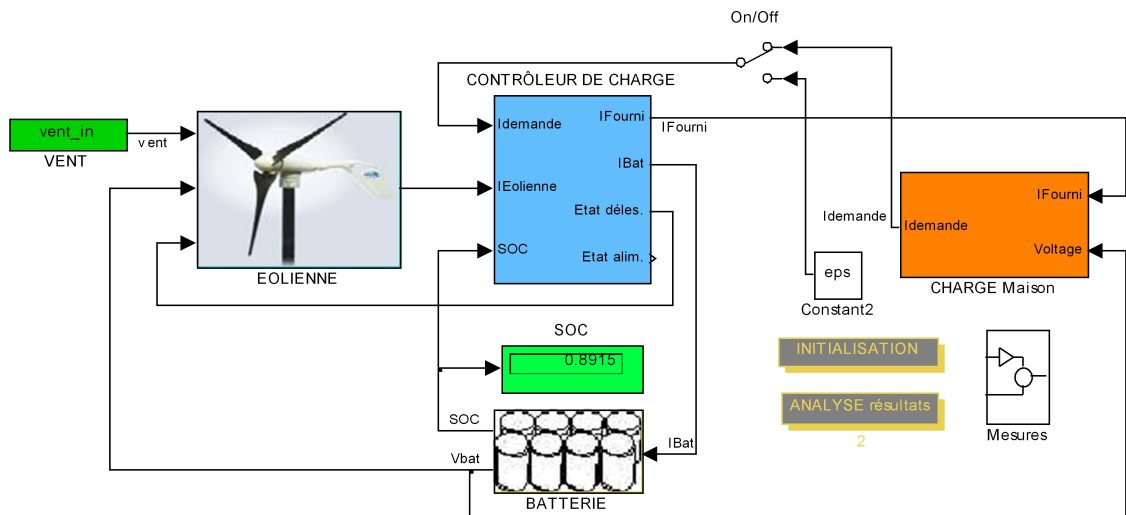


Figure 41 Schéma Simulink complet du programme de simulation de l'éolienne en réseau autonome

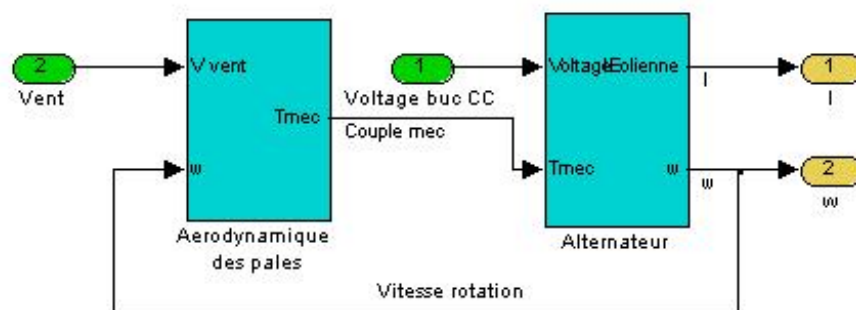


Figure 42 Schéma Simulink du premier modèle de l'éolienne utilisant le couple mécanique et la courbe C_p du rotor.

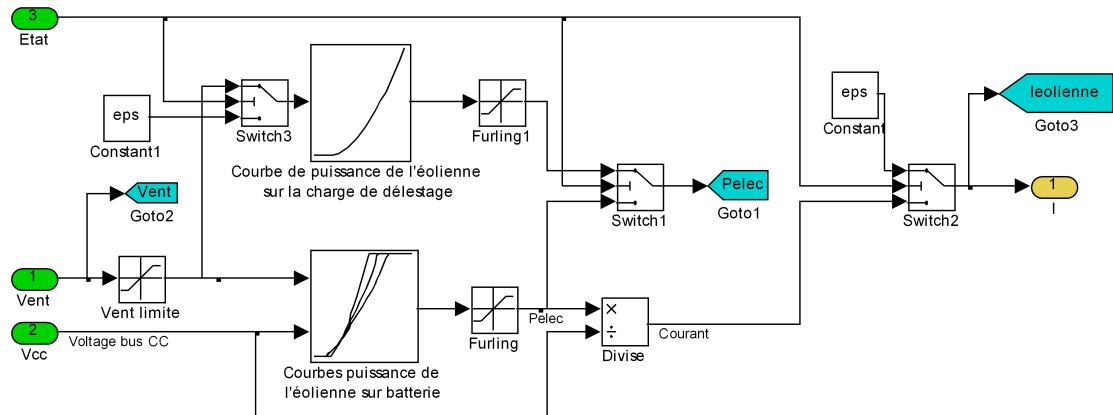


Figure 43 Schéma Simulink du second modèle de l'éolienne

profonde, 12 volts. Le modèle de la batterie, sous Simulink (figure 46), comporte alors deux tables; une pour la décharge de la batterie et une autre pour la charge de la batterie. Ainsi, en se basant sur l'état fourni par le contrôleur de charge (charge ou décharge), le niveau de charge ainsi que sur l'intensité du courant, il est possible d'obtenir la tension vue à ses bornes. Le modèle de la batterie fait continuellement l'intégration du courant afin de calculer l'état de charge de la batterie. Les courbes de puissance de la batterie peuvent être modifiées afin de représenter un autre type de batterie. Le modèle permet également de spécifier le nombre de batteries en série et en parallèle que l'on désire, afin de modifier la capacité et le voltage de l'ensemble.

3.3.3 La charge électrique

La charge électrique représente le consommateur d'électricité qui est relié au système éolien, à la batterie, le plus souvent via un onduleur. Aucune distinction n'est faite à savoir s'il s'agit d'une charge alternative ou continue et la valeur de la résistance de la charge n'est pas établie. Le modèle de la charge électrique est plutôt une série temporelle de la demande de puissance. La puissance électrique demandée est divisée ensuite par la tension du bus CC afin d'établir la demande de courant faite à la batterie. Le modèle permet d'établir un profil de consommation, une demande d'énergie, dans le but de simuler le fonctionnement du système. Ce qui permet de vérifier si l'éolienne, avec un profil de vent

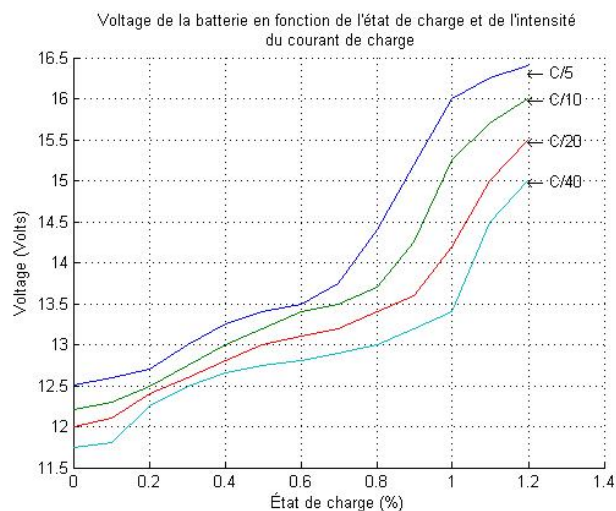


Figure 44 Courbes de charge de la batterie. Voltage en fonction de l'état de charge et de l'intensité du courant de charge pour la Trojan L-16W à décharge profonde, 12 volts. Source : [37]

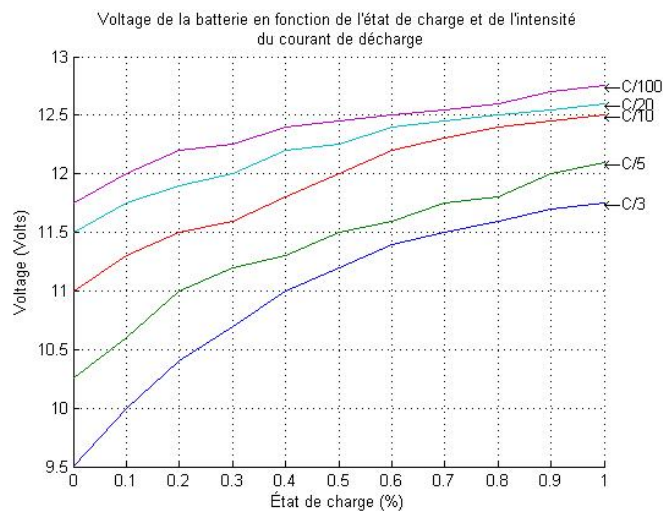


Figure 45 Courbes de décharge de la batterie. Voltage en fonction de l'état de charge et de l'intensité du courant de décharge pour la Trojan L-16W à décharge profonde, 12 volts. Source : [37]

donné et une batterie donnée, parvient à répondre à cette demande d'énergie. On peut alors établir si des coupures de l'alimentation peuvent survenir durant le fonctionnement,

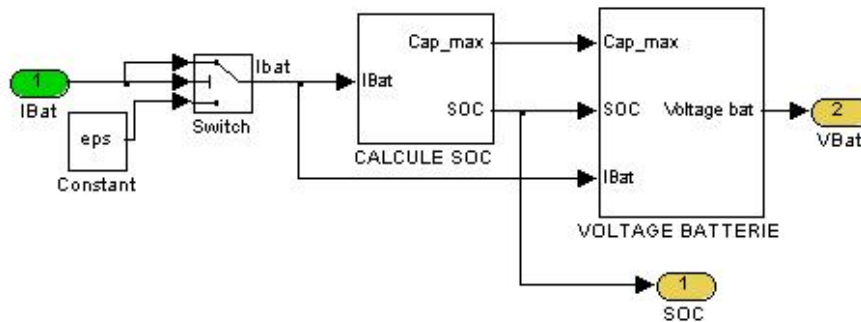


Figure 46 Schéma Simulink de la batterie d'accumulateurs

lorsque le système éolien ne parvient pas à répondre à la demande d'énergie. À l'inverse, on peut déterminer si le système est surdimensionné par rapport à la consommation, trop d'énergie étant perdue dans la charge de délestage.

On peut avoir différentes approches pour générer la série temporelle de demande de puissance. Pour une installation donnée, on peut prendre une liste d'équipement électrique et évaluer à quelle heure de la journée, et pendant combien de temps, on utilise chaque appareil. En faisant la sommation de la consommation de puissance de tous les appareils utilisés, à chaque instant, on obtient une série temporelle de la consommation. Afin d'avoir davantage de flexibilité, une autre approche a été développée.

La méthode est semblable à celle utilisée pour la génération d'une série synthétique de vent. Elle génère une série temporelle de la demande de puissance en utilisant un processus autorégressif d'ordre 1, afin d'avoir à la fois une structure temporelle adéquate et un caractère stochastique. Un cycle diurne a également été ajouté afin de tenir compte du cycle du jour et de la nuit. Le cycle de 24h ajouté permet d'accentuer les demandes d'énergie lors de périodes de pointe, comme le matin, le midi et le soir, et d'abaisser la demande pendant la nuit. La valeur moyenne de la série est ajustée tout comme la variance, et constituent des paramètres du modèle. La série indique la demande de puissance à chaque minute. La puissance est gardée constante à l'intérieur d'une minute afin d'éviter une trop grande variation sur une courte période. On peut en effet penser que la demande

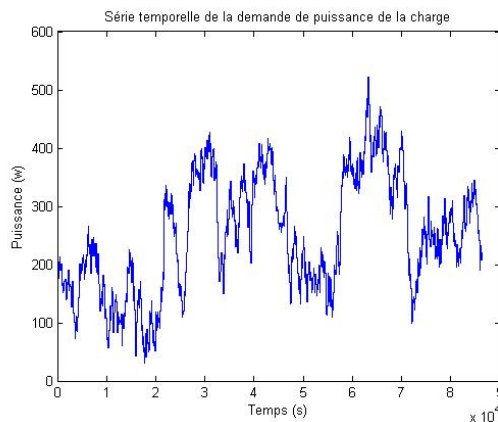


Figure 47 Demande de puissance de la charge pour une journée

de puissance, pour une résidence, varie en effectuant des sauts, lorsqu'un appareil est subitement éteint ou allumé. La figure 47 présente un exemple de demande de puissance pour une journée.

3.3.4 Le contrôleur de charge

Le contrôleur de charge relie l'éolienne, la batterie, la charge de délestage et la charge électrique. Sa fonction est de protéger la batterie d'accumulateurs. En se basant sur la lecture de la tension de la batterie, le contrôleur s'assure que la batterie n'est pas surchargée ou trop déchargée. Si le niveau de tension monte au dessus d'un certain seuil, donné en paramètre, le contrôleur d'ébranche l'éolienne de la batterie et la connecte à la charge de délestage. À l'inverse, si le voltage tombe en dessous d'une autre valeur limite, la charge électrique est déconnectée de la batterie, occasionnant une panne de courant pour le consommateur. Pour le programme de simulation, le contrôleur occupe également une autre fonction; il calcule l'état de la batterie. En se basant sur le courant fourni par l'éolienne et celui demandée par la charge, le contrôleur établit le courant de la batterie, permettant de savoir si la batterie est chargée ou déchargée. Le contrôleur est donc constitué de fonctions logiques qui se basent sur la lecture de la tension de la batterie et le calcul de l'état de charge de la batterie afin de faire la connexion des différentes composantes et calculer la valeur des courants.