

REPUBLIQUE ALGERINNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE ABBERRAHMANE MIRA BEJAIA
FACULTIE DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique

Option : Réseaux Electriques

Thème

LES OUTILS DE MAITRISE DES CONSEQUENCES DES BLACK-OUTS

Réalisé par:

M^{elle} : AZIZOU NORA

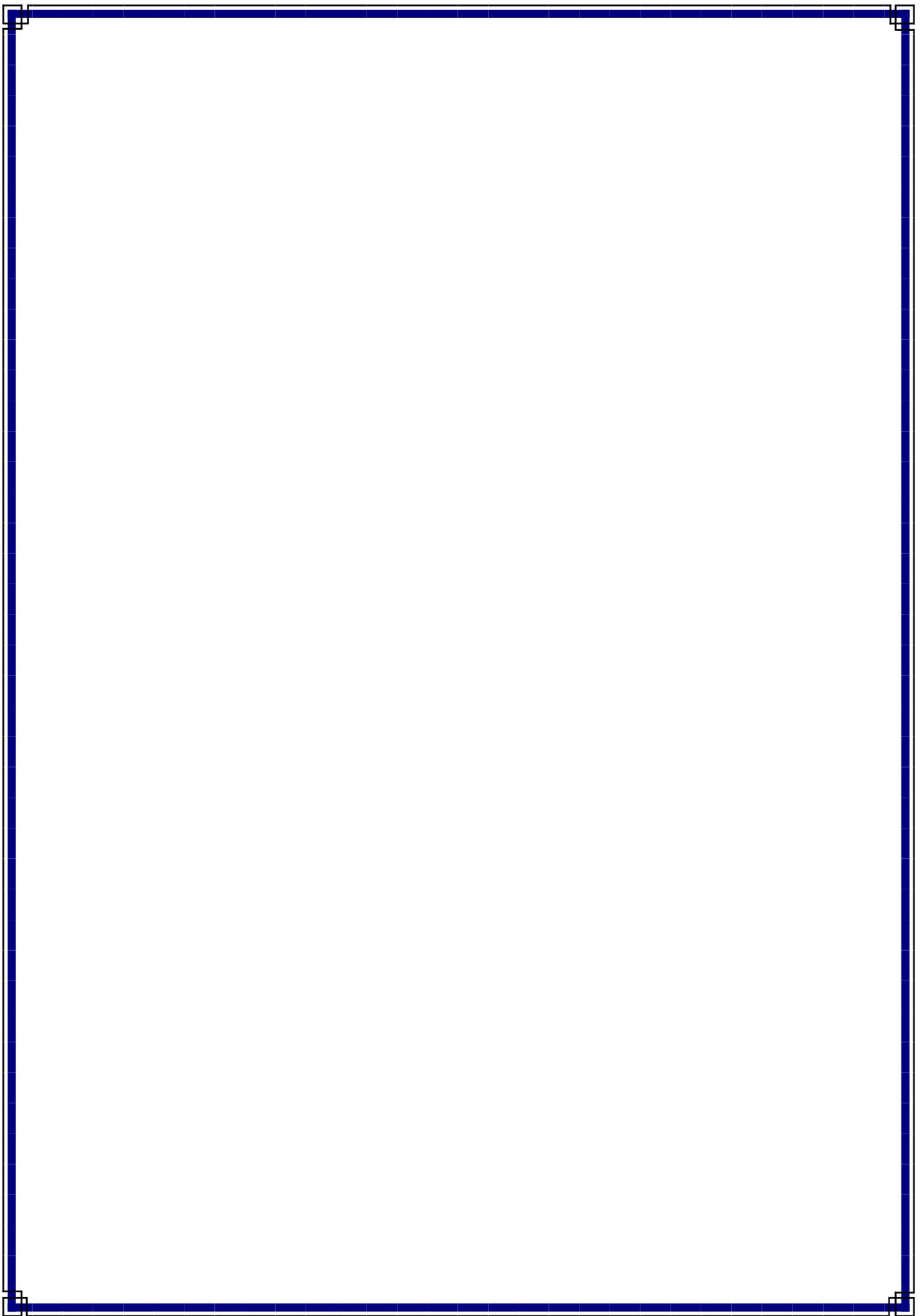
M^{elle} : HAROUN NASSIMA

Encadré par:

M^r : MEDJOU DJ RABAH

M^{elle} : IBERRAKEN FAIROUZ

Promotion: 2013-2014



Remerciement

Tout d'abord, nous remercions Dieu le tout-puissant qui nous a donné le courage, la force et la volonté pour mener à bien ce travail.

Le travail présenté dans ce manuscrit a été effectué dans le cadre du projet de fin d'étude Master, sous la direction de *M^r*. **Rabah Medjoudj**, à qui nous tenons à adresser nos remerciements pour nous avoir orienté vers ce sujet, et avoir dirigé ce travail. Nous lui exprimons également notre sincère gratitude pour son suivi, ses orientations et ses précieux conseils et la confiance qu'il nous a témoigné tout au long de ce modeste travail.

Nous tenons à adresser nos remerciements à *M^{elle}* **Fairouz Iberraken**, pour son aide intellectuelle le long de ce travail et d'avoir mis à notre disposition tous les outils nécessaires pour la réalisation de ce manuscrit.

Un grand merci à nos familles pour leurs présences, leurs préoccupations, leurs encouragements et leurs suivis, avec patience, dans le déroulement de notre projet.

Nous tenons également à remercier les membres de jury d'avoir accepté de juger et d'évaluer notre travail.

Enfin, nous remercions, de tout coeur, tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

La vie n'est qu'un rêve tout commence puis s'achève, il y'a toujours un salut pour faire un début, il ya aussi une fin pour finir notre chemin et on doit se quitter pour se voir demain.

C'est avec un grand plaisir que je dédie ce modeste travail :

À mes très chers parents qui se sont beaucoup investi dans l'accomplissement de ce travail.

À mes très chers frères : Massoud, Azzouz, Walid et Sami.

À mes adorables sœurs : Fouzia, Wassila et Samira.

À mes très chers neveux : Raouf et Adam.

À mon grand père et à ma grande mère ,mes oncles et tentes et tous mes cousins et cousines.

À tous mes amis(es) et tous ceux qui me connaissent sans exception et tous ceux qui m'ont aimé.

À toute la promotion 2013-2014

Nassima

Dédicace

Je dédie ce mémoire à mes anges gardiens ma chère mère, mon cher père, pour leurs patiences et leurs sacrifices, qui m'ont soutenu et m'ont encouragé à continuer et à persévérer depuis toujours.

A mon chère mari Tawfiq qui était toujours à mes côtés pas à pas, m'a soutenu et m'a encouragé constamment.

A mes chères frères et sœurs que j'aime beaucoup : Mourad, Fahem, Hanibal, Samira, Samia, Saida, Karima, Warda.

A mes neveux et nièces : Badis, Mohamed Amine, Fares, Alexy, Nihad, Tinaght, Ziad, Amal et Islam.

A ma belle-famille (mon beau père, ma belle-mère, mes beaux-frères et mes belles sœurs : Karim, Hamouche, Mouloud, Yahia, Abd Ali, Abd el-kader, Yacine, Samira, Lina, Zina).

A tous mes proches et mes ami(e)s qui ne méritent pas d'être oubliés.

À toute la promotion 2013-2014

Nora

Liste des abréviations

AC	A lternatif C urrent
ACF	A nalysis of the C oefficients of F unction
AMI	A dvanced M etering I nfrasturcture
AMM	A dvanced M eter M anagement
AMR	A dvanced M eter R eading
AR	A uto R egressive
ARMA	A uto R egressive - M oving A verage
ARIMA	A uto R egressive - I ntegrated - M oving A verage
BB	B ruit B lanc
BPL	B roadband over P ower L ine
CPL	C ourant P orteur en L inge
DC	D irect C urrent
DMS	D istribution M anagement S ystem
EDT	E astern D aylight T ime
EMS	E nergy M anagement S ystem
EnR	E nergies R enouvelables
FACTS	F lexible A lternative C urrent T ransmission S ystems
FE	F rance , E spagne
GRTN	G estionnaire du R éseau de T ransport N ational(Italie)
GW	G iga W att
h	heure
HMI	H uman- M achine I nterface
HT	H aute T ension
Hz	H ertz
km	kilo mètre
kV	kilo V olt

MA	M etering A verage
mn	m inute
MWh	M éga W atts h eurs
MTU	M aster T erminal U nits
PACF	P artielle A nalysis of the C oefficients of the F unction
PLC	P rogrammable L ogic C ontrollers
RTU	R emote T erminal U nits
SARIMA	S easonal A uto R egressive - I ntegrated - M oving A verage
SCADA	S upervisory C ontrol and D ata A cquisition
TIC	T echnologies d' I nformation et de C ommunication
TSO	T ransmission S ystem O perators
UCTE	U nion for the C oordinator of T ransmission of E lectricity

Table des matières

Table des Matières	iii
Table des figures	vii
Liste des tableaux	x
Introduction Générale	1
1 Etat d’art des travaux relatifs aux probabilités et aux statistiques d’occurrence des black-outs	3
Introduction	3
1.1 Etat d’art sur la thématique des black-outs	3
1.1.1 Définition	3
1.1.2 Phases des black-outs	4
1.1.3 Black-out Algérien	6
1.1.4 Black-out des Etats Unis et du Canada (Nord de l’Amérique)	11
1.1.5 Black-out Italien	15
1.1.6 Black-out Indien	19
Conclusion	20
2 Analyse des séries chronologiques et élaboration des Modèles de prévisions	21
Introduction	21
2.1 Définition série temporelle et conception de stationnarité	22
2.2 Processus fortement stationnaires, et les processus faiblement stationnaires	22

2.3	Processus bruit blanc (white noise)	23
2.4	Fonction d'autocovariance, d'autocorrélation et corrélogramme	24
2.4.1	Fonction d'autocorrélation (ACF)	24
2.4.2	Fonction d'autocorrélation partielle (PACF)	24
2.5	Intervalle de confiance de la prévision	25
2.6	Corrélogramme et opérateur retard	25
2.7	Principaux modèle statistique pour l'étude des séries temporelles	26
2.7.1	Processus AR(p)	27
2.7.2	Processus MA(q)	28
2.8	Processus ARMA	30
2.8.1	Définition	30
2.8.2	Propriétés des autocorrélations	31
2.8.3	Processus ARMA(1,1)	31
2.9	Tests d'adéquation (de validation) du modèle	32
2.10	Modèles non stationnaires	33
2.10.1	Processus ARIMA (p,d,q)	33
2.10.2	Modèles SARIMA	34
2.10.3	Lissage exponentiel	35
2.11	Modèles de Box Jenkins	36
2.11.1	Processus moyenne mobile d'ordre 1 ou MA(1)	36
2.11.2	Processus autorégressif d'ordre 1 ou AR(1)	37
2.11.3	Processus mixte autorégressif moyenne mobile d'ordre (1,1); ARMA(1,1)	37
2.11.4	Modèles ARIMA et SARIMA	37
	Conclusion	38
3	Exploitation du langage de programmation R	39
	Introduction	39
3.1	Présentation du langage R	39
3.2	Analyse des données et des étapes utilisées dans le langage R	40
3.2.1	Test sur la validité des coefficients	43
3.2.2	Test sur les résidus	44
3.2.3	Test de Box et Ljung sur l'autocorrélation des résidus	45
3.2.4	Prévision	46
	Conclusion	47

4	Intégration des TIC dans les prévisions des black-outs	48
	Introduction	48
4.1	TIC (technologies d'information et de communication)	48
4.1.1	Définition	48
4.1.2	Objectifs des TIC dans la gestion intelligente de l'énergie	49
4.2	Atouts d'un approvisionnement énergétique décentralisé	49
4.3	Systèmes d'information des systèmes intelligents	50
4.3.1	Système SCADA	50
4.3.2	Avantages pour l'utilisateur	51
4.3.3	Système de gestion de la distribution DMS	51
4.3.4	Système de gestion EMS	53
4.3.5	Système SCADA/ EMS	53
4.3.6	Classifications des fonctions SCADA/EMS	53
4.4	Compteurs intelligents (Smart Meters)	54
4.4.1	Définition	54
4.4.2	Type de compteur intelligent	54
4.4.3	fonctions des compteurs intelligents	55
4.5	Comptage évolué (AMI) (Advanced Metering Infrastructure)	56
4.6	Liaisons de télécommunication	57
4.6.1	Courant porteur en ligne	57
4.6.2	Capteurs de courants	59
4.6.3	Fibres optiques	59
	Conclusion	60
5	Efficacité dans la reconstruction du réseau après le black-out	61
	Introduction	61
5.1	Système de défense classique	61
5.2	Vers les réseaux de distribution du futur	62
5.3	Enjeux de l'évolution des réseaux électriques	67
	Conclusion	68
	Conclusion Générale	70
	Bibliographie	

Table des figures

1.1	Phases du black-out dans le cas général	4
1.2	Zones touchées par le black-out du 03 février 2003.	9
1.3	Évolution de la fréquence pendant le black-out.	10
1.4	Carte des interconnexions	11
1.5	Séquences des événements de black-out Italien.	17
1.6	Black-out Italien vu par satellite la nuit du 28 septembre 2003.	17
1.7	Comportement de fréquence du réseau Italien dans la période transi- toire.	19
3.1	Graphe de la série originale.	40
3.2	Correlelogramme de la série.	41
3.3	Correlelogramme partiel de la série.	41
3.4	ACF de la série transformée.	42
3.5	PACF de la série transformée.	42
3.6	Corrélelogramme des résidus.	44
3.7	Corrélogramme partiel des résidus.	44
3.8	Graphe de la série originale et des prévisions.	46
4.1	Système SCADA	51
4.2	Vue d'ensemble schématique de la configuration typique d'un comp- teur intelligent.	56
4.3	Signal périodique du courant alternatif.	57
4.4	Fibres optiques.	59
5.1	Diagramme d'états de dégradation et de restauration.	63

Liste des tableaux

- 1.1 Bilan de puissance à 19h03 l'instant de l'initiation du black-out Algérien. 7
- 2.1 Récapitulatif les propriétés des processus MA(q),AR(p) et ARMA (p,q). 32
- 5.1 Etats de restauration du système dans le cas de black-out Algérien de 2003. 64
- 5.2 Etats de restauration du système dans le cas de black-out Italien de 2003. 64
- 5.3 Comparaison de paramètres des trois systèmes électriques. 65

Introduction Générale

La fourniture d'électricité s'organise de plus en plus afin de maîtriser la stabilité et d'assurer la gestion dynamique de l'ensemble production - transport - consommation, et d'arriver à garantir la sécurité d'approvisionnement en électricité dans un environnement de marchés décentralisés dans le monde. Face à la croissance de la demande, et à la complexité de la structure du réseau même, une défaillance peut potentiellement avoir des conséquences désastreuses sur l'ensemble du réseau interconnecté. Alors on parle de "black-out", lorsqu'un réseau d'alimentation s'est entièrement effondré.

La théorie de réseau concerne une large variété de phénomènes, dont on cite le black-out qui est un phénomène très rare, mais ses conséquences sont catastrophiques, sa définition remonte aux années 60 et 70, où le terme est utilisé dans la topologie et les contraintes du réseau électrique. Il désigne une coupure d'électricité à large échelle concernant plusieurs régions voire la totalité d'un pays pendant un laps de temps allant de quelques heures à quelques jours. Ils causent d'énormes pertes à l'économie et à la société.

L'année 2003 a été spectaculaire en terme de black-out, où ont touché plusieurs pays, à savoir : Italie, avec 57 millions des personnes affectées et 180 GW de charge perdus ; États-Unis et le Canada, a causé des dommages économiques estimés de 7 à 10 milliards de dollars et a laissé 50 millions d'Américains sans électricité pendant plusieurs jours. En Algérie, un manque général de tension a touché le réseau interconnecté Nord du système électrique, entraînant la coupure de l'alimentation de l'ensemble de la clientèle raccordée au réseau nord de pays.

En toute logique, les black-outs de large-secteur récent ont soulevé beaucoup de questions au sujet des détails de tels événements et la vulnérabilité des systèmes d'alimentation reliés ensemble. Il est utile de citer aussi le black-out de 2012 en Inde,

ayant touché environ 670 millions d'habitants.

Ce mémoire se subdivise en cinq chapitres :

Dans le premier chapitre, on développe différents travaux menés ces dernières années pour comprendre la problématique des black-outs. Nous proposons une division de la progression de ces phénomènes en plusieurs phases séquentielles, nous classifions leurs caractéristiques selon ces phases. Cette partie constituera un état d'art sur cette thématique.

Dans le deuxième chapitre, et qui constitue l'essentiel de notre projet. On introduit l'analyse des séries chronologique d'une part et la modélisation de Box-et Jenkins dans le but d'établir des prévisions, d'autre part. Il sera aussi introduit le rôle important que jouent les systèmes intelligents des prévisions météorologiques et des prévisions de charges pour éviter de futurs blackouts.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté l'application de la méthode de Box-Jenkins qui est une des méthodes de prévision la plus couramment utilisée sous le logiciel de développement scientifique spécialisé dans le calcul et l'analyse statistique "R".

Dans le quatrième chapitre, en se basant sur les apports techniques et organisationnels que peuvent produire les Technologies de l'Information et de la Communication (TIC) dans les diminutions de l'occurrence de ces événements redoutés et dans la gestion des réseaux après les black-outs.

Dans le cinquième chapitre, est consacré pour la maîtrise de la reprise de service revêt alors une importance nouvelle. La reprise de service d'un réseau, après un incident quelconque, doit être à la fois rapide et fiable. Une telle opération exige la disponibilité d'un plan détaillé.

Enfin, nous concluons ce mémoire et proposons des perspectives de travaux pour poursuivre et améliorer le nouveau système de prévention des black-outs présenté dans ce travail.

Etat d'art des travaux relatifs aux probabilités et aux statistiques d'occurrence des black-outs

Introduction

Les black-outs à grande échelle provoquent d'énormes pertes économiques et sociales. Nous avons tout d'abord analysé les grands black-outs apparus dans le monde en 2003 et 2012 , classifié leurs caractéristiques selon des phases temporelles identifiées au préalable, et infini résumé leurs causes, et leurs déroulement dans le temps. Nous avons aussi présenté les techniques utilisées pour la remise en service du système électriques, et suggéré le plan de défense contre les futurs black-outs. Il est ressorti de cette analyse que la cascade de surcharge et l'écroulement de tension sont de loin les incidents les plus fréquents dans les black-outs et qu'un système pour la prévention de ces incidents en temps réel est nécessaire[01].

1.1 Etat d'art sur la thématique des black-outs

1.1.1 Définition

Une situation de black-out est la conséquence d'une dégradation évolutive de l'état du réseau, résultante des effets combinés de perturbations successives et de contre-mesures inappropriées, par ailleurs, la genèse d'un incident de grande ampleur est toujours caractérisée par quelques phases de fonctionnement typiques liées

à quatre grands phénomènes qui indépendamment de leurs causes initiales, qui peuvent être multiples, se succèdent ou se conjuguent tout au long de l'incident. Ces phénomènes sont : les surcharges en cascade, l'écroulement de tension, l'écroulement de fréquence, la rupture du synchronisme.

Ces dernières années, la problématique des black-outs a été prise en charge surtout le côté déterministe. Quant à la modélisation stochastique, un certain nombre des travaux ont été publiés. Mais, on observe une rareté par rapport à la notion de prévision. Par conséquent, les chercheurs et les opérateurs de réseaux électriques se concentrent sur les moyens d'éliminer les causes des black-outs. Tels que mentionnés dans les travaux ci-après :

D'après l'analyse de 37 incidents de black-outs sur la période 1965 à 2005 dans le monde réalisée par L. Wei et al [01], les blackouts se produisent en général dans les réseaux de transport et on peut retenir certaines caractéristiques communes à ces incidents qui sont considérées comme les plus redoutables dans le problème de conduite et d'exploitation du réseau. On trouve qu'un black-out peut se dérouler suivant cinq phases séquentielles :

1.1.2 Phases des black-outs

Ces phases, sont les préconditions, les événements initiaux, la cascade d'événements, l'état final et la restauration. La cascade d'événements peut encore être subdivisée en trois phases : la progression quasi-statique, les événements déclencheurs et la cascade rapide, telle que montrée sur la figure 1.1 [01].

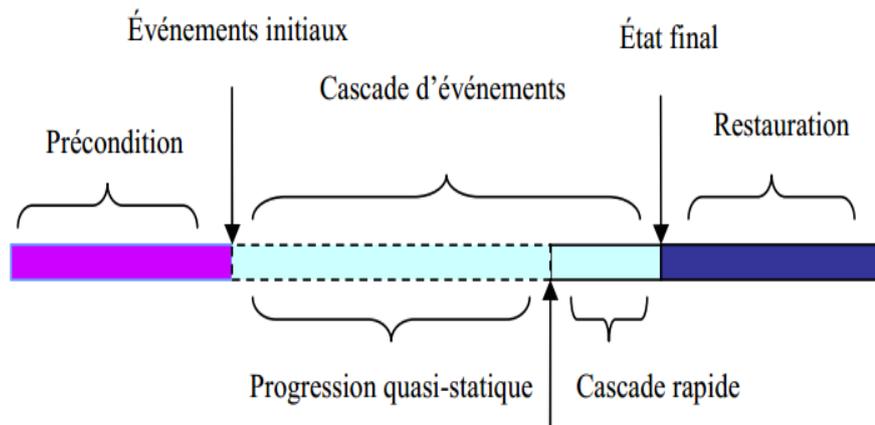


FIGURE 1.1 – Phases du black-out dans le cas général .

1. Précondition

Des préconditions différentes se sont produites dans les 37 blackouts passés, mais nous pourrions les classer selon leurs caractéristiques communes. Comme suit :

- La condition du système est le stress pendant le pic d'été ou celui d'hiver. L'analyse précédente montre que 64.9% des blackouts (24/37) se sont produits dans le pic de l'été et de l'hiver quand la demande électrique est forte et 35.1% des blackouts (13/37) se sont produits dans des conditions normales du système électrique, ce qui n'est pas négligeable.
- Le vieillissement des équipements (black-out de Moscou le 25 mai 2005 parce que plus de 70% des sous-stations 220kV ont dépassé leur durée de vie limite).
- L'insuffisance de réserve de puissance réactive (black-out des Etats-Unis le 14 août 2003).
- Certains équipements importants hors service (Avant le black-out de la Grèce le 12 juillet 2004, un générateur (125 MW) hors service a mis le système dans une situation de stress).
- Raisons naturelles comme le vent, les orages, le brouillard, les perturbations Géomagnétiques (l'écroulement de tension de Québec en 1989), l'incendie (black-out des États-Unis du 16 avril 1996), etc.

2. Événements initiaux

Les événements initiaux des blackouts sont généralement des courts-circuits, déclenchements de ligne et de générateur, etc. Ils peuvent conduire à des oscillations de puissance dans le réseau électrique.

3. Cascade d'événements

Elle peut être déclenchée par les événements initiaux. Qui peuvent provoquer des oscillations de puissance et des variations de tension, qui mène à des black-outs. Cette période peut encore être subdivisée en trois phases :

a) Progression quasi-statique

C'est une période d'environ 10 minutes à 1,5 heure. Et la cascade de surcharge est l'événement majeur qui se produit dans cette période.

b) Evénements de déclenchement

Les événements déclencheurs des cascades rapides sont généralement des courts-circuits, déclenchements de ligne et de générateurs importants, etc. Ces dernières peuvent mener à de grandes oscillations transitoires qui peuvent provoquer la réaction du système de protection, et de plus en plus de lignes et des générateurs déclenchent et deviennent hors service.

c) Cascade rapide

Dans cette période, de nombreuses lignes et générateurs se déclenchent en quelques minutes ou quelques secondes. Quand le système entre dans cette période, il est trop tard pour prendre des actions curatives manuelles pour stopper les blackouts.

4. Etat final et restauration

Lorsque les blackouts se produisent, l'opérateur du réseau doit redémarrer le système le plus rapidement possible [01].

1.1.3 Black-out Algérien

R.Touileb [02] a fait les prévisions de black-out du 3 février 2003, qui s'est produit au moment où la demande de charge de pointe est maximale au niveau de la centrale électrique du Hamma, suite à une succession d'évènements avec à l'origine le déclenchement de deux groupes Turbines à Gaz à 350 MW et à un dysfonctionnement des lignes de détente gaz [02].

1.1.3.1 Situation du réseau Algérien avant le Blackout

Le réseau algérien était dans un état stable avant 19h04, avec un gradient de montée de charge de 16MW/min. Le tableau 1.1 suivant présente le bilan de puissance à 19h03 du 03 février 2003, où les différentes puissances. Mise à disposition, appelées et mise en service sont présentés.

Puissance disponible	5226 MW	
Puissance disponible à l'arrêt	123MW (Hassi Messaoud) et 14 MW (érraguene) : Non utilisable (problème d'évacuation)	
Puissance en service	5089 MW (129 MW non évacuable pour contraintes réseau)	
Puissance développable	4960 MW	
Puissance produite à 19h03	4876 MW	
Réserve Tournante	84 MW	
Apport réseau de Hassi Berkine (Sonatrach)	40 MW	
Importation	TUNISIE	= 2 MW en réception
	UCTE	= 85 MW en réception
Puissance appelée	5003 MW	
Puissance appelée prévue	5150MW	

TABLE 1.1 – Bilan de puissance à 19h03 l'instant de l'initiation du black-out Algérien.

1.1.3.2 Origines et déroulement chronologique du black-out Algérie

Le lundi 3 février à 19h 04, des millions de foyers se sont retrouvés sans électricité à la suite d'une coupure généralisée du courant qui a touché presque tout le pays, à l'exception du Sud. En tout, 38 wilayas ont été plongées dans le noir. Un incident technique survenu à la centrale du Hamma à Alger a mis à l'arrêt toutes les centrales de production d'électricité. Cette coupure a été causée par une succession d'événements, avec, à l'origine, le déclenchement de deux groupes turbines à gaz à 350 MW, par minimum de pression gaz (dysfonctionnement au poste gaz), selon Sonelgaz. Le courant a été rétabli progressivement "dans une période comprise entre 12 minutes et 4 heures 30 minutes".

Le déficit engendré par la perte des 350 MW a sollicité instantanément un apport d'une puissance équivalente sur les lignes d'interconnexion avec le réseau marocain. Ce qui conduit à l'ouverture automatique des interconnexions avec le Maroc par surcharge (réglage : 300 MW en instantané). La séparation des réseaux Algérien et Marocain a engendré une baisse notable de fréquence sur l'ensemble interconnecté constitué par les réseaux Algérien et Tunisien. Ainsi, la réaction des groupes de production du réseau Algérien à la baisse de fréquence a été suivie par :

- Le déclenchement au centre du pays, d'une autre production de 120 MW,
- La surcharge des lignes 220 kV reliant le réseau Sud Est au réseau Nord puis leur déclenchement.

Suite à ces déclenchements successifs, le déficit de puissance s'accroît pour

atteindre près de 800 MW. La fréquence continuant à décroître atteint 49 Hz et sollicite ainsi le fonctionnement des relais de délestage de charge par minimum de fréquence. La puissance réellement délestée était insuffisante pour stabiliser la chute de fréquence malgré la participation du réseau tunisien.

La contribution du réseau Tunisien au déficit de puissance sur le réseau Algérien, entraîne l'augmentation du transit sur l'interconnexion Tunisie - Algérie et entraîne son déclenchement par surcharge. Ce qui a conduit à l'isolement du réseau Algérien.

La conjugaison des deux derniers événements ci-dessus a eu un effet inhibant et la fréquence a continué à se dégrader jusqu'à atteindre 48,5 Hz, où un autre seuil de délestage de charge a été activé. Ce deuxième délestage de charge, ralentit légèrement la baisse de fréquence, sans toutefois la stabiliser, vu que le niveau de charge délestée était insuffisant. 10 secondes après le début de la perturbation, la fréquence atteint 48,2 Hz et provoque le fonctionnement de l'îlotage entre les réseaux Centre Sud et Nord, entraînant l'isolement du réseau Centre - Sud de celui du Nord, réduisant par conséquent de 100 MW l'apport de ce réseau vers le Réseau Interconnecté Nord. A partir de cet instant les événements s'accroissent, compte tenu du déficit important de production sur le réseau et de la non-stabilisation de la fréquence. Ainsi, la fréquence décroît rapidement et à 47,5 Hz le déficit de puissance va encore augmenter après le déclenchement de 500 MW en turbines à gaz (par protection mécanique de vitesse) sur le réseau Nord. Ce qui a eu pour conséquence de dégrader le plan de tension puis la surcharge de l'interconnexion Centre-Est et son déclenchement. Ce déclenchement engendre le report de charge instantané sur les autres lignes d'interconnexion Centre-est entraîné leur déclenchement par surcharge. Ce qui accélère la dégradation de l'équilibre offre-demande et provoque une avalanche de déclenchements des centrales Turbines à Vapeur du Nord.

Les zones touchées sont représenté dans la figure 1.2 [02].

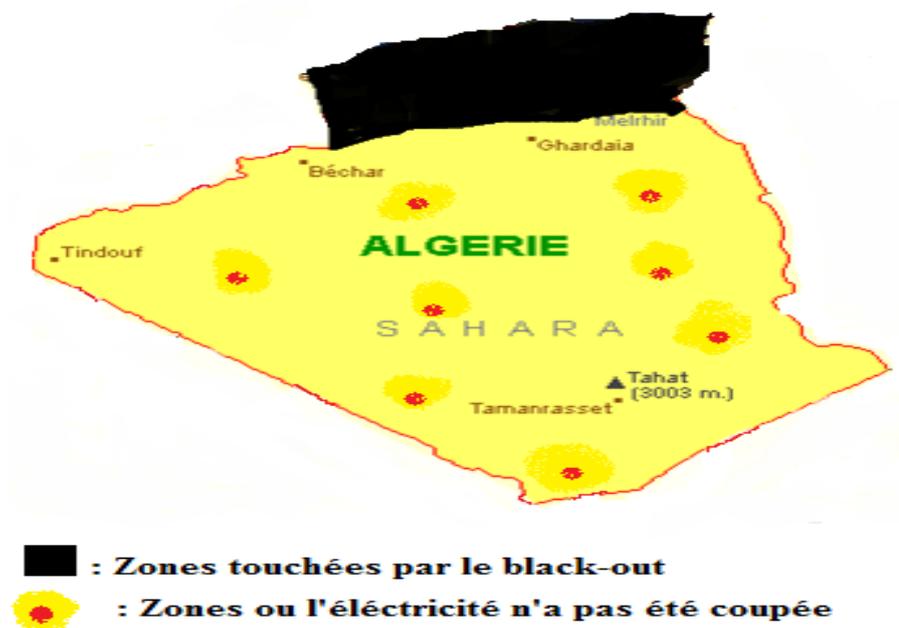


FIGURE 1.2 – Zones touchées par le black-out du 03 février 2003.

1.1.3.3 Reprise de service après l'incident

La reprise de service du réseau a été entamée 11 minutes après le début de l'incident par le Dispatching national et les quatre centres régionaux de conduite du réseau à travers la réalimentation du réseau Sud Est par le réseau Sud et 4 minutes après par la réalimentation d'une partie du réseau Ouest à partir de l'interconnexion avec le Maroc. La reprise graduelle du réseau national s'est faite entre 19h20 et 22h05 et la reconstitution globale du réseau a eu lieu après la reconstruction et l'interconnexion des différents îlots régionaux par les couplages des différentes parties du réseau comme suit :

- à **19h50** : Couplage du réseau UCTE avec Centrale de Tiaret au poste de Tiaret,
- à **21h00** : Couplage du réseau de Hassi-Mesaoud avec le réseau Centre-Est au poste de Batna,
- à **21h47** : Couplage entre les réseaux Centre-Ouest et Centre-Est au poste d'Alger Est. Le reste des manœuvres de reprise de la charge a continué à se faire dans tous les ouvrages, jusqu'à la réalimentation de la totalité de la clientèle, qui a été reprise à 100% vers 23h00.

1.1.3.4 Évolution de la Fréquence

La figure 1.3 présente l'évolution de la fréquence pendant le black-out.

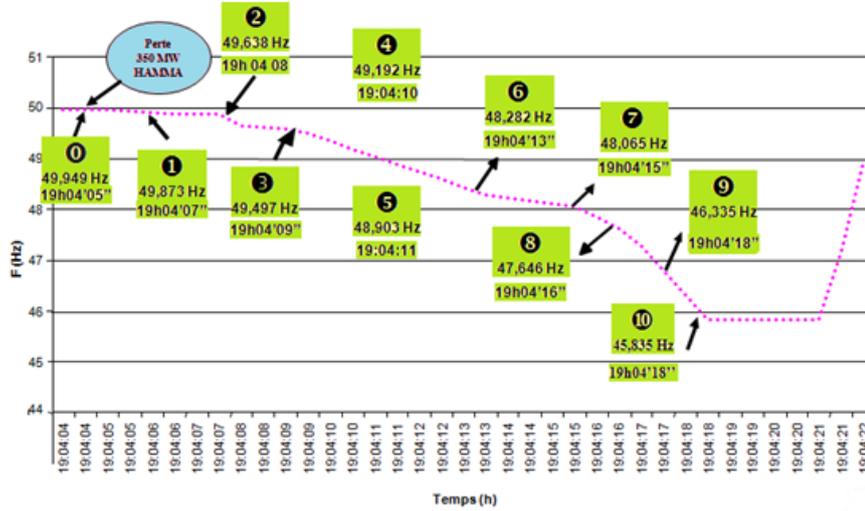


FIGURE 1.3 – Évolution de la fréquence pendant le black-out.

1.1.3.5 Conclusion de l'analyse du black-out et mesures prises

L'analyse du black-out du 03 février a montré que l'incident est dû à la conjonction de plusieurs facteurs défavorables que sont :

- l'absence de réserve de puissance sur le réseau, compte tenu du différé d'un certain nombre de décision d'équipement de production eu égard à la nouvelle réorganisation du secteur,
- le fonctionnement aux limites techniques du réseau de transport, en particulier de certaines lignes d'interconnexion régionales,
- l'insuffisance des puissances délestées en automatique par minimum de fréquence, suite au mauvais fonctionnement du plan de sauvegarde du réseau (Fonctionnement à 48%),
- L'insuffisance de capacité d'interconnexion avec les réseaux voisins et entre certaines régions du réseau national (ex : Centre - Est).

Les mesures prises juste après l'incident ont consisté à :

Mesures immédiates

- Remise en conformité du plan de défense.
- Révision des seuils et des niveaux de délestage par minimum de fréquence.

Chapitre 1

- Coordination des réglages entre l'îlotage des groupes et le plan de délestage de charge.
- Mise en place d'un plan de défense basé sur les transits de puissance en particulier sur les interconnexions internationales et régionales.

Mesures à court et moyen termes

Reconstitution de la réserve de puissance du parc de production à moyen terme pour assurer une bonne sécurité de fonctionnement, par le lancement de la réalisation de nouvelles centrales de production.

1.1.4 Black-out des États Unis et du Canada (Nord de l'Amérique)

Durant l'année 2003, un autre black-out s'est produit le 14 août dans le nord-est des États-Unis et dans l'est du Canada. G. Stéphane [03] a étudié et analysé cette panne de courant. Afin de prévoir leurs causes.

La Structure du réseau électrique nord-américain est formée de trois interconnexions distinctes indépendantes les unes des autres sur le plan électrique. Seules quelques liaisons à courant continu les lient. Comme illustrer sur la figure 1.4 [03].



FIGURE 1.4 – Carte des interconnexions .

1.1.4.1 Conditions préalables au black-out

Plusieurs préconditions se sont produites dans le black-out de 14 août à savoir :

- La demande d'électricité était élevée en raison des fortes charges de climatisation dans toute la région nord-est des États-Unis et dans l'est du Canada,
- Certaines installations de production étaient hors service dans la région du lac Erie,
- Plusieurs grands réseaux d'électricité du Midwest ont systématiquement sous-estimé leurs prévisions de la demande entre le 11 et le 14 août 2003,
- Plusieurs batteries de condensateurs destinés à fournir de la puissance réactive à la région de Cleveland étaient déclenchées (situation inconnue des opérateurs voisins).

1.1.4.2 Facteurs initiateurs du black-out

On résume de manière chronologique, les principaux événements qui se sont produits dans la région allant du Michigan jusqu'à New York :

1. Déclenchement de lignes et d'un générateur de 12 :08 - 14 :02 :

- À partir de 12 :08 - Série de pannes sur les lignes de transport 345, 230 et 138 kV du réseau de Cinergy,
- 13 :31 - Unité 5 de la centrale à charbon d'East Lake (597 MW),
- 14 :02 - Ligne 345 kV Stuart - Atlanta à cause d'un contact avec un arbre provoquant un court-circuit à la terre.

2. 12 :15 - 16 :04 Mauvais fonctionnement , de l'estimateur d'état et de l'analyseur d'incidents de MISO.

3. 14 :27 - 15 :41 (EDT) Déclenchements de lignes entre l'est et le nord de l'Ohio.

- 10. 14 :27 - Ligne 345 kV Star - South Canton (court-circuit avec un arbre puis réenclenchement immédiat),
- 15 :05 - Ligne 345 kV Harding -Chamberlain (court-circuit avec un arbre),
- 15 :32 - Ligne 345 kV Hanna - Jupiter (court-circuit avec un arbre),
- 15 :41 - Ligne 345 kV Star - South Canton (court-circuit avec un arbre),
- Transfert de charge sur d'autres lignes (y compris des lignes 138 kV).

4. 14 :14 - 15 :05 Défaillance du système d'alarmes de FE.

5. **15 :42 - 16 :06 (EDT) Déclenchements de lignes et séparation de l'Ohio (nord - est).**
 - 15 :39-15 :58 :47 - 7 lignes 138 kV du nord de l'Ohio,
 - 15 :59 - Perte des jeux de barres de la sous-station 138 kV West Akron et de 5 lignes 138 kV,
 - 16 :05 :58 - Ligne 345 kV Sammis-Star (faible tension et courant) ; Séparation de l'est et du nord de l'Ohio ; 3 axes de transport restants en direction du nord de l'Ohio.

6. **16 :08 :59 - 16 :10 :27 (EDT) Déclenchements de lignes et de générateurs ; séparation de l'Ohio (nord - sud).**
 - 16 :08 :59 - Ligne 345 kV Galion -Ohio Central Muskingum,
 - 16 :09 :06 - Ligne 345 kV East Lima -Fostoria Central, → Oscillations de puissance entre la Pennsylvanie, l'État de New York, l'Ontario et le Michigan → Séparation nord-sud de l'Ohio,
 - 16 :09 :23-16 :10 :27 - Pertes de plusieurs centrales (946 MW).

7. **16 :10 :36 - 16 :10 :38 (EDT) Déclenchements de lignes, de générateurs et séparation de réseaux dans l'Ohio et le Michigan.**
 - 15 :10 :36 - Lignes 345 kV Argenta -Battle Creek, Argenta - Tompkins et Battle Creek - Oneida,
 - 15 :10 :37 - Unités 1 à 4 de la centrale de Sumpter (300 MW près de Détroit), réduction de puissance de la centrale de MCV (963 → 109 MW),
 - 15 :10 :38 - 4 lignes 138 kV dans le sud du Michigan - Lignes 345 kV Hampton -Pontiac et Tetford - Jewell → Séparation nord-est - ouest du Michigan,
 - 15 :10 :38.6 - Ligne 345 kV Erie West - Ashtabula - Perry→Séparation du nord de l'Ohio et de la Pennsylvanie.

8. **16 :10 :39.5 - 16 :10 :46 (EDT) Déclenchements de lignes et de générateurs dans l'Ohio et l'est du Michigan.**
 - 15 :10 :39.5-16 :10 :40 - Lignes 345 kV Bayshore - Monroe, Allen Junction -Majestic - Monroe et Majestic Lemoyne,
 - 16 :10 :41.8 - Ligne 345 kV Fostoria Central - Galion,
 - 16 :10 :41.9-Ligne 345 kV Beaver -David Besse → Séparation nord-est - ouest du Michigan,
 - 16 :10 :40-16 :10 :43 - Perte de générateurs de 7 centrales dans l'Ohio (3294 MW),
 - 16 :10 :41-16 :10 :42 - Perte de 4 centrales près de Détroit (1759 MW).

9. **16 :10 :40 - 16 :10 :44 (EDT) Déclenchements de lignes entre la pennsylvanie et l'État de New York.**
 - 16 :10 :39 - Lignes 345 kV Homer City -Watercure Road et Homer City - Stolle Road,
 - 16 :10 :44 - Lignes 230 kV South Ripley- Erie East et South Ripley - Dunkirk,
 - 16 :10 :44 - Ligne 230 kV East Towanda- Hillside → Séparation du nord de la Pennsylvanie et de l'État de New York.
10. **16 :10 :42 - 16 :10 :45 (EDT) Isolement de la partie nord-est de l'Interconnexion de l'Est.**
 - 16 :10 :42 - 16 :10 :45 (EDT) Isolement de la partie nord-est de l'Interconnexion de l'Est,
 - 16 :10 :45 - Ligne 500 kV Wawa-Marathon,
 - 16 :10 :45 - Ligne 500 kV Branchburg - Ramapo → Séparations du nord-sud du New Jersey.
11. **16 :10 :46 - 16 :10 :50 (EDT) Formation d'enclaves dans l'État de New York.**
 - 16 :10 :46-16 :10 :47 - Séparation de New York et de la Nouvelle-Angleterre,
 - 16 :10 :49 - Séparation de l'État de New York,
 - 16 :10 :50 - Séparation de l'Ontario et de l'enclave ouest de New York.
12. **16 :11 :22 - 16 :11 :57 (EDT) Formation d'enclaves dans l'État de New York.**
 - 16 :11 :22 - Séparation du sud-ouest du Connecticut et de la ville de New York,
 - 16 :11 :22 - 16 :11 :57 (EDT) Formation d'enclaves dans l'État de New York,
 - 16 :11 :57 - Séparation de l'Ontario et de l'est du Michigan.
13. **16 :13 (EDT) Région affectée par le black-out (50 Millions de personnes privées de courant).**

Au total, le black-out a conduit à la perte d'environ 61800 MW répartis comme suit :

- Midwest : 13000 M,
- Ontario : 20000 MW,
- PJM interconnexion : 4200 MW,
- New York : 22000 MW,
- Nouvelle-Angleterre : 2500 MW,
- Hydro Québec : 100 MW.

1.1.4.3 Causes du black-out et recommandations

Le 15 août, un groupe de travail a été créé ou États-Unis-Canada afin d'enquêter sur les causes de la panne courant et les moyens de réduire la possibilité de nouvelles pannes. Le groupe de travail est arrivé à la conclusion que la panne du 14 août 2003 était évitable. Plusieurs causes directes et facteurs déterminants ont été mis en évidence ; à savoir :

- Le défaut de maintenir un soutien en puissance réactive adéquat,
- Le dépassement des limites de sécurité d'exploitation prescrites,
- Un entretien déficient des couloirs de transport de l'électricité,
- Le manque de formation des opérateurs,
- Le défaut de reconnaître l'urgence de la situation et de communiquer cette information aux réseaux voisins,
- L'impossibilité d'obtenir une représentation du réseau de production-transport d'électricité à l'échelle régionale.

1.1.4.4 Mesures préventives

Le Groupe de travail, a pris des mesures préventives afin de réduire la probabilité d'un black-out, telles que :

- L'exploitation du réseau avec profil de tension élevé et plat,
- La mise en place d'un programme de délestage,
- L'élaboration d'un programme de séparation du réseau (îlotage),
- Le blocage des gradins de transformateurs,
- La production de la puissance réactive proche des points de consommation (afin d'éviter les transits de puissance réactive),
- La coordination des systèmes de protection,
- L'utilisation de dispositifs FACTS (afin de contrôler des flux de puissance).

1.1.5 Black-out Italien

En Italie, une gigantesque panne d'électricité a plongé dans l'obscurité durant plusieurs heures, le dimanche 28 septembre. Dans la suite immédiate, les Cadres d'opérateurs du système de transmission les' (TSO) des cinq pays impliqués (Autriche, France, Italie, Slovénie et Suisse) se sont réunis dans le cadre d'UCTE (Union for the Coordination of Electricity Transmission) et ont décidé d'installer un Comité indépendant de recherche d'UCTE. Afin d'apporter une explication transparente et

complète de la panne d'électricité aux autorités nationales, européennes et au général la communauté. Leur travail a été présenté par E.M. Michele [04] dans ce qui suit :

1.1.5.1 Situation du réseau Italien avant le Black-out

L'importation et la production locale d'énergie en Italie à 3h00 :

- L'importation physique totale vers l'Italie était 6 951 MW (300 MW par le lien Grèce-Italie),
- La charge totale de l'Italie était 27 444 MW, ceci est : 23 957 MW (excluant Sardegnia) et 3 charge de pompe de 487 MW,
- Génération totale de l'Italie 20 493 MW,
- Flux de puissance aux frontières avec l'Italie :(Suisse - Italie : 3610 MW, France - Italie : 2212 MW, Slovénie - Italie : 638 MW, Autriche - Italie : 191 MW, Grèce - Italie : 300 MW),
- Programmes dressés d'échange :(Suisse - Italie : 3068 MW, France - Italie : 2650 MW, Slovénie - Italie : 467 MW, Autriche - Italie : 223 MW, Grèce - Italie : 285 MW).

1.1.5.2 Séquence des événements

Les données de l'UCTE, TSO, sur les séquences des événements qui ont conduit au Blackout Italien sont comme suit :

- 03h01 : Un arc électrique avec un arbre sur la ligne transfrontalière Lavorgo-Mettlen, qui était trop chargée a mis cette ligne hors service. Puis prise de relais des autres lignes de cette charge (procédure habituelle),
- 03h02-03h08 : deux essais de l'opérateur suisse de restaurer la ligne qui échouent, à cause du déphasage angulaire,
- 03h10-03h21 : Un appel téléphonique de l'opérateur Suisse ETRANS à Rome faisant objet d'une demande de réduction des importations de l'Italie de 300 MW, car l'Italie importe en ce moment une puissance supérieure ou égale à celle-ci au de sous du plan prévisionnel,
- 03h21 : l'Italie réduit ses importations de 300 MW,
- 03h25 :21 : Déclenchement de la ligne suisse Sils - Soazzo (contact avec un arbre),
- 03h25 :25 : Déclenchement de la ligne Airolo-Mettlen (par protection sur surcharge),

Chapitre 1

- 03h25 :26 : Déconnexion automatique de la ligne Lienz (Au) - Soverzene (I) perte de synchronisme du réseau Italien,
- 03h25 :33 : Séparation du réseau italien par action normale des protections (au vu des tensions et courants, les protections des interconnexions "identifient" des courts-circuits). Ces séquences des événements sont illustrées sur la figure 1.5 [04].

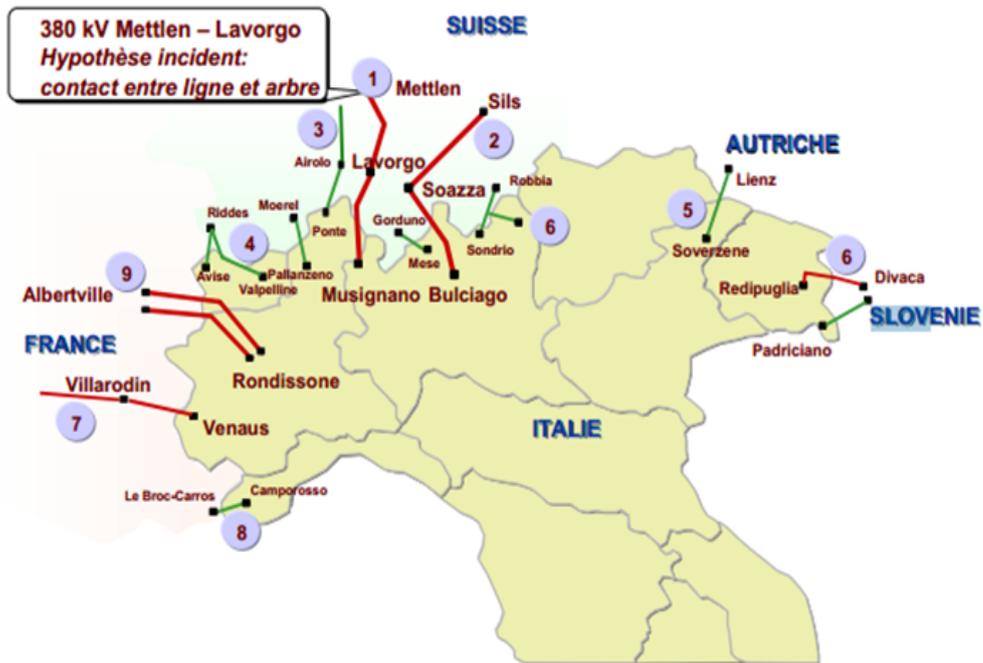


FIGURE 1.5 – Séquences des événements de black-out Italien.

- 03h28 : l'Italie continentale plonge dans le noir dans sa totalité. La figure 1.6 est prise par satellite la nuit de 28 Septembre 2003 [04].



FIGURE 1.6 – Black-out Italien vu par satellite la nuit du 28 septembre 2003.

1.1.5.3 Reprise de service en Italie

La reconstitution du réseau italien a débuté par la reconnexion progressive à partir de la France et la Suisse (4h05, 5h17, 6h45, 12h45), et la reprise progressive des importations de 6h (2100 MW) à 16h (6500 MW) [04].

1.1.5.4 Causes du Black-out Italien

Des températures élevées et une forte sollicitation du réseau suisse de transport d'électricité causent, la formation d'un arc électrique et un court-circuit dans la ligne à très haute tension du Lukmanier (380 kV). Un réenclenchement à brève échéance n'étant pas possible en raison de l'instabilité du réseau, les autres lignes de transport doivent absorber le flux de charge supplémentaire. Il en résulte une surcharge puis, environ une demi-heure plus tard, un effondrement en cascade sur toutes les lignes qui approvisionnent l'Italie. Mais les vrais raisons qui ont conduit aux Blackouts sont :

- La forte charge importée et la forte diminution de la production locale (mise en état repos de plusieurs centrales) la nuit de 28 septembre 2003,
- Le non-respect des limites techniques (charge des lignes) du réseau de transport transfrontalières,
- Elagage insuffisant des arbres aux alentours des lignes HT,
- Manque de collaboration entre les différents gérants des réseaux électriques Italien et Suisse, et la lenteur enregistrée dans la mise en application des mesures prises.

1.1.5.5 Évolution de la fréquence

La figure 1.7 montre une vue d'ensemble de ce qui s'est produit avec la fréquence en Italie au cours de la période de transition qui a commencé par le débranchage de l'Italie de 3h25 à 3h28.

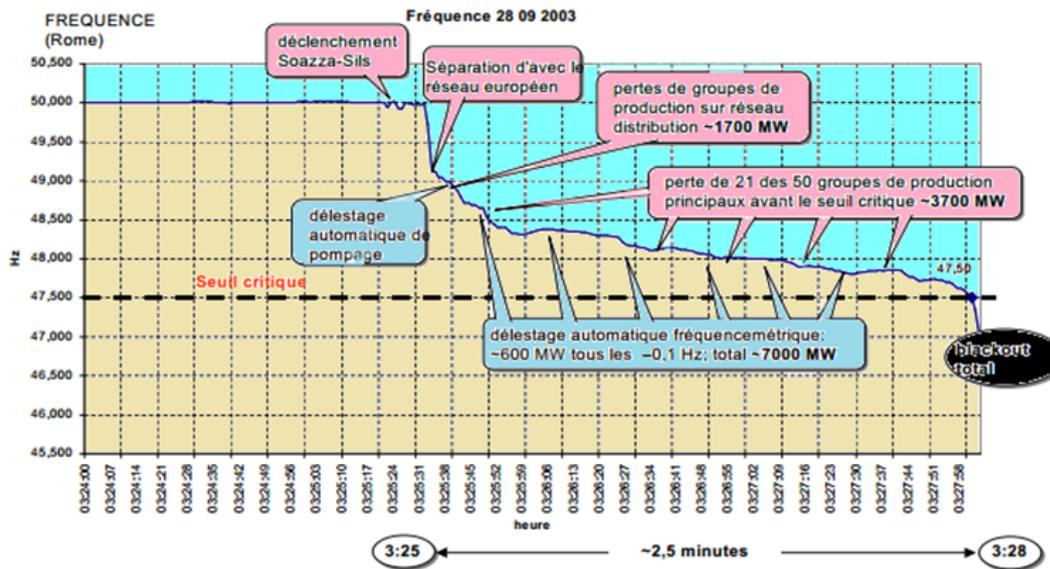


FIGURE 1.7 – Comportement de fréquence du réseau Italien dans la période transitoire.

1.1.6 Black-out Indien

Durant l'année 2012 une grande panne d'électricité a mis dans le noir près de 700 millions de personnes . Plusieurs parties du réseau Indien sont tombés en panne,on dénombre ,par le 30 juillet ceux de 14 territoires du Nord , puis 20 territoires le 31 juillet [05].

1.1.6.1 Déroulement de black-out Indien

- Le 30 juillet une première panne de courant est survenue à 2 h 35, dans 14 territoires du Nord de l'Inde : toutes les grandes centrales électriques des zones concernées ont cessé d'alimenter le réseau. Plus de 300 millions d'individus étaient sans courant.80 %du courant a été rétabli en 15 heures.
- Le 31 juillet une deuxième panne de courant est survenue à 13 h 32, près du Taj Mahal, entraînant en cascade des coupures sur les réseaux Nord- Est et nord-West de l'Inde. Plus de 670 millions de personnes ont été affectées, soit la moitié de la population.

1.1.6.2 Causes du Black-out Indien

Les causes exactes de ce black-out sont inconnues. Mais elles sont attribuées à une combinaison de facteurs structurels et conjoncturels :

- Une sécheresse a diminué en 2012 les capacités de production hydro-électriques,
- La capacité de production électrique de l'Inde est de 203 GW, pour une population de 1,2 milliard d'habitants ,
- Le système électrique de ce pays gigantesque est dans un état catastrophique : Les lignes à très haute tension sont mal interconnectées, le réseau qui dessert la population relève souvent de l'artisanat, voire du bricolage. Surtout, les capacités sont largement insuffisantes pour répondre à la demande, en particulier aux heures de pointe [05].

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons illustré les grands black-outs, à l'échelle mondiale dans un ordre chronologique, dans l'objectif de voir l'évolution de leur fréquence, par rapport aux périodes de développements du domaine du génie électrique, dans les années récentes. Ensuite, nous avons traité plus au moins en détail les trois grands black-outs de l'année 2003, à savoir :celui des Etats-Unis,de l'Italie et de l'Algérie, et le black-out de l'Inde 2012. Aussi nous avons présenté les techniques utilisées pour la remise en service, et le plan de défense du réseau électrique afin de stopper les incidents majeurs et de limiter leurs conséquences quand un enchaînement d'incidents est apparu et que le réseau se retrouve en situation d'instabilité.

Analyse des séries chronologiques et élaboration des Modèles de prévisions

Introduction

Les réseaux électriques sont un domaine d'exploitation très vaste, ils deviennent de plus en plus complexes surtout avec l'apparition de nouvelles sources d'énergie de natures diverses, et l'augmentation de dispositifs d'électronique de puissance qui servent d'interfaces de connexion ou de dispositifs de contrôle. De ce fait, des milliers de perturbations se produisent dans les réseaux électriques chaque année dans le monde. Certaines d'entre elles sont des black-outs, et qui causent d'énormes préjudices financiers et moraux. Depuis plus d'une vingtaine d'années, une grande attention est portée sur l'étude des réseaux électriques afin d'améliorer, leur qualité, leur sécurité et leurs performances. Effectivement ces conséquences ont suggéré quelques méthodes d'analyses économétriques, pour la prévision et la prévention des futurs black-outs.

Dans ce chapitre on a défini les modèles ARMA qui sont des généralisations directes des modèles introductifs, la combinaison des processus autorégressifs (AR) et moyennes mobiles (MA). Cette classe de processus ARMA est encore un cas particulier de processus linéaires et jouent un rôle prépondérant dans la modélisation concrète des processus stationnaires, et présente l'avantage d'être plus souple à l'utilisation et de fournir généralement de bonnes approximations des séries réelles avec moins de paramètres que les modèles purs. Puis nous abordons le problème de la prédiction sur ce modèle. En particulier, on expose la méthode de Box-Jenkins et le lissage exponentiel qui sont des méthodes de prévision les plus couramment utilisées.

Une série chronologique est une suite formée d'observations au cours du temps. Ces séries chronologiques peuvent être stationnaires ou non stationnaires. Beaucoup de techniques d'analyse statistique sont fondées sur l'hypothèse que les données sont stationnaires. Cependant, nous pouvons souvent transformer la série chronologique non stationnaire en série stationnaire en prenant la notation normale, différenciant ou en prenant des résiduels d'une régression et puis en stabilisant le désaccord à travers le temps. Bien que le caractère saisonnier viole également la stationnarité, nous pouvons habituellement appliquer un ajustement saisonnier et le rendre favorable à l'analyse de série chronologique. Une partie importante de l'analyse des séries chronologiques est consacrée aux modèles linéaires ARMA.

L'objectif de ce chapitre est de montrer l'intérêt des modèles ARMA, qui offrent les meilleures prévisions. Afin de proposer un nouveau système qui devrait ajuster la situation des réseaux électriques en temps réel, et assurer le point de fonctionnement du réseau dans un régime stable, et d'éviter les black-outs dans un maximum de cas.

2.1 Définition série temporelle et conception de stationnarité

Une série temporelle est une suite de nombres réels, indexés par les entiers relatifs tels que le temps. Pour chaque instant du temps, la valeur de la quantité étudiée x_t est appelée variable aléatoire. L'ensemble des valeurs x_t quand t varie est appelé processus aléatoire $\{x_t, t \in T\}$.

La stationnarité joue un rôle central dans la théorie des processus, car elle remplace (de façon naturelle) l'hypothèse d'observation i.i.d (identiquement distribuées indépendantes) en statistique. Dans ce chapitre on a introduit les éléments et les notions de processus, de séries chronologiques ainsi que le concept de stationnarité.

2.2 Processus fortement stationnaires, et les processus faiblement stationnaires

Soit un processus temporel aléatoire $(Y_t; t \in \mathbb{Z})$:

- (Y_t) , avec $t \in \mathbb{Z}$, est un processus stationnaire au sens strict, si $\forall n \in \mathbb{N}$, $\forall (t_1, \dots, t_n)$, $\forall h \in \mathbb{Z}$, la loi de (Y_{t_1}, Y_{t_n}) est identique à la loi de $(Y_{t_1+h}, \dots, Y_{t_n+h})$,

- (Y_t) est un processus stationnaire au sens strict si et seulement si la loi de (Y_t) est identique à la loi de (Y_{t+h}) , où $Y_t = Y_{t+h}$, $t \in \mathbb{Z}, \forall h \in \mathbb{Z}$ (Théorème de Kolmogorov).
- Un processus $((Y_t), t \in \mathbb{Z})$ est dit stationnaire au second ordre, ou un processus faiblement stationnaire, s'il vérifie les conditions suivantes :
 1. $\forall t \in \mathbb{Z}, \mathbb{E}(Y_t) = m$;
 2. $\forall t \in \mathbb{Z}, \mathbb{V}(Y_t) = \sigma^2 = \gamma(0)$;
 3. $\forall t \in \mathbb{Z}, \text{Cov}(Y_t, Y_{t+h}) = \gamma(h)$; indépendant de t ; (h) est l'autocovariance d'ordre h ;
 4. $|\gamma(n)| \leq \gamma(0), \forall n \in \mathbb{Z}$;
 5. $\gamma(n) = \gamma(-n), \forall n \in \mathbb{Z}$;
 6. $\rho(n) = \gamma(n)/\gamma(0), \forall n \in \mathbb{Z}$ (Fonction d'auto-corrélation).

2.3 Processus bruit blanc (white noise)

On appelle "Bruit Blanc", tout processus stationnaire, centré et non-autocorrélé BB $(0, \sigma^2)$ [06]. Soit (ε_t) un tel processus; nous avons donc :

1. $\mathbb{E}(\varepsilon_t) = 0$;
2. $\text{Var}(\varepsilon_t) = \sigma^2$;
3. $\rho(h) = 0$; Pour tout $h \neq 0$

Remarque Un processus de **bruit blanc** est une suite de variables aléatoires $(Y_t)_{t \in \mathbb{Z}}$ indépendantes, d'espérance et de variance constantes. Si l'espérance est nulle, le bruit blanc est centré, et si les variables aléatoires sont gaussiennes, le bruit blanc est gaussien.

- Un processus $(Y_t)_{t \in \mathbb{Z}}$ est un processus gaussien si pour tout n -uplet d'entiers relatifs t_1, \dots, t_n , $(Y_{t_1}, \dots, Y_{t_n})$ est un vecteur gaussien (assuré par le théorème de Kolmogorov),
- Un processus gaussien est entièrement caractérisé par son espérance et sa fonction d'autocovariance[07],
- Soit une série chronologique $(Y_t)_{t \in \mathbb{Z}}$ de variance finie. La fonction d'autocovariance $\gamma(t, s)$ est une application de $\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}$ dans \mathbb{R} définie par :

$$\gamma(t, s) = \mathbb{E}((Y_t - \mathbb{E}(Y_t))(Y_s - \mathbb{E}(Y_s))) = \text{Cov}(Y_t, Y_s). \quad (2.1)$$

Lorsque $t = s$ il s'agit simplement de la variance du processus à l'instant t .

2.4 Fonction d'autocovariance, d'autocorrélation et corrélogramme

2.4.1 Fonction d'autocorrélation (ACF)

Définition 1

fonction d'autocorrélation d'un processus stationnaire est la fonction de \mathbb{Z} dans \mathbb{R} définie par

$$\rho(k) = \frac{\text{Cov}(Y_t, Y_{t-k})}{\text{Var}(Y_t)} = \frac{\gamma(k)}{\gamma(0)}. \quad (2.2)$$

La proposition suivante est immédiate :

Proposition

La fonction d'autocorrélation d'un processus stationnaire vérifie :

$$-1 \leq \rho(k) \leq 1, \forall k \in \mathbb{Z}.$$

$$\rho(k) = \rho(-k), \forall k \in \mathbb{Z}.$$

On note que $\rho(0) = 1$ en toute circonstance !

Définition 2

De par la parité de cette fonction, la représentation graphique se réalise uniquement sur l'ensemble des entiers positifs ou nul et s'appelle le corrélogramme.

2.4.2 Fonction d'autocorrélation partielle (PACF)

La fonction d'autocorrélation partielle d'un processus stationnaire est définie par :

$$\psi(h) = \frac{|\mathbb{R}^*(h)|}{|\mathbb{R}(h)|}. \quad (2.3)$$

Avec : $\mathbb{R}(h) = \begin{pmatrix} 1 & \rho_1 & \dots & \rho_{h-1} \\ \dots & \dots & & \dots \\ \dots & & & \dots \\ \dots & & \dots & \dots \\ \rho_{h-1} & \rho_{h-2} & \dots & 1 \end{pmatrix}$

$\mathbb{R}^*(h)$ est obtenue en remplaçant la dernière colonne de $\mathbb{R}(h)$ par le vecteur $[\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_h]$.

2.5 Intervalle de confiance de la prévision

- Soit un couple (X, Y) où X, Y sont des variables aléatoires indépendantes, pour lequel, on cherche une relation du type :

$$Y_i = a + b(x) + \varepsilon_i, i=1, \dots, n. \text{ avec } : EY_i = a + b(x),$$

$$V(Y)_i = \sigma^2, 1, \dots, n.$$

La solution de $(Y)_i$ nous permet de déterminer les intervalles de confiance pour les paramètres a, b , au niveau α :

$$a \in \left[\hat{a} \pm \frac{s}{\sqrt{n}} \sqrt{1 + \frac{\bar{s}^2}{s_x^2}} \phi\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right]. \quad (2.4)$$

$$b \in \left[\hat{b} \pm \frac{s}{\sqrt{ns_x^2}} \phi\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right]. \quad (2.5)$$

- D'après le théorème de normalité asymptotique des équations de Yule-Walker [07], on a directement, pour un processus $AR(p)$, un théorème central limite pour les pacf empiriques

$$\hat{\phi}_{hH}, h > p, \sqrt{T} \hat{\phi}_{hH} \longrightarrow N(0, 1).$$

pour $T \rightarrow \infty$

On peut donc à présent construire des intervalles de confiance pour le test de Khi2 :

$$\begin{cases} H_0 : Y_t \sim AR(p) \\ H_0 : \text{nom } H_0 \end{cases}$$

En effet, sous H_0 , la probabilité que la suite des autocorrélations partielles empiriques se trouve, pour $h > p$, dans l'intervalle :

$$\left[\frac{-1.96}{\sqrt{T}}, \frac{1.96}{\sqrt{T}} \right].$$

2.6 Corrélogramme et opérateur retard

1. On appelle le graphe obtenu par l'estimation des modèles (AR, MA...) des corrélogrammes, qui sont des outils privilégiés dans l'identification de ces modèles.

2. On introduit un opérateur retard L ou B (pour Lag ou pour Backward) tel que :

$$Ly_t = y_{t-1}.$$

Si on applique h fois cet opérateur, on décale le processus d'h unités de temps :

$$\underbrace{L(L(L \dots L(Y_t) \dots))}_{h \text{ fois}} = L^{h(Y_t)} = Y_{t-h}. \quad (2.6)$$

2.7 Principaux modèle statistique pour l'étude des séries temporelles

Certains chercheurs [08], en 1927 ont ouvert une autre voie. Yule a introduit dans la littérature des modèles autorégressifs, étant données deux valeurs initiales, la suite présente un comportement saisonnier, fonction des paramètres α et β , en considérant des modèles de la forme :

$$Y_t = \alpha Y_{t-1} + \beta Y_{t-2}. \quad (2.7)$$

L'auteur remarque qu'en fait, le comportement dépend des racines (complexes) de l'équation $Z^2 - \alpha z - \beta = 0$, et plus particulièrement de leur position par rapport au disque unité. Si leur module est inférieur à 1, alors on observe un comportement sinusoidal amorti. En fait, la forme générale des solutions sera :

$$Y_t = A\rho^t \cos(w - \theta). \text{ Lorsque } 0 < \frac{1}{2} < 1$$

Le modèle autorégressif proposé par Yule est le suivant :

$$Y_t = \phi_1 Y_{t-1} + \phi_2 + \varepsilon_t. \quad (2.8)$$

où (ε_t) correspond à un bruit blanc et les sont des réels.

Ensuite Slutsky a introduit les moyennes mobiles en 1927, et la forme générale était la suivante :

$$Y_t = \mu_0 \varepsilon_t + Y_{t-1} + \mu_1 + \varepsilon_{t-1} + \dots + \mu_q + \varepsilon_{t-q}. \quad (2.9)$$

Cette écriture a suggéré d'élargir la relation (2.8) sous une forme proche de (2.9), à savoir :

$$\phi_0 Y_t + \phi_1 Y_{t-1} + \dots + \phi_p Y_{t-p} = \varepsilon_t. \quad (2.10)$$

Les processus introduits par Yule deviendront les processus AR (p) et ceux introduits par Slutsky, sont les processus MA(q). L'analogie entre les deux processus

sera même poussée plus loin lorsqu'il sera montré que les processus AR (p) et MA (q) sont respectivement des processus $MA(\infty)$ et $AR(\infty)$, sous certaines conditions [08].

2.7.1 Processus AR(p)

On appelle processus autorégressif d'ordre p, noté AR(p), un processus stationnaire Y_t vérifiant une relation du type [09, 10] :

$$Y_t \sum_{i=1}^p \phi_i Y_{t-i} = \varepsilon_t : \forall t \in \mathbb{Z}. \quad (2.11)$$

où les ϕ_i sont des réels, $\phi_p \neq 0$ et $\{\varepsilon_t\}_{t \in \mathbb{Z}}$ est un bruit blanc de variance σ^2 .

$$\iff \phi_1 L - + \phi_p L^p Y_t = \varepsilon_t \iff \phi_L Y_t = \varepsilon_t. \quad (2.12)$$

2.7.1.1 Propriétés des autocorrélations - les équations de Yule-Walker

En multipliant par Y_t l'équation (2.8), on obtient :

$$\begin{aligned} Y_t^2 &= \phi_1 Y_{t-1} Y_t + \phi_2 Y_{t-2} Y_t + \dots + \phi_p Y_{t-p} Y_t + \varepsilon_t Y_t; \\ &= \phi_1 Y_{t-1} Y_t + \phi_2 Y_{t-2} Y_t + \dots + \phi_p Y_{t-p} Y_t + \varepsilon_t (\phi_1 Y_{t-1} + \phi_2 Y_{t-2} + \dots + \phi_p Y_{t-p} + \varepsilon_t); \\ &= \phi_1 Y_{t-1} Y_t + \phi_2 Y_{t-2} Y_t + \dots + \phi_p Y_{t-p} Y_t + \varepsilon^2 + [\phi_1 Y_{t-1} + \phi_2 Y_{t-2} + \dots + \phi_p Y_{t-p}] \varepsilon_t. \end{aligned}$$

D'où, en prenant l'espérance : $\gamma(0) = \phi_1 \gamma(1) + \phi_2 \gamma(2) + \dots + \phi_p \gamma(p) + \sigma^2 + 0$.

Le dernier terme étant nul car est supposé indépendant du passé de

$Y_t; \{Y_{t-1}, Y_{t-2}, \dots, Y_{t-p}, \dots\}$.

De plus, en multipliant (2.9) par Y_{t-h} , en prenant l'espérance et en divisant par $\gamma(0)$.

On obtient :

$$\sum_{i=1}^p \phi_i \rho_{h-1} = 0. \quad \text{Pour tout } h > 0 \quad (2.13)$$

Cette suite d'équations définit le système d'équations dit de Yule-Walker [08].

2.7.1.2 Processus AR(1)

La forme générale des processus de type AR(1) est : $Y_t - \phi_1 Y_{t-1} = \varepsilon_t$ pour tout $t \in \mathbb{Z}$, où (ε_t) est un bruit blanc de variance σ^2 [10, 11].

Chapitre 2

- Si $|\phi| \neq 1$, le processus (Y_t) n'est pas stationnaire : Par exemple, pour $\phi = 1$, peut s'écrire : $Y_t - Y_{t-1} = \varepsilon_t + \varepsilon_{t-1} + \dots + \varepsilon_{t-h+1}$, et donc

$$\mathbb{E}(Y_t - Y_{t-h})^2 \leq h\sigma^2.$$

Où pour un processus stationnaire, il est possible de montrer que :

$$\mathbb{E}(Y_t - Y_{t-h})^2 \leq 4V(Y_t).$$

Puisqu'il est impossible que pour tout h , $h\sigma^2 \leq 4V(Y_t)$, le processus n'est pas stationnaire.

- Si $|\phi| \neq 1$, il existe un unique processus stationnaire tel que

$$Y_t - \phi Y_{t-1}.$$

Pour tout $t \in \mathbb{Z}$, où $(1 - \phi L)Y_t = \varepsilon_t$.

- Si $|\phi| < 1$, alors on peut inverser le polynôme,

$$Y_t = (1 - \phi L)^{-1} \varepsilon_t = \sum_{i=1}^{\infty} \phi^i \varepsilon_{t-i}.$$

- Si $|\phi| > 1$, alors on peut inverser le polynôme,

$$Y_t = -\frac{1}{\phi} F(1 - \frac{1}{\phi} F)^{-1} \varepsilon_t = -\sum_{i=0}^{\infty} \phi^{-i} \varepsilon_{t-i}.$$

La représentation canonique est alors :

$$Y_t - \frac{1}{\phi} Y_{t-1} = \eta_t.$$

Où

$$\eta_t = (1 - \phi F)(1 - \phi L)^{-1} \varepsilon_t = \phi \varepsilon_{t+1} + (1 - \phi^2) \sum_{i=0}^{\infty} \phi^2 \varepsilon_{t-i}.$$

2.7.2 Processus MA(q)

On appelle processus moyenne mobile d'ordre q , noté MA(q) pour Moving Average, un processus $\{Y_t\}_{t \in \mathbb{Z}}$ défini par :

$$Y_t = \sum_{i=1}^{\infty} \theta \varepsilon_{t-i} \quad \forall t \in \mathbb{Z}. \quad (2.14)$$

où les θ_i sont des réels, $\theta_q \neq 0$ et $\{\varepsilon_t\}_{t \in \mathbb{Z}}$ est un processus bruit blanc de variance σ^2 .

$$\Leftrightarrow Y_t = (1 - \theta_1 L - \dots - \theta_q L^q) \varepsilon_t \Leftrightarrow Y_t = \theta_L \varepsilon_t.$$

2.7.2.1 Propriétés des autocorrélations

La fonction d'autocovariance est donnée par :

$$\begin{aligned} \gamma_h &= \mathbb{E}(Y_t Y_{t-h}); \\ &= \mathbb{E}([\varepsilon_t + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \dots + \theta_q \varepsilon_{t-q}][\varepsilon_{t-h} + \theta_1 \varepsilon_{t-h-1} + \dots + \theta_q \varepsilon_{t-h-q}]); \\ &= \begin{cases} [\theta_h + \theta_{h+1} \theta_1 + \dots + \theta_q \theta_{q-h}] \sigma^2 & \text{si } 1 \leq h \leq q \\ 0 & \text{si } h > q \end{cases} \end{aligned}$$

avec, pour $h = 0$, la relation : $[1 + \theta_1^2 + \theta_2^2 + \dots + \theta_q^2] \sigma^2$, peut se réécrire :

$$\gamma(k) = \sigma^2 \sum_{j=0}^q \theta_j \theta_{j+k}, \text{ avec la convention } \theta_q = 1. \text{ D'où la fonction d'autocovariance :}$$

$$\gamma(h) = \frac{\theta_h + \theta_{h+1} \theta_1 + \dots + \theta_q \theta_{q-h}}{1 + \theta_1^2 + \theta_2^2 + \dots + \theta_q^2}. \text{ Si } 1 \leq h \leq q \text{ et } \rho(h) = 0 \text{ pour } h > q \quad (2.15)$$

On peut noter en particulier que $\gamma(q) = \sigma^2 \theta_q \neq 0$, alors que $\gamma(q+1) = 0$. Cette propriété sera relativement pratique pour faire l'estimation de l'ordre de processus MA.

2.7.2.2 Processus MA(1)

La forme générale des processus de type MA(1) est : $Y(t) = \varepsilon_t + \theta \varepsilon_{t-1}$ pour tout $t \in \mathbb{Z}$. où (ε_t) est un bruit blanc de variance σ^2 .

Les autocorrélations sont données par : $\rho(1) = \frac{\theta}{1+\theta^2}$ et $\rho(h) = 0$, pour $h \geq 2$.

On peut noter que $-\frac{1}{2} \leq \rho(1) \leq \frac{1}{2}$: les modèles MA(1) ne peuvent pas avoir de fortes autocorrélations à l'ordre 1.

L'autocorrélation partielle à l'ordre h est donnée par : $\phi(h) = \frac{(-1)^h \theta^h (\theta^2 - 1)}{1 - \theta^{2(h+1)}}$, et plus généralement, les coefficients de régression sont donnés par :

$$a_i(h) = -\frac{(-1)^i \theta^i}{1 - \theta^{2h+2-i}} + \frac{(-1)^i \theta^i}{1 - \theta^{2h+2}}, \text{ dans le cas où } \theta \neq 1.$$

La densité spectrale d'un processus MA(1) est de la forme :

$$f_x(h) = \frac{\sigma^2}{2\pi} [(1 + \theta^2) + 2\theta \cos w]. \quad (2.16)$$

Les autocorrélations inverses, dans le cas d'un processus MA(1) vérifient :

$$\rho_i(h) = \left[\frac{\theta}{1 + \theta^2} \right]^h. \text{ Pour } h \geq 1 \quad (2.17)$$

2.8 Processus ARMA

Les processus ARMA généralisent simultanément les modèles AR purs et les MA purs. Ces modèles présentent l'avantage d'être plus souples d'utilisation et de fournir généralement de bonnes approximations des séries réelles avec moins de paramètres que les modèles AR ou MA pure [12].

2.8.1 Définition

Un processus stationnaire admet une représentation ARMA minimale :

$$Y(t) - \sum_{i=1}^q \phi Y_{t-1} = \varepsilon_t + \sum_{i=1}^q \theta_i \varepsilon_{t-i} \Leftrightarrow \phi(L)Y_t \varepsilon_t = \theta(L)\varepsilon_t$$

pour tout $t \in \mathbb{Z}$, où les θ_i sont des réels ε_t est un bruit blanc de variance σ^2 .

Et

$$\begin{cases} \theta(L) = \Pi + \theta_1 L + \dots + \theta_q L^q \\ \phi(L) = \Pi - \phi_1 L - \dots - \phi_p L^p \end{cases}$$

S'il satisfait les conditions suivantes :

- $\phi_p \neq 0, \phi_q \neq 0$;
- Les polynômes ϕ et θ ont toutes leurs racines de module strictement supérieur à 1 ;
- ϕ et θ n'ont pas de racine commune ;
- ε_t est un bruit blanc, de variance $\sigma^2 \neq 0$.

On remarque qu'on aurait pu définir une représentation plus générale permettant de considérer des processus stationnaires non centrés. Par exemple :

$$Y_t - \sum_{i=1}^q \phi Y_{t-1} = \varepsilon_t = \theta^* \sum_{i=1}^q \theta_i \varepsilon_{t-i}. \quad (2.18)$$

On se ramène directement au cas défini précédemment en remplaçant Y_t par :

$$Y_{t-1} - \mathbb{E}Y_t = Y - \frac{\theta^*}{\sum_j \phi_j} = \frac{\theta^*}{\phi(1)}. \quad (2.19)$$

La condition (2) assure tout d'abord que la représentation ARMA admet une solution stationnaire (si les racines de ϕ sont de module différent de 1), que cette

Chapitre 2

solution stationnaire MA(∞) fait intervenir que des valeurs passées du bruit (les racines de ϕ sont à l'extérieur du disque unité), que la représentation AR(∞) ne fait intervenir que des valeurs présentes et passées de Y_t (les racines de θ sont de module strictement supérieur à 1). Ainsi ε_t est le processus d'innovation du processus Y_t .

La condition (3) assure que la représentation est unique, sinon il y aurait des simplifications possibles. À l'extérieur du disque unité), que la représentation AR(∞) ne fait intervenir que des valeurs présentes et passées de Y_t (les racines de θ sont de module strictement supérieur à 1). Ainsi ε_t est le processus d'innovation du processus Y_t .

2.8.2 Propriétés des autocorrélations

– **Propriété 1**

Soit Y_t , un processus ARMA(p,q), alors les autocovariances γ_t satisfont

$$\gamma_t - \sum_{i=1}^p \phi_i \gamma(t-i) = 0 ; \text{ Pour } h \geq q+1 \quad (2.20)$$

– **Propriété 2**

Soit Y_t , un processus ARMA(p,q), alors les autocovariances γ_t satisfont

$$\gamma_t - \sum_{i=1}^p \phi_i \gamma(t-i) = \sigma^2 [\theta_h + h_1 \theta_{h+1} + \dots + h_{q-h} \theta_q]. \text{ Pour } 0 \leq h \leq q \quad (2.21)$$

Où, les h_i correspondent aux coefficients de la forme MA(∞) de (Y_t).

$$Y_t = \sum_{j=0}^{+\infty} Y_j \varepsilon_{t-j}. \quad (2.22)$$

2.8.3 Processus ARMA(1,1)

Soit ($X - t$) est un processus ARMA(1,1) défini par : $Y_t - \phi Y_{t-1} = \varepsilon_t + \theta \varepsilon_{t-1}$, pour tout t, où $\phi \neq 0$, $\theta \neq 0$, $|\phi| < 1$ et $|\theta| < 1$. Ce processus peut se mettre sous forme

AR(∞), puisque

$$(1 - \phi L)(1 - \theta L)^{-1} Y_t = \Pi(L) Y_t = \varepsilon - t.$$

Où $\Pi(L) = (1 - \phi L)[1 - \theta L + \theta^2 L^2 + \dots + (-1)^h \theta^h L^h + \dots]$.

Chapitre 2

Aussi : $\Pi(L) = (1 - \phi L) = \sum_{i=0}^{+\infty} \pi_i L^i$.

où :

$$\begin{cases} \pi_0 = 1 \\ \pi_i = (-1)^i [\phi + \theta] \theta^{i-1} \quad \text{pour } i \geq 1 \end{cases}$$

La fonction d'autocorrélation s'écrit :

$$\begin{cases} \rho(1) = \frac{\phi\theta(\phi+\theta)}{[1+\theta^2+2\phi\theta]} \\ \rho(h) = \phi^h \rho(1) \quad \text{pour } h \geq 2 \end{cases}$$

On récapitule les caractéristiques des modèles suivants :

Modèle	MA(q)	Ar(p)	ARMA (p, q)
auto-covariance	$\sigma(h) = 0 \quad \forall h > q$	$\lim_{h \rightarrow \infty} \sigma(h) = 0$	$\forall h > q, \lim_{h \rightarrow \infty} \sigma(h) = 0$
auto-corrélation	$\rho(h) = 0 \quad \forall h > q$	$\lim_{h \rightarrow \infty} \rho(h) = 0$	$\forall h > q, \lim_{h \rightarrow \infty} \rho(h) = 0$
auto-corrélation partielle	$\lim_{h \rightarrow \infty} r(h) = 0$	$r(h) = 0 \quad \forall h > p$ et $r(p) = a_p$	

TABLE 2.1 – Récapitulatif les propriétés des processus MA(q), AR(p) et ARMA (p,q).

2.9 Tests d'adéquation (de validation) du modèle

- La signification statistique commune du $\hat{\rho}_1, \dots + \hat{\rho}_k$ peut être utilisée et examinée par la statistique de Box-Pierce, qui est sous la forme :

$$Q = T \sum_{i=1}^k r_i^2. \tag{2.23}$$

L'hypothèse H_0 que le processus est un bruit blanc .

- Box et Ljung ont proposé une statistique modifiée visant à tenir compte de cette différence. Cette statistique est définie par :

$$Q' = T(T + 2) \sum_{i=1}^k \frac{r_i^2}{T - 1}. \quad (2.24)$$

Où est le nombre d'observations de la série et r_i l'estimateur de ρ_i . Q' suit approximativement sous l'hypothèse de H_0 .

2.10 Modèles non stationnaires

Les méthodes présentées précédemment sont applicables à des processus stationnaires du second ordre pour lesquels on se satisfait d'un prédicteur linéaire. Les modèles ARMA stationnaires proposés sont représentables sous forme d'un filtre linéaire dont les coefficients forment une série sommable. Pour combiner les méthodes d'ajustement des modèles ARMA et pour le traitement des composantes non stationnaires, notamment tendances, et saisonnalités ; on introduit deux autres modèles dits non stationnaires à savoir : ARIMA et SARIMA. ARIMA est associé au modèle ARMA avec processus de tendance, quant à SARIMA il est associé à ARIMA avec processus de saisonnalité [13, 14].

2.10.1 Processus ARIMA (p,d,q)

L'hypothèse de stationnarité, présente - sous certaines conditions - dans les modèles ARMA, n'est que rarement vérifiée pour des séries économiques. En revanche, on peut considérer les différences premières $\Delta Y_t = Y_t - Y_{t-1}$, ou des différences à des ordres plus élevés ,

$$\begin{cases} \Delta Y_t = Y_t - Y_{t-1} = (1-L)Y_t \\ \Delta^d Y_t = (1-L)^d Y_t \end{cases}$$

Avec L représente l'opérateur retard Δ^d , est l'opérateur de différenciation à l'ordre d .

Un processus (Y_t) est un processus ARIMA - autorégressif moyenne mobile intégré - s'il vérifie une équation du type :

Chapitre 2

$$\phi(L)(1-L)^d Y_t = \theta(L)\varepsilon_t \text{ pour tout } t \geq 0.$$

$$\text{où } \begin{cases} \phi(L) = \Pi - \phi_1 L - \phi_2 L^2 + \dots - \phi_p L^p \text{ où } \phi_p \neq 0 \\ \theta(L) = \Pi + \theta_1 L + \theta_2 L^2 + \dots + \theta_q L^q \text{ où } \theta_q \neq 0 \end{cases}$$

sont des polynômes dont les racines sont de module supérieur à 1, et où les conditions initiales.

$$Z_{-1} = \{Y_{-1}, \dots, Y_{-p}, \varepsilon_{-1}, \dots, \varepsilon_{-q}\}$$

sont non-corrélées avec $\varepsilon_0, \dots, \varepsilon_t, \dots$ et où le processus (ε_t) est un bruit blanc de variance σ^2 . On a :

$$\begin{aligned} \Delta Y_t &= Y_t - Y_{t-1} = (1-L)Y_t; \\ \Delta^2 Y_t &= \Delta(\Delta Y_t) = \Delta(Y_t - Y_{t-1}); \\ &= (Y_t - Y_{t-1}) - (Y_{t-1} - Y_{t-2}); \\ &\vdots \\ D'où : \Delta^d Y_t &= (1-L)^d Y_t. \end{aligned}$$

Donc on peut écrire le modèle ARIMA sous la forme suivante :

$$\phi(L)\Delta^d Y_t = \theta(L)\varepsilon_t.$$

2.10.2 Modèles SARIMA

Les modèles SARIMA peuvent être vu comme une généralisation des modèles ARIMA, contenant une partie saisonnière.

Un processus (Y_t) est un processus SARIMA autorégressif moyenne mobile intégré saisonnier [15], s'il vérifie une équation du type :

$$\phi(L)(1-L^{s_1})\dots(1-L^{s_n})X_t = \theta(L)\varepsilon_t \text{ pour tout } t \geq 0.$$

$$\text{Où : } \begin{cases} \phi(L) = \Pi - \phi_1 L - \phi_2 L^2 + \dots - \phi_p L^p \text{ où } \phi_p \neq 0 \\ \theta(L) = \Pi + \theta_1 L + \theta_2 L^2 + \dots + \theta_q L^q \text{ où } \theta_q \neq 0 \end{cases}$$

Sont des polynômes dont les racines sont de module supérieur à 1, et où les conditions initiales.

$Z_{-1} = \{Y_{-1}, \dots, Y_{-p}, \varepsilon_{-1}, \dots, \varepsilon_{-q}\}$ sont non-corrélées avec $\varepsilon_0, \dots, \varepsilon_t, \dots$ et où le processus (ε_t) est un bruit blanc de variance σ^2 .

Cette forme inclue les modèles ARIMA puisqu'il suffit de prendre $n=d$ et $s_1=s_n=1$.

Toutefois, les deux formes les plus utilisées sont les suivantes :

$$\phi(L)(1 - L^s)Y_t = \theta(L)\varepsilon_t. \text{ Pour } t \geq 0 \quad (2.25)$$

$$\phi(L)(1 - L^s)(1 - L)^d Y_t = \theta(L)\varepsilon_t. \text{ Pour } t \geq 0 \quad (2.26)$$

Où un seul facteur saisonnier s intervient, soit appliqué à un processus ARMA dans le premier cas, soit appliqué à un processus ARIMA dans le second cas :

On a : $\Delta_s Y_t = Y_t - Y_{t-s} = Y_t - L^s Y_t = (1 - L^s)Y_t$.

Dans le cas, où l'opérateur de différenciation saisonnière est ordre s :

$$\Delta_s^s Y_t = (1 - L^s)^s Y_t.$$

D'où on peut écrire le modèle SARIMA sous la forme suivante :

$$\phi(L)\Delta_s^s Y_t = \theta(L)\varepsilon_t \Leftrightarrow \phi(L)(1 - L^s)^s Y_t = \theta(L)\varepsilon_t.$$

2.10.3 Lissage exponentiel

Les méthodes de lissages exponentiels constituent un outil permettant de réaliser des prévisions à partir de l'observation d'une série temporelle. Ces méthodes étant relativement basiques et simples de mise en œuvre, elles sont souvent utilisées dans l'industrie, notamment lorsque le nombre de prévisions à réaliser est important [16]. On distingue trois types de lissage exponentiel :

2.10.3.1 Lissage exponentiel simple

Le lissage exponentiel simple est le plus ancien, il sert à faire les prévisions à court terme, et consiste à ajuster localement à la série temporelle une constante. La prévision $\hat{X}_T(h)$ fournie par la méthode de lissage exponentiel simple, avec la constante de lissage β , $0 < \beta < 1$ est :

$$\hat{X}_T(h) = (1 - \beta) \sum_{j=0}^{T-1} \beta^j X_{T-j}. \quad (2.27)$$

On donne un poids d'autant moins important que les observations sont loins (dans le passé), avec une décroissance exponentielle :

Chapitre 2

- Si β proche de 1 : prise en compte de tout le passé,
- Si β proche de 0 : prise en compte d'avantage des valeurs récentes.

2.10.3.2 Lissage exponentiel double

Le lissage exponentiel simple est adapté à des séries pouvant être ajustées par une constante au voisinage de T . Le principe de lissage exponentiel double permet de faire un ajustement par une droite, à s'avoir : approcher X_T par Y_t où $Y_t = A(t-T)B$.

La prévision à horizon h s'écrit : $F_{T+h} = \hat{X}_T(h) = \hat{A}(T) + h\hat{B}(T)$.

2.10.3.3 Lissage exponentiel multiple, ou généralisé

- Le lissage exponentiel multiple (généralisé) a été proposé par Brown en 1962, il permet d'ajuster au voisinage de T une fonction plus complexe qu'une fonction parente. La résolution de ce problème repose sur la notion de vecteurs de fonctions à matrice de transition fixe.
- Le vecteur $f(t) = [f_1(t), \dots, f_n(t)]'$, où $t \in \mathbb{Z}$ est dit matrice de transition fixe s'il existe une matrice régulière telle que $f(t) = Af(t-1)$ pour tout $t \in \mathbb{Z}$.
- La méthode du lissage exponentiel généralisé consiste à ajuster au voisinage de de la série X_t une fonction $\phi(t-T)$ de la forme : $\phi(t) = \sum_{i=1}^n \alpha_i f_i(t)$.
Avec : $f_i(t)$ sont la matrice de transition fixe, et $\phi(t)$ comprennent la plupart des fonctions usuelles.

2.11 Modèles de Box Jenkins

Les modèles de prévision de Box et Jenkins (1970) sont basés sur des concepts et principes statistiques (AR, MA, ARMA, ARIMA, SARIMA). Ils sont capables de modéliser le comportement d'un large spectre de séries chronologiques.

On se place dans le cas où le processus stochastique généré Y_t est supposé discret et stationnaire [17].

2.11.1 Processus moyenne mobile d'ordre 1 ou MA(1)

C'est le processus où la variable Y_t est une combinaison linéaire de deux innovations successives qui s'écrit :

$$Y_t = \varepsilon_t - \theta\varepsilon_{t-1} = (1 - L\theta)\varepsilon_t, |\theta| < 1 \text{ (Condition d'inversibilité).}$$

Si le processus où la variable Y_t est fonction de plusieurs erreurs passées ordre q , il s'écrit sous la forme :

$$Y_t = \varepsilon_t - \theta_1\varepsilon_{t-1} - \theta_2\varepsilon_{t-2} - \dots - \theta_q\varepsilon_{t-q} = (1 - \theta_1L - \theta_2L^2 - \dots - \theta_qL^q)\varepsilon_t. \quad (2.28)$$

2.11.2 Processus autorégressif d'ordre 1 ou AR(1)

C'est le processus où la variable Y_t est définie par son propre passé par une formule de régression linéaire qui s'écrit :

$$Y_t = \phi Y_{t-1} + \varepsilon_t, |\theta| < 1 \text{ (Condition de stationnarité).}$$

Si le processus utilise plusieurs variables du passé d'ordre p , il s'écrit :

$$Y_t = \phi_1 Y_{t-1} + \phi_2 Y_{t-2} + \dots + \phi_p Y_{t-p} + \varepsilon_t. \quad (2.29)$$

2.11.3 Processus mixte autorégressif moyenne mobile d'ordre (1,1) ; ARMA(1,1)

On combine les deux modèles AR(1) et MA(1). On obtient :

$$Y_t - \phi Y_{t-1} = \varepsilon_t - \theta \varepsilon_{t-1}.$$

avec : $|\theta| < 1$, $|\phi| < 1$ (Condition d'inersibilité et de stationnarité).

D'où la forme d'un processus mixte autorégressif moyenne mobile d'ordre (p,q) ;

ARMA(p,q) est :

$$\begin{aligned} Y_t - \phi_1 Y_{t-1} - \phi_2 Y_{t-2} - \dots - \phi_p Y_{t-p} &= \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \theta_2 \varepsilon_{t-2} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q}; \\ &= (1 - \phi_1 L - \phi_2 L^2 - \dots - \phi_p L^p) Y_t; \\ &= (1 - \phi_1 L - \phi_2 L^2 - \dots - \phi_q L^q) \varepsilon_t. \end{aligned}$$

D'où :

$$\phi(L)Y_t = \theta(L)\varepsilon_t. \quad (2.30)$$

avec : (ε_t) est un bruit blanc de variance σ^2 et $\phi(L), \theta(L)$, des polynômes de degré p, q .

2.11.4 Modèles ARIMA et SARIMA

Les tendances apparentes peuvent être ajustées par l'application de la technique des différences régulières, et si une différence d'ordre 1 n'est pas suffisante pour stationnariser la série, elle peut être répétée autant de fois que nécessaire. Pour arrêter

l'apparition des irrégularités dans la série différenciée, on fait des transformations par les fonctions Log ou inverse. La cause de non-stationnarité d'une série est due à la présence d'un facteur saisonnier périodique. Pour la rendre stationnaire, on lui applique un filtre saisonnier d'ordre s . Quand une différenciation ordinaire est appliquée, AR et MA, on obtient le modèle ARIMA, ou le I (Integrated) se réfère à la procédure de différenciation. Et quand, en plus, un filtre saisonnier est appliqué, on obtient le modèle SARIMA [17].

Conclusion

Le but de ce chapitre est d'introduire la notion de processus temporels et plus particulièrement la classe des processus ARMA qui sont surtout utiles pour décrire le comportement des séries temporelles univariées, et les modèles de prévisions de Box et Jenkins et le lissage exponentiel, dans le but d'expliquer et de prévenir le phénomène observé dans le futur grâce aux valeurs observées dans le présent et le passé.

Exploitation du langage de programmation R

Introduction

Ce chapitre est une introduction à l'étude exploratoire d'ensembles de données concernant le nombre des personnes touchées par le black-out aux Etats-Unis, nos analyses ont été faites à l'aide du logiciel R qui est un clône du logiciel S-PLUS. Dans l'objectif de fournir des prévisions pour minimiser les black-outs futurs.

3.1 Présentation du langage R

R est un langage de programmation dont le but est de pouvoir traiter et organiser des jeux de données afin de pouvoir y appliquer des tests statistiques plus ou moins complexes et de représenter ces données graphiquement à l'aide d'une grande variété de graphiques disponibles. Développé initialement au début des années 1990 par Ross Ihaka et Robert Gentleman, ce langage basé sur un autre langage statistique appelé S. Cette structure garantit des mises à jour fréquentes et une communauté importante d'utilisateurs apporte son aide pour notamment développer de nouvelles fonctionnalités au projet [18, 19].

Ce langage est très utilisé pour diverses raisons :

- Il permet d'organiser et de traiter des volumes importants de données de manière rapide et flexible.
- Il permet d'assez facilement créer des graphiques paramétrables afin de pouvoir mieux visualiser le résultat d'analyses.

- Il est multi- plateforme. On peut l'utiliser sous Windows, Mac OS ou Linux.

3.2 Analyse des données et des étapes utilisées dans le langage R

On dispose d'une série de données mensuelles, représente la série du nombre des personnes touché par le black-out aux Etats-Unis de 1984 à 2002, la série est représentée sur la figure (II.1).

```
v=c(8,6,8,1,20,7,9,1,1,10,5,6,5,7,20,7,8,11,18,3,8,7,14,19,9,10,15,0,8,10,8,5,2,4,10,6,3,5,6,6,12,6,3,5,3,7,6,5,2,11,11,5,3,10,9,7,7,0,0,1,12,9,15,7,11,17,18,9,17,13,21,4,10,7,21,19)
```

```
serie <- ts(serie,frequency=4,start=c(1984,1))
```

Graphe de la série originale :

```
plot(serie,ylab='nombre de blackouts',xlab='années de1984 à 2002' ,pch="o",
type="o")
```

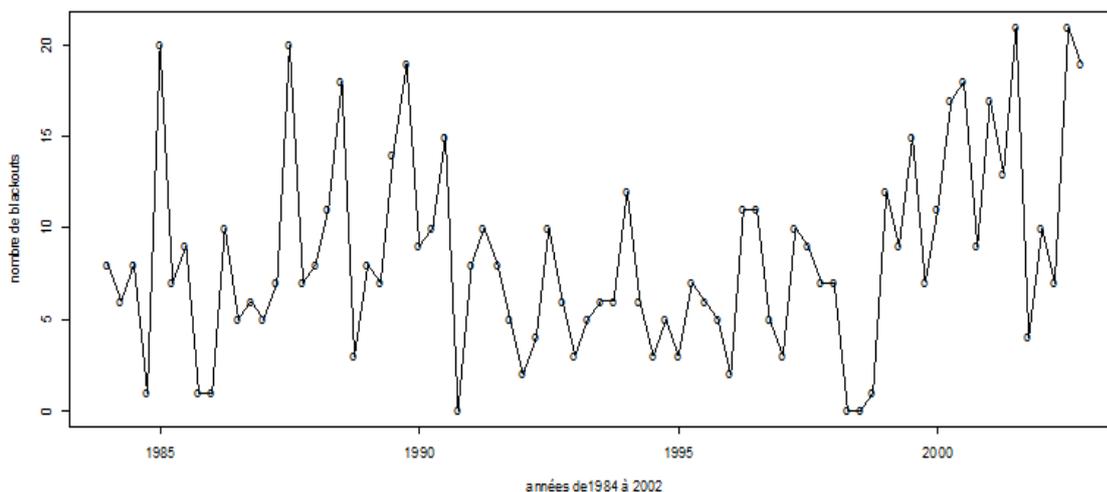


FIGURE 3.1 – Graphe de la série originale.

Il faut transformer la série observée de manière à :

- enlever la tendance.
- enlever la saisonnalité.

```
acf(serie, lag=76, main="Correlelogramme")
```

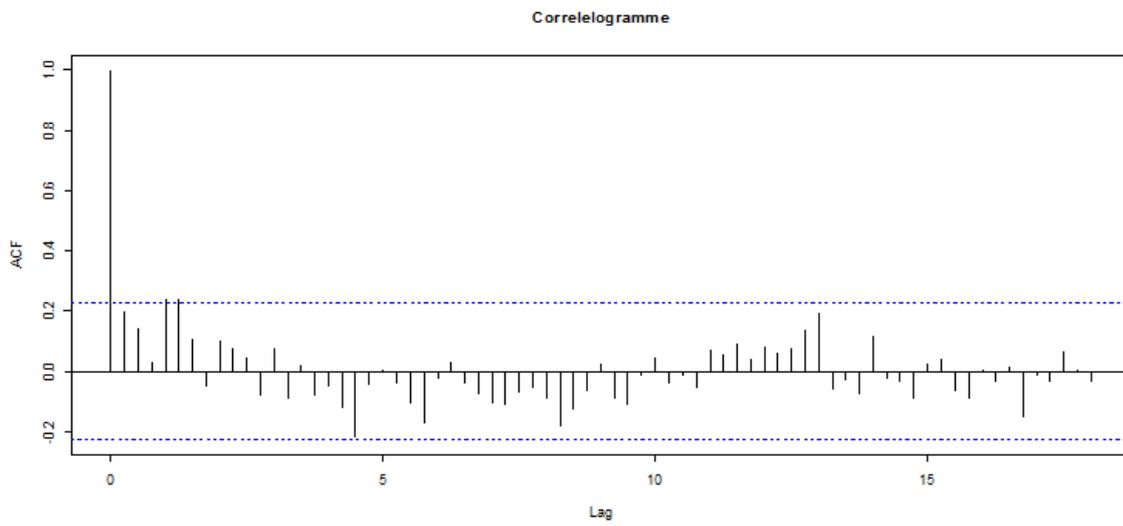


FIGURE 3.2 – Correlelogramme de la série.

```
pacf(serie, lag=76, main="Correlelogramme partielle")
```

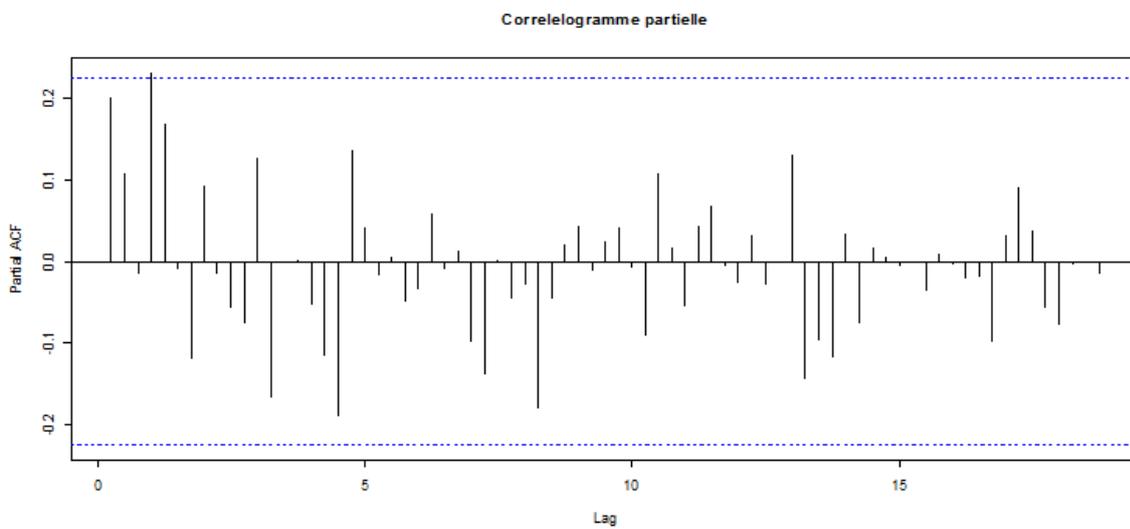


FIGURE 3.3 – Correlelogramme partiel de la série.

```
s2=diff(serie,lag=4, differences=1)
acf(s2)
```

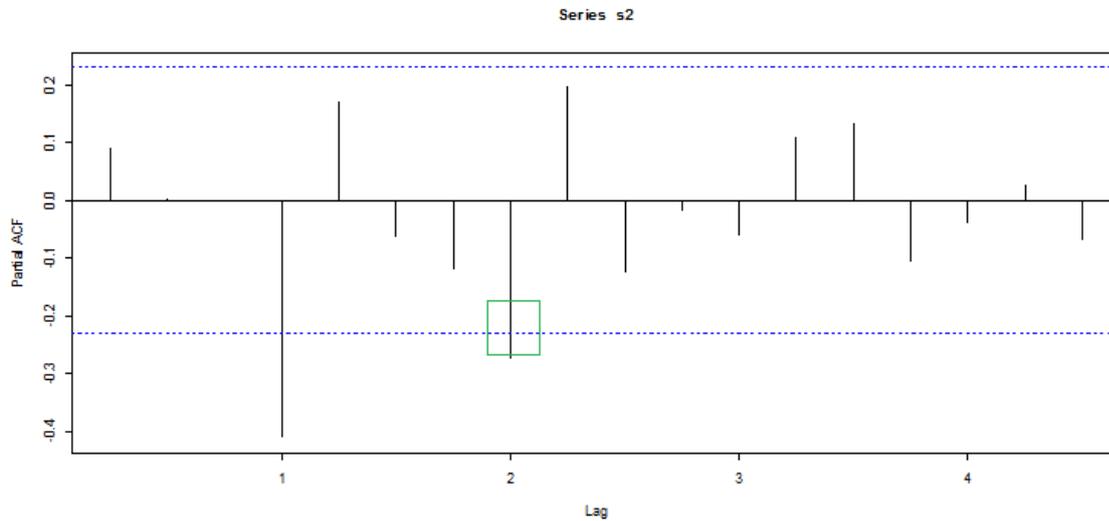


FIGURE 3.4 – ACF de la série transformée.

```
pacf(s2)
```

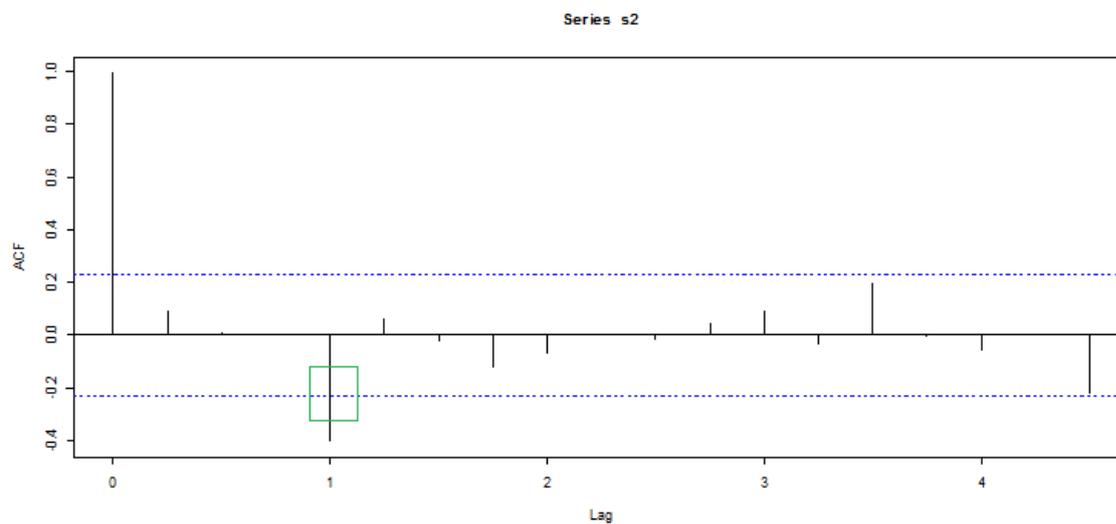


FIGURE 3.5 – PACF de la série transformée.

L'analyse des coefficients d'autocorrélation et d'autocorrélation partielles de la série transformée fait apparaître un pic significatif de retard 1, pour l'autocorrélation et aucun pic significatif de retard 2 pour l'autocorrélation partiel. En basant sur ces résultats, on proposera comme modèle possible un SARIMA (1, 0,1) (1, 1,2). Le modèle retenue est ARIMA (1, 0,1) (1, 1,2)).

Les coefficients :

```

arima(x = serie, order = c(1, 0, 1), seasonal = list(order = c(1, 1, 2)))
Call:
arima(x = serie, order = c(1, 0, 1), seasonal = list(order = c(1, 1, 2)))
Coefficients:
      ar1      ma1      sar1      sma1      sma2
 0.9560 -0.7638 -0.9095 -0.0001 -0.9998
s.e. 0.1066 0.1336 0.0926 0.2693 0.2692
sigma^2 estimated as 22.25: log likelihood = -220.01, aic = 452.03

```

3.2.1 Test sur la validité des coefficients

Test sur la validité des coefficients du modèle :

- La condition de stationnarité est vérifiée : $|\phi| < 1$.
- La condition d'invisibilité est vérifiée : $|\theta_1| < 1$.

Test de H_0 " $\theta_1=0$ " contre H_1 " $\theta_1 \neq 0$ " ce test est basé sur la statistique :

$$T_1 = \frac{|\hat{\phi}_1|}{\hat{\sigma}(\hat{\phi}_1)}(n - k, \frac{\alpha}{2}). \quad (3.1)$$

Tel que :

n =taille de l'échantillon, $k=p+q$.

1. Sa réalisation est $\frac{0.9560}{0.1066} = 8.968 > t_{(47,0.025)} = 2.021$. Par conséquent, on rejette l'hypothèse H_0 , cet estimateur est significatif.

Test de H_0 " $\theta_1=0$ " contre H_1 " $\theta_1 \neq 0$ " ce test est basé sur la statistique :

$$T_2 = \frac{|\hat{\theta}_1|}{\hat{\sigma}(\hat{\theta}_1)}(n - k, \frac{\alpha}{2}) \quad (3.2)$$

2. Sa réalisation est $\frac{0.7638}{0.1336} = 5.717 > t_{(47,0.025)} = 2.021$. Par conséquent, on rejette l'hypothèse H_0 , cet estimateur est significatif.
3. Sa réalisation est $\frac{0.9095}{0.0926} = 9.821 > t_{(47,0.025)} = 2.021$. Par conséquent, on rejette l'hypothèse H_0 , cet estimateur est significatif.

4. Sa réalisation est $\frac{0.0001}{0.2693} = 3.713 > t_{(47,0.025)} = 2.021$. Par conséquent, on rejette l'hypothèse H_0 , cet estimateur est significatif.
5. Sa réalisation est $\frac{0.9998}{0.2692} = 3.713 > t_{(47,0.025)} = 2.021$. Par conséquent, on rejette l'hypothèse H_0 , cet estimateur est significatif.

3.2.2 Test sur les résidus

```
acf(sari$resid,main='ACF de résidus')
```

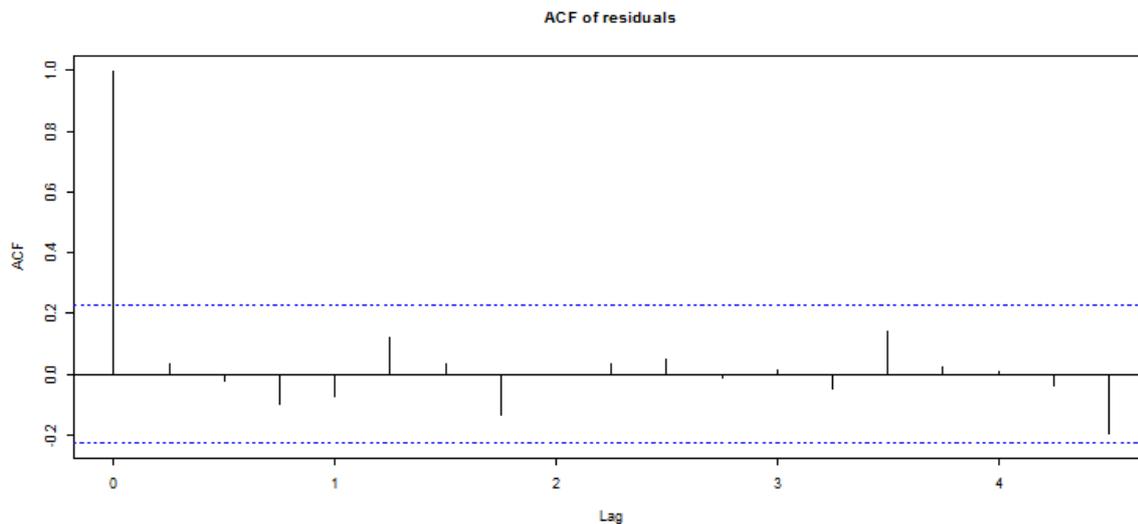


FIGURE 3.6 – Corrélogramme des résidus.

```
pacf(sari$resid,main='PACF de résidus')
```

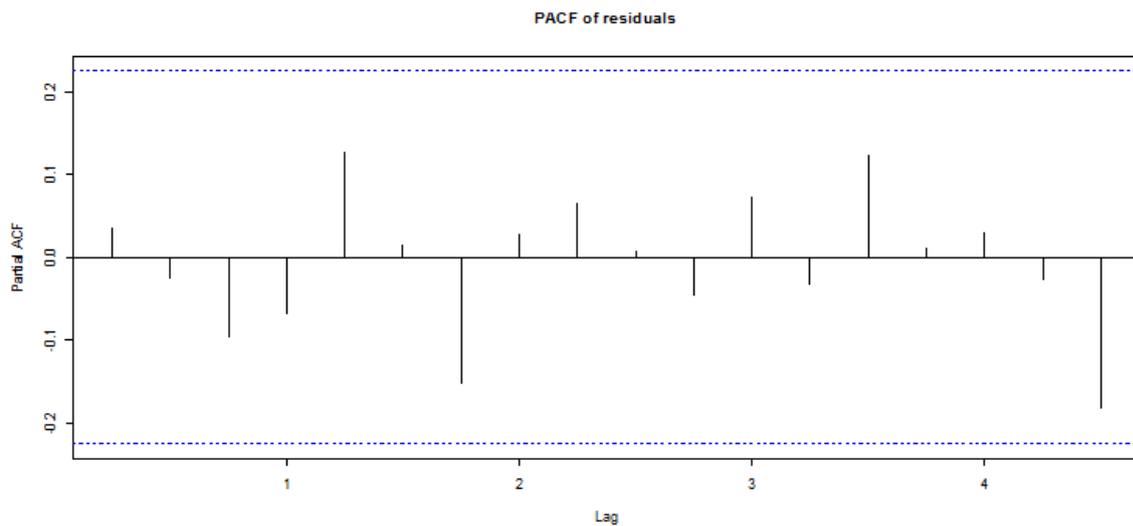


FIGURE 3.7 – Corrélogramme partiel des résidus.

Ce modèle est accepté si les résidus peuvent être considérés comme un bruit blanc ainsi qu'en témoignent le comportement des autocorrélations et des autocorrélations partielles (graphes suivants) qui sont tous inclus dans l'enveloppe. Cette constatation se confirme par le test de Box et Ljung sur l'autocorrélation des résidus le test est basé sur la statistique :

$$Q' = n(n+2) \sum_i^k \frac{r_i'^2}{n-i} \rightarrow X_2^{1-k}. \quad (3.3)$$

3.2.3 Test de Box et Ljung sur l'autocorrélation des résidus

```
Box.test(sari$resid, lag = 15, type = c("Ljung-Box"))

Box-Ljung test

data: sari$resid

X-squared = 7.3291, df = 15, p-value = 0.9479
```

$Q' = 7.3291 < X_{15,0.05}^2 = 25$. On accepte l'hypothèse que les résidus forment un processus bruit blanc.

Finalement le modèle va s'écrire :

$$Z_t = Z_{t-1} + Z_{t-12} + Z_{t-13} + \varepsilon_t + 0.4428\varepsilon_{t-1}.$$

Avec :

$$Z_t = \lim Y_t.$$

$$y_t = \varepsilon_t + \phi_1 y_{t-1} + \dots + \phi_p y_{t-p} + \varepsilon_t + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \dots + \theta_q \varepsilon_{t-q}.$$

$$y_t = 0.9560y_t - 0.8694y_{t-6} - \varepsilon_t + 0.07638\varepsilon_t + 0.9999\varepsilon_{t-4}.$$

3.2.4 Prédiction

Les prédictions pour les 12 trimestres à venir :

```
p=predict(sari,12)
```

P				
\$pred				
	Qtr1	Qtr2	Qtr3	Qtr4
2003	12.213362	12.797558	15.530232	10.241988
2004	12.934736	12.797533	15.832398	10.033865
2005	11.049619	11.622645	14.434355	9.149381

```
plot(serie, ,xlim=c(1984,2006),ylim=c(0,16),lty=2)
lines(p$ pred,col="red3",type="o")
```

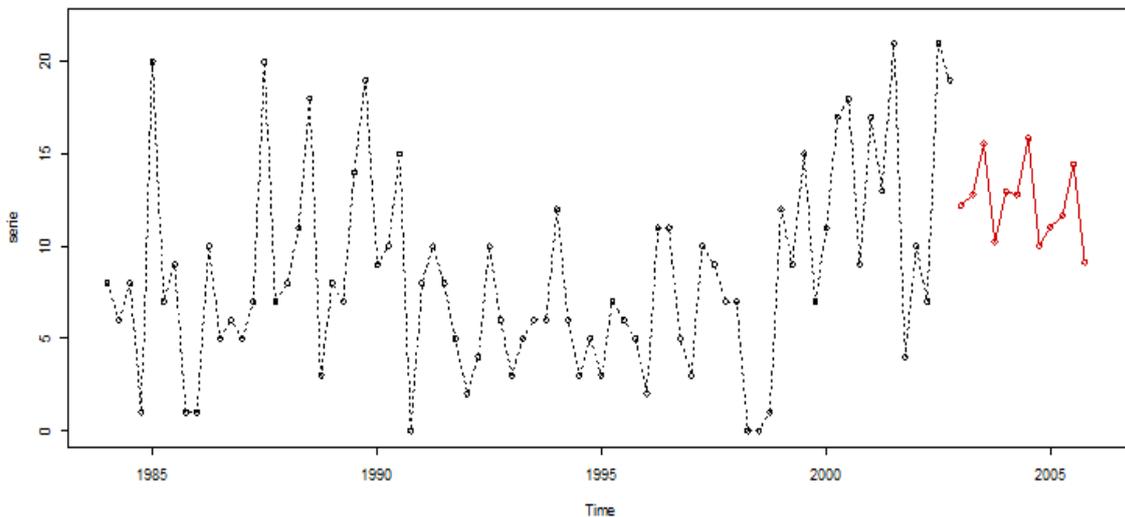


FIGURE 3.8 – Graphe de la série originale et des prévisions.

A partir de graphe on remarque que il ya une tendance décroissante dans les prévisions des derniers black-outs, Le comportement des évènements futurs semble être constant, grâce à l'intégration de systèmes intelligents dans le réseau électrique américain. Ce pays a une grande avance dans le développement de TIC, et il est orienté vers l'issue de fiabilité et pour minimiser ces évènements redoutés.

Conclusion

Les prévisions resteront l'étude la plus adéquate pour prévoir le futur. La connaissance des notions de base des statistiques (tests, estimation, . . .), et les méthodes des résolutions, est nécessaire pour bien comprendre les résultats fournis par un logiciel statistiques (R). Le logiciel ne fournit pas une solution directe sans l'aide, et l'observation de l'utilisateur pour déterminer les paramètres nécessaires pour le calcul et l'analyse statistique.

Intégration des TIC dans les prévisions des black-outs

Introduction

Les acteurs intervenants dans les réseaux électriques, s'accordent à apporter des contributions manuelles et organisationnelles d'une manière continue afin d'améliorer les performances de ces systèmes électriques, mais les réseaux restent limités pour rétribuer des objectifs de la qualité de service. Ainsi, l'intégration de TIC devient un impératif compté de la forte demande en énergie d'une part et la validité des systèmes de la production liée en ressources des énergies renouvelables d'autre part.

4.1 TIC (technologies d'information et de communication)

4.1.1 Définition

La définition sémantique des TIC reste particulièrement floue : le terme technologie qui signifie " discours sur la technique " est utilisé à la place de " technique ", qui serait à la fois plus simple et plus exact. Les technologies de l'information et de la communication regroupent toutes les activités qui permettent de produire, de traiter, de transformer, de stocker, d'extraire, d'analyser et de transmettre l'information et de la communiquer en employant des dispositifs électroniques.

4.1.2 Objectifs des TIC dans la gestion intelligente de l'énergie

Un Smart Grid est un réseau électrique de transmission ou de distribution utilisant les TIC pour optimiser toute la chaîne de la production, du transport et de la distribution, et de la consommation d'électricité. Il ne s'agit donc pas d'un nouveau réseau électrique mais bien d'une évolution du réseau actuel, les objectifs des TIC dans la Gestion Intelligente de l'Energie sont très vastes et construits en :

- Améliorer l'intégration des Energies décarbonées distribuées,
- Equilibrer les énergies renouvelables intermittentes (éolien, solaire),
- Accroître et optimiser les flexibilités : production, demande, stockage, transport et distribution,
- Optimiser l'efficacité de l'ensemble du système,
- Améliorer la prévision de la consommation et de la production,
- Favoriser la maîtrise de la demande auprès des consommateurs,
- Minimiser les pertes dans les réseaux,
- Garantir la fiabilité, la stabilité et la résilience des infrastructures,
- Estimer en temps réel la stabilité dynamique du réseau,
- Minimiser l'impact des incidents systèmes (black-out, production défaillante, gestion des retraits),
- Implémenter des plans de sécurité et de défense en cas de défaut (auto cicatrisation),
- Assurer la sécurité et la qualité de l'approvisionnement en électricité, permettre la maîtrise de la demande à des pointes, ou encore faciliter l'insertion des énergies de source d'énergie renouvelable.

4.2 Atouts d'un approvisionnement énergétique décentralisé

L'usage accentué d'énergies renouvelables (EnR) pour la production d'électricité implique une décentralisation de l'approvisionnement énergétique, c'est-à-dire une production à échelle locale. Outre les avantages liés à l'usage intrinsèque des EnR, cette décentralisation comporte des atouts, à savoir :

- Réduction des pertes sur les réseaux de transport d'électricité (rapprochement des lieux de production et de consommation),

- Meilleure efficacité énergétique (adaptation de la production électrique à la consommation locale),
- Contribution à la relance de l'économie locale, notamment par la création locale d'emplois,
- Amélioration de la sécurité d'approvisionnement énergétique.

4.3 Systèmes d'information des systèmes intelligents

4.3.1 Système SCADA

Le système SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) est employé pour la commande des centrales électriques, transmission, automation de distribution, et pour la surveillance et le contrôle des processus industriels des régions éloignées. Ils permettant la conduite des postes électriques importants et la téléconduite comprenant des dispositifs permettant : de commander les organes de coupure (disjoncteurs, sectionneurs), de connaître la position de ces organes, de mesurer un certain nombre de grandeurs (tension, intensité, fréquence), de signaler des dysfonctionnements (alarmes). Alors, le système SCADA est un système informatique de gestion assurant le fonctionnement, le contrôle et le réglage de l'installation prédéfinie comprenant différentes typologies de réseaux électriques et différentes sources de production d'énergie et de charges[20,21].

4.3.1.1 Composants de système SCADA

Un dispositif SCADA, utilisé comme un outil de sécurité de consignation d'appareil, électrique est généralement composé des sous-systèmes suivants [20,21] :

- Une interface homme-machine (HMI) qui présente les données à un opérateur humain et qui lui permet de superviser et commander les processus,
- Un système de supervision et contrôle informatique, faisant l'acquisition des données des processus et envoyant des commandes (consignes) aux processus,
- Unités Terminales principales(MTU), une unité terminale distante (RTU) reliant les capteurs convertissant les signaux en flux de données numériques et envoyant les données numériques au système de supervision, les stations terminales installées dans les centrales et les sous-stations des réseaux sont des unités combinées de données et de commande d'équipements,

- Des automates programmables industriels utilisés sur le terrain pour leur versatilité et flexibilité due à leur capacité d'être configurables,
- Une infrastructure de communication reliant le système de supervision et de contrôle aux éléments terminaux,
- Divers instruments d'analyse.

Généralement, un système de SCADA est schématisé comme donné sur la figure 3.1.

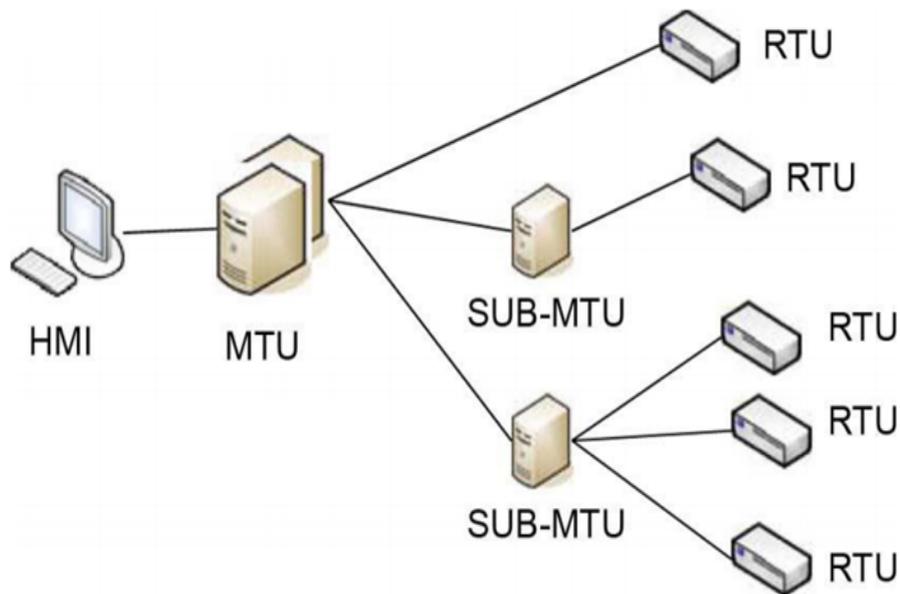


FIGURE 4.1 – Système SCADA

4.3.2 Avantages pour l'utilisateur

- Augmentation de la qualité de production ainsi que la productivité,
- Réduction de pannes avec des détections précoces d'opérateur,
- Identification facile des goulots d'étranglement de l'équipement, pannes ou erreurs,
- Accès à distance via serveur web.

4.3.3 Système de gestion de la distribution DMS

Le système de gestion de la distribution (Distribution Management System - DMS) moderne, et destiné aux grandes entreprises d'électricité régionales. Ce type de système a pour caractéristique fondamentale son aptitude à modéliser le réseau électrique et le réseau de télémetrie associé, utilisé pour la surveillance du réseau

électrique. Le système DMS est essentiellement destiné à l'exploitation du réseau et à la planification opérationnelle [22].

4.3.3.1 Objectifs du système DMS

Les objectifs de gestion d'un DMS moderne sont les suivants [22] :

- Introduction d'un système intégré, incorporant à la fois les réseaux de sous-transmission haute tension et les sections d'alimentation moyenne tension. Cela permet d'optimiser les opérations nécessitant la coordination des équipes de terrain travaillant aux différents niveaux de tension,
- Intégration des schémas de réseau électrique, des données d'installation et des données du réseau de télémétrie quel que soit le niveau de tension ou le mode de contrôle (distant ou manuel). L'intégration a pour but de réduire la surcharge due à la saisie des données dans de multiples bases de données ainsi que les problèmes d'incohérence éventuelle entre ces données,
- Intégration des outils d'analyse électrique pour la planification et les études d'optimisation,
- Fourniture d'interfaces aux systèmes de gestion des pannes, d'informations clientèle, de gestion des équipements et des cartes,
- Collecte des données de compte rendu ce rapport à des fins de régulation.

4.3.3.2 Exigences des utilisateurs

Pour aider les ingénieurs de contrôle à effectuer leurs tâches d'une manière sûre et efficace, le DMS doit proposer les fonctions suivantes :

- Présentation des informations à jour sur l'état actuel du réseau, en particulier sur les parties du réseau mises hors tension,
- Assistance à l'exécution des opérations de commutation complexes d'une manière sûre et sécurisée,
- Possibilité de traiter simultanément plusieurs travaux, de surveiller et de contrôler le travail de plusieurs équipes de terrain opérant l'équipement de réseau,
- Possibilité de planifier le travail à exécuter à l'avenir sur le réseau,
- Liaison avec les services d'information clientèle,
- Outils d'analyse pour l'optimisation de l'exploitation sûre et sécurisée du réseau tout en minimisant les pertes d'énergie.

4.3.4 Système de gestion EMS

EMS (Energy Management System) est un ensemble d'outils informatiques utilisées par les gestionnaires de réseaux électriques de transport afin de surveiller, de contrôler et d'optimiser les performances de la production, et du réseau électrique tout en assurant sa sûreté de fonctionnement. Les EMSs fournissent aux opérateurs notamment les moyens d'analyse et d'anticipation, ainsi que les fonctions de gestion du réseau en temps-réel (réglage de tension et fréquence, dispatching des productions, défense contre les incidents majeurs, etc.).

4.3.5 Système SCADA/ EMS

Le système SCADA/EMS est une solution optimale de centre de commande pour permettre une opération bloquée et efficace du système d'énergie électrique. La supervision SCADA et la gestion d'énergie EMS progressent en parallèle pour doter les gestionnaires de réseaux de transports (GRT) de meilleurs outils de maîtrise des transits massifs de puissance sur de longues distances. Sur les marchés de l'énergie, l'heure est à la déréglementation. Le système EMS est également un système d'information d'énergie, qui fournit aux décideurs l'information un processus fiable de l'information.

4.3.5.1 Avantages de système SCADA/EMS

Le système de réseau SCADA/EMS fournit les avantages principaux suivants :

- Amélioration de la qualité d'approvisionnement,
- Utilisation optimale du réseau de transmission,
- Répartition des ressources optimale,
- Amélioration de la fiabilité du système.

4.3.6 Classifications des fonctions SCADA/EMS

- Par ordre temporel (pre-dispatch, dispatch, post-dispatch, temps-réel, temps-réel étendu et Préventif, curatif, restauratif, post-mortem).
- Par type de réseau (transport, sous-transport, distribution).
- Par mode (conduite, préparation, support ingénieur, entraînement).
- Par priorités (primaire, secondaire).
- Fonctionnelle (fonctions de sécurité, optimisation économique, entraînement).

4.4 Compteurs intelligents (Smart Meters)

4.4.1 Définition

Les compteurs intelligents sont l'une des composantes majeures des réseaux électriques intelligents. Les Smart Meter sont des composants électroniques à l'interface entre le réseau électrique et le client final. Un Smart Meters, est un compteur énergétique (électrique en général) capable de suivre en détail, et souvent en temps réel, la consommation électrique d'un bâtiment, d'une entreprise ou d'un foyer, et mesurer plusieurs types de flux électriques et surtout, ils sont communicants. Ils permettront de contrôler et de piloter des flux bidirectionnels de courant et d'information, à tous les niveaux du réseau. Ce compteur intelligent est en outre communicant et transmet par différents canaux (courant porteur, internet, téléphone) les informations recueillies [23,24].

Alors le déploiement de compteurs communicants (aussi appelés compteurs intelligents) devrait permettre une gestion plus efficace de l'électricité. En d'autres termes, il s'agit d'assurer l'équilibre entre l'offre et la demande d'électricité à tout instant et de fournir un approvisionnement sûr, durable et compétitif aux consommateurs.

4.4.2 Type de compteur intelligent

On distingue deux types des compteurs intelligents :

4.4.2.1 Compteur AMR

Un compteur AMR est un compteur disposant de technologies avancées, implique des technologies de communication et d'information optimisées. L'AMR (Automated Meter Reading) qui permettent aux consommateurs d'être informés en temps réel de leur consommation énergétique, et de transférer des données sur les paramètres électriques (énergie consommée, pertes sur le réseau électrique) et des signaux de contrôle, par différentes manières de communication (courant porteur en ligne-CPL, Internet ou wifi) pour la gestion énergétique.

4.4.2.2 Compteur AMM

En plus des fonctions d'un compteur AMR, Celui-ci est programmable à distance équipé d'un appareil de coupure à distance, il est dit " AMM " (Advanced Meter Management). Cette dernière qualité est importante car dépassant le simple relevé à distance; elle offre la possibilité de pilotages des charges par le gestionnaire du réseau afin d'optimiser l'équilibre offre/demande en période de pointe.

4.4.3 fonctions des compteurs intelligents

Le comptage intelligent passe, en règle générale, par la mise en œuvre d'un outil de supervision chez le client final assurant la lecture, le traitement, ainsi que le retour des données de consommation. Le compteur intelligent doit avoir les capacités suivantes :

- Enregistrement en temps réel ou peu différé de la consommation d'énergie électrique et, éventuellement, de la production énergétique locale, dans le cas de cellules photovoltaïques,
- Lecture des informations mesurées en local ou à distance (sur demande),
- Possibilité de limiter à distance la consommation instantanée (dans les cas extrêmes en coupant l'alimentation du client),
- Interconnexion à des réseaux locaux et à différents dispositifs (production décentralisée),
- Possibilité de lire des informations provenant de dispositifs de mesure locaux ou voisins (pour mesurer d'autres grandeurs telles que les consommations d'eau, de gaz, etc.).

Les compteurs intelligents sont le plus souvent utilisés pour enregistrer les consommations d'électricité et de gaz, mais il est également possible d'enregistrer d'autres types de données telles que les consommations en eau ou en vapeur La figure 3.2 , fournit un exemple de compteur intelligent et des fonctions associées [23].

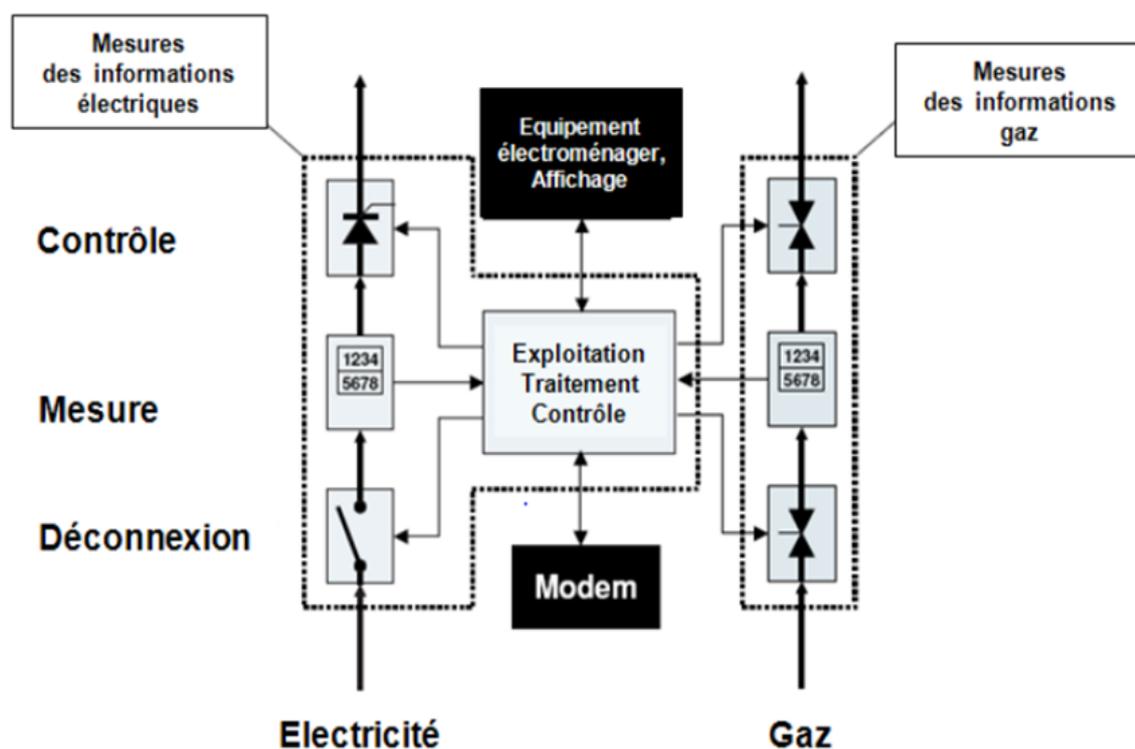


FIGURE 4.2 – Vue d'ensemble schématique de la configuration typique d'un compteur intelligent.

4.5 Comptage évolué (AMI) (Advanced Metering Infrastructure)

Le système de comptage évolué est l'un des concepts clés des réseaux intelligents puisqu'il permet de communiquer sur les données de consommations avec les équipements en aval et en amont du compteur. Ces systèmes intègrent des équipements et des logiciels permettant de compter, de communiquer et d'analyser les consommations des clients. D'une manière générale, ils permettent de relever de manière détaillée et régulière les consommations et favorisent les offres de facturation intégrant des coûts horaires différenciés. Ils permettent également de limiter les interventions particulières et de réduire les pertes non techniques. Enfin, des fonctionnalités liées à l'efficacité énergétique et la gestion de la pointe peuvent également être développées.

4.6 Liaisons de télécommunication

Un réseau de télécommunications relie l'ensemble des postes du réseau de transport, les centrales importantes et les dispatchings national et régionaux. Son infrastructure repose différents supports :

4.6.1 Courant porteur en ligne

4.6.1.1 Définition

Le CPL (Courant Porteur en Ligne) ou BPL (Broadband over Power Line) est une technique utilisant les lignes électriques de basse et moyenne tension (220 volts par exemple) pour y faire circuler des ondes courtes et hautes fréquences sur la bande des 1,6 Mhz à 30 Mhz au moyen d'un couplage avec les signaux électriques dont la fréquence est de 50 Hz en France .Le CPL sont une norme de transmissions de signaux numériques.ils concernent toute technologie qui vise à faire passer de l'information à bas/haut débit sur les lignes électriques en utilisent des techniques de modulation avancées [25,26].

4.6.1.2 Principes

La technologie de CPL qui transforme le réseau électrique en support pour le transport de données informatiques. Le courant alternatif est un signal périodique, il est représenté par la courbe de gauche sur la figure 3.3 ci-dessous .ce signal électrique va être utilisé en qualité de porteuse de l'information. Un signal haute fréquence va être appliqué à cette porteuse, modulé en fonction de l'information de transmettre ; il s'agit là du principe général. Les fréquences utilisées vont de 1,6 Mhz à 30 Mhz [26].

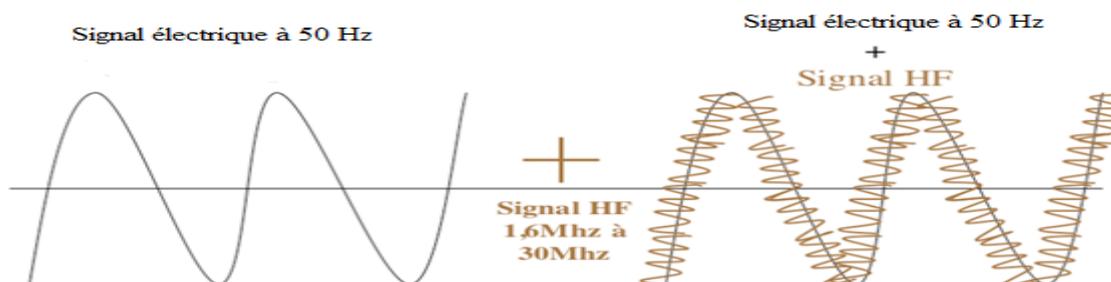


FIGURE 4.3 – Signal périodique du courant alternatif.

4.6.1.3 Types de courant porteur en ligne

La technologie CPL permet d'utiliser le réseau électrique comme support physique pour la transmission de données numériques et l'accès à Internet. Elle peut être mise en œuvre sur le réseau électrique à l'intérieur d'un bâtiment (mode indoor) ou sur les lignes électriques haute, moyenne ou basse tension (mode outdoor).

CPL indoor

CPL indoor (intérieur) qui correspond à l'habitation ou le lieu dans lequel le CPL est utilisé. Cet endroit se situe en aval du compteur électrique. C'est l'utilisateur qui le met en place, sauf si un appareil doit être installé sur le compteur électrique. Par contre, les adaptateurs installés sur les prises, les ponts et le routeur sont à la charge de l'utilisateur final.

CPL outdoor

Ce niveau appelé outdoor (extérieur) correspond à la partie qui se situe en amont du compteur électrique. On parle souvent de mise en place d'une boucle locale ou dernier kilomètre (last mile). Cette boucle relie les différentes habitations ou lieux où l'on veut mettre en place une solution CPL. Cette partie est gérée par le fournisseur d'électricité afin d'accéder au compteur intelligent.

4.6.1.4 Avantage et inconvénient du CPL

Avantage

- Il permet d'utiliser le réseau électrique pour transporter des données d'un endroit à un autre,
- Il est facile à installer et déployer à un prix réduit.

Inconvénient

- Le courant porteur évolue dans un environnement perturbé. Les perturbations peuvent avoir des causes multiples. Les bruits, ou les fréquences parasites, induits par l'utilisation d'appareils électriques sont l'ennemi numéro un des données transitant sur le réseau,
- Le risque de la propagation des informations. Dans certains cas, les informations transportées par les réseaux CPL passent outre les compteurs pour aller s'égarer dans la nature, où elles ne seront peut-être pas perdues pour tout le monde.

4.6.2 Capteurs de courants

Sans capteurs, il n'y a pas de Smart grid ! Les capteurs constituent le trait d'union entre le réseau physique et les systèmes intelligents. Déployés un peu partout dans le réseau (distribution, transport et production), ils jouent un rôle de sentinelles. En effet, les capteurs collectent les informations qui permettent de prendre les bonnes décisions relatives à la surveillance, le comptage d'énergie pour la facturation et la protection. Ces informations doivent être fiables (cela nécessite donc des mesures très précises), remontées en temps réel, au format numérique pour transiter en CPL ou par radio. Comme ils sont déployés dans la majorité des cas sur une infrastructure existante, les capteurs doivent être non-intrusifs (ouvrant si possible) et peu encombrants, capables de mesurer des courants de type AC et DC.

4.6.3 Fibres optiques

4.6.3.1 Présentation

Les liaisons de fibres optiques permettent de transporter les informations nécessaires au fonctionnement du réseau de transport d'électricité, d'un poste électrique à l'autre. Une fibre optique est un fil en verre ou en plastique très fin qui a la propriété de conduire la lumière et sert dans les transmissions terrestres et océaniques de données comme illustré sur figure 3.4 . Un des buts ultimes d'un réseau intelligent à base de fibre optique serait de développer des services de communication avancés.

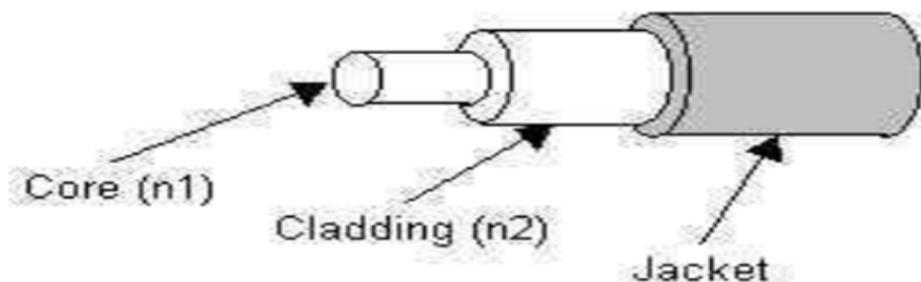


FIGURE 4.4 – Fibres optiques.

4.6.3.2 Fonctions des fibres optiques

Le réseau de fibres optiques sert à transmettre des flux d'informations concernant le réseau de transport. Les techniciens peuvent ainsi d'autant mieux garantir

la surveillance et la conduite du réseau de transport d'électricité à tout instant. Précisément, le réseau de fibres optiques contribue à assurer trois fonctions [27] :

- La « téléobservabilité » c'est-à-dire la possibilité de savoir, en temps réel, l'état des infrastructures du réseau et leur bon fonctionnement (les techniciens peuvent connaître la valeur du courant, de la tension, et la position - ouvert ou fermé - des organes haute tension du réseau électrique...),
- La « télécommandabilité » qui permet de commander à distance les équipements du réseau. Par exemple, cela permet au niveau des postes électriques, d'optimiser l'aiguillage de l'électricité qui transite sur les différentes lignes du réseau à haute et très haute tension. Le saviez-vous ? Les postes électriques sont des nœuds stratégiques du réseau de transport d'électricité,
- La « téléprotection » qui contribue à une meilleure sûreté du système électrique et de la qualité de service. En effet, elle permet aux flux d'informations de circuler plus efficacement et de réagir plus rapidement en cas de dommages sur une ligne.

Conclusion

Le pacte préconise l'expérimentation à grande échelle du stockage de l'énergie et le développement des réseaux électriques intelligents (smart grids) qui s'appuient sur les technologies de l'information et de la communication (TIC). Dans l'objectif de permettre l'optimisation des réseaux électriques, via l'intégration de différentes sources décentralisées de production d'énergie renouvelable et le déploiement de dispositifs de suivi et d'effacement des consommations des particuliers, incitant aux comportements vertueux en matière de sobriété énergétique. Chaque réseau électrique dépend d'un système d'information et de communication spécifique, en particulier d'un ou de plusieurs systèmes de contrôle (les systèmes SCADA, EMS, DMS), dont le but de surveiller le fonctionnement du réseau, de collecter toutes les informations nécessaires, et de réaliser les différentes opérations pour adapter en permanence le fonctionnement du réseau d'énergie électrique.

Efficacité dans la reconstruction du réseau après le black-out

Introduction

Une collaboration de recherche vise, dans un premier temps, à analyser et à comprendre les phénomènes qui mènent aux situations catastrophiques. Il y a lieu d'évaluer la faisabilité d'un nouveau concept de système de défense contre les incidents majeurs, puis de proposer une méthodologie innovante de conduite débouchant sur un outil d'aide à la conduite des réseaux électriques, afin de fournir aux exploitants des actions adéquates pour éviter les black-outs.

5.1 Système de défense classique

Le fait que les réseaux nationaux, sont interconnectés entre eux sans avoir été prévus pour cela au départ est un facteur aggravant l'occurrence d'incidents. En cas de problème, il s'agit donc de réagir de manière rapide, coordonnée et cohérente afin de casser la chaîne d'événements menant à la situation catastrophique. On peut alors imaginer un système de défense composé d'un dispositif de détection de défaut, d'un autre de télécommunication et d'un dispositif de commande agissant sur des actionneurs de réseaux eux-mêmes capables de modifier certaines variables de façon à éviter l'incident généralisé. Une solution pourrait être l'utilisation de dispositifs actionneurs FACTS (Flexible AC Transmission System). Ces systèmes à base de convertisseurs d'électronique de puissance ont montré leur capacité à contrôler rapidement les transits de puissance dans les réseaux et pourraient être

utilisés pour répartir judicieusement ces flots de puissance dès la détection d'un incident pour éviter l'effet de cascade. Une action coordonnée et cohérente de ces dispositifs associés aux protections du réseau suppose l'introduction d'un système de commande distribué gérant localement certains incidents et globalement d'autres afin de restituer le plus rapidement et avec le plus de fiabilité possible les grandeurs de commande aux FACTS en temps-réel. Ce système de contrôle-commande devra comprendre une partie détection de défaut, une partie transmission d'informations désignant le système SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition), une partie d'analyse et de diagnostic et une partie de décision sur les actions à mener qui pourront soit être automatiquement transmises aux systèmes FACTS, soit être soumises à un opérateur de réseau afin de l'aider dans sa démarche de gestion de l'incident[28].

5.2 Vers les réseaux de distribution du futur

Les services clients exigent de plus en plus la disponibilité de l'offre et la qualité d'énergie électrique, et les services publics de distribution d'électricité sont invités à les rencontrer et à fournir un service de haute qualité. Ils sont indispensables pour activer dans un domaine multidisciplinaire où la maîtrise de l'acquisition et de traitement des données, le transfert de l'information sécurisé et le mode de communication facile avec les clients sont des exigences. L'intégration des TIC dans le réseau électrique classique donne naissance à un réseau intelligent. Les systèmes intelligents permettent d'atténuer l'occurrence de certains événements qui mènent au black-out d'une part, et l'accélération de la reconstruction du réseau dans l'autre part si le black-out a déjà lieu[29].

Reconstruction du réseau après un black-out

Cas réels d'applications Après l'analyse de la situation basée sur les trois black-outs de l'année 2003 qui se sont produits dans trois pays différents, à savoir : l'Algérie, les USA et l'Italie, Américaine et Italienne ; l'équipe de recherche (FSE2) de l'unité de recherche LAMOS de l'université de Bejaïa a publié un article mettant en exergue les attributs des TIC dans le traitement de cette problématique [29]. Un intérêt particulier a été accordé à la contribution de l'intégration des systèmes intelligents et à l'insertion des énergies renouvelables afin de mieux gérer les pics

de demande, et de réduire les pertes de puissance et d'augmenter la disponibilité de l'électricité. Ils ont essayé de modéliser la restauration de réseau tout en suggérant la contribution des systèmes intelligents dans l'accélération du processus de restauration de service comme donné sur la figure 5.1 . À cet effet, ils ont exploité les résultats de comparaison de deux black-outs, à savoir : le black-out algérien et le black-out italien. Une attention particulière a été accordé aux paramètres suivants : le taux de restauration, la puissance partielle reconstituée à chaque étape et la puissance cumulative reconstituée à chaque étape. Les tableaux 5.2 et 5. 3 ont été constitués suivant les étapes de la figure 5.1, shématisant les états de reconstruction où l'on distingue six ($i=6$) pour le système algérien et cinq ($i=5$) pour l'italien.

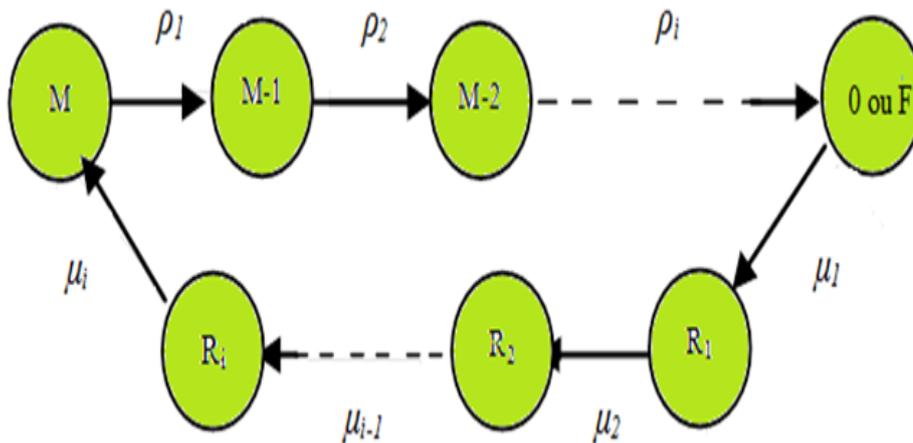


FIGURE 5.1 – Diagramme d'états de dégradation et de restauration.

Où :

$M, (M-1)$:Sont des états de dégradation.

0 est un état de dégradation et F est étatde panne catastrophique.

R_i : état de reprise d'un système.

μ_i : taux de restauration.

ρ_i : taux de dégradation, $i=0, 1, 2,3,\dots, n$.

Etats	0	1	2	3	4	5
$\mu(s^{-1})$	0.15e-4	5.0e-4	4.2e-4	2e-4	2.2e-4	2.7e-4
Puissance reconstituée (%)	15	15	30	13.6	23.3	3.4
Puissance totale reconstituée (%)	15	30	60	73.3	96.6	100

TABLE 5.1 – Etats de restauration du système dans le cas de black-out Algérien de 2003.

Etats	0	1	2	3	4
$\mu(s^{-1})$	4.0e-5	7.9e-5	6.9e-5	5.0e-5	6.0e-5
Puissance reconstituée (%)	5	40	25	20	10
Puissance totale reconstituée (%)	5	45	70	90	100

TABLE 5.2 – Etats de restauration du système dans le cas de black-out Italien de 2003.

D'une façon générale, ils ont observé une inertie dans les processus de restauration des réseaux mais elle est plus évidente dans le cas algérien. Les premières informations sur les résultats montrent un manque de mesures efficaces pour une restauration rapide. Pour accentuer les attributs de l'intégration de systèmes intelligents concernant les trois pays affectés par les black-outs de 2003, ils ont développé une comparaison présentée dans le tableau 5.3, ils ont déduit que l'ordre de l'efficacité diminue selon la classification comme suit : Les Etats-Unis, l'Italie et l'Algérie car les Etats-Unis est le premier pays qui a intégré le système intelligent dans son réseau conventionnel pour augmenter la fiabilité et la sécurité de l'approvisionnement. Le comportement du réseau Italien est acceptable, toute fois l'Algérie, peut

saisir cette opportunité pour apprendre des deux expériences.

Les pays	Algerie	Italie	USA
Puissance restaurée (GW)	5,003	27	61,8
Temps de dégradation (s)	15	1800	14400
Temps total de restauration (s)	15960	43200	104400

TABLE 5.3 – Comparaison de paramètres des trois systèmes électriques.

L'objectif principal du service de restauration est de réduire au minimum le nombre de clients touchés par l'interruption de courant. La reconfiguration du réseau constitue une solution, permettant le transfert de la charge sur un autre secteur, tout en tenant compte des contraintes opérationnelles de composants. Le temps de réaction est un facteur pertinent qui doit tenir compte des secteurs débranchés, qui devraient être reconstitués aussi rapidement que possible. Cette thématique a pu être considérée dans le cas de l'intégration de réseaux intelligents. Trois scénarios sont discutés dans ce qui suit :

1. L'événement initiateur du black-out est le pic de la demande (charge)

C'est le cas du black-out Américain. L'événement initiateur de la dégradation en cascade est la demande d'électricité était élevée en raison des fortes charges de climatisation. Le réseau électrique doit maintenir l'équilibre entre la demande de charge, et la production, l'expression de Smart Grid est souvent associée au concept de compteur intelligent (smart meter) ,capable de donner une facturation par tranche horaire permettant aux consommateurs de choisir le meilleur tarif chez les différentes entreprises productrices, mais aussi de jouer sur les heures de consommation, permettant ainsi une meilleure utilisation du

réseau électrique. Un tel système permettrait aussi de cartographier plus finement les consommations et de mieux anticiper les besoins. Ces solutions de plus en plus élaborées ont été appliquées pour adapter automatiquement la production à la consommation.

2. L'événement initiateur du black-out est le déclenchement des équipements

C'est le cas du black-out Algérien. L'événement initiateur de la dégradation en cascade est le déclenchement de deux groupes de la nouvelle centrale turbines à gaz du Hamma. Pour garantir une qualité de service à leurs clients, les compagnies électriques ont mis au point des règles de planification et d'exploitation de sorte que le réseau électrique soit capable de faire face à chaque instant aux aléas courants, tels que la perte d'un ou de plusieurs ouvrages de transport ou de production d'énergie électrique. Ces règles sont calquées sur un compromis " coût / risque de puissance coupée " acceptable. On utilise les capteurs et des dispositifs intelligents pour éviter cet événement indésirable par :

- L'intégration des sources d'énergie renouvelable dans le mix de production, avec la perspective d'augmenter l'implication des utilisateurs finaux dans la gestion du système.
- La Décision du délestage dans système d'une manière appropriée, en répartissant temporairement la distribution d'énergie à différents zones géographiques proportionnellement à la gravité de la perturbation du système électrique.

3. Le système est dans l'un des états O ou F du la figure 5.1

Les réseaux intelligents utilisent les équipements informatiques pour surveiller non seulement la consommation d'électricité des utilisateurs finaux mais aussi la performance des générateurs de centrales électriques en temps réel. Le Smart Grid permet de transmettre des données à très haut débit via la fibre optique qui peut être installée dans les câbles électriques de haute tension sans provoquer d'interférences. Cette technologie est un choix très insolite pour ce genre de projet. Généralement, des technologies telles que CPL ou d'autres formes de communications sans fil sont utilisées dans ce genre de projet. La fibre optique représente un investissement élevé comparé à d'autres solutions et nécessite des modifications importantes sur le réseau électrique (diagnostic rapide des pannes) [29].

5.3 Enjeux de l'évolution des réseaux électriques

Le manque de fiabilité croissant des réseaux électriques, la sensibilité voire la dépendance de plus en plus importante de l'économie vis-à-vis de l'énergie électrique, l'impérieuse nécessité d'une sauvegarde environnementale de la planète, soumettent les dit réseaux à la nécessité absolue et urgente d'évoluer très fortement dans les années qui viennent. Dans ce qui suit, on développe les enjeux de cette évolution. L'efficacité à prendre en compte ici est globale. Elle s'entend à la fois comme une optimisation du rendement technique et du rendement économique des réseaux.

L'efficacité technique conduit à :

- Une consommation la plus faible possible pour répondre à un besoin fonctionnel donné des différents utilisateurs de l'énergie électrique,
- Un minimum de perte sur l'énergie produite,
- Des réseaux moins hiérarchisés, plus maillés pour des reconfigurations plus rapides, voire dynamiques.

L'efficacité économique conduit à :

- L'utilisation optimale des capacités de production en réduisant les variations de la demande et donc l'écart entre les pics de demande et la consommation " normale ",
- La réduction de l'impact environnemental des dispositifs de production et de distribution d'énergie électrique,
- L'optimisation de la durée de vie des équipements.

Fiabilité et sécurité

La fiabilité des réseaux électriques s'entend d'abord en termes de continuité de service :

- Moins de dépendance vis-à-vis d'un système de conduite central,
- Moins de dépendance vis-à-vis d'un producteur unique,
- Plus de possibilités de reconfiguration du réseau pour faire face à la défaillance d'un tronçon du réseau,
- La qualité de l'énergie se doit de pouvoir être garantie,
- Une maintenance prédictive des équipements afin de prévenir les défaillances prédictibles,
- Une surveillance des paramètres révélateurs des défaillances les plus fréquentes.

La sécurité est d'autant plus sensible que l'énergie est une source importante

pour la vie économique et sociale. Elle s'entend :

- Vis-à-vis des intrusions possibles sur le système de contrôle,
- Vis-à-vis des vols éventuels d'énergie.

Flexibilité

La flexibilité correspond plus à une capacité de réponse qu'à un état caractéristique du réseau. Le besoin est une auto-réaction, un auto-ajustement, une auto-configuration du réseau pour s'adapter à des événements imprévus et assurer la continuité de service nécessaire. Limiter les interventions humaines aux opérations majeures est un gage de performance. Il est nécessaire pour cela que le réseau soit supervisé et, en partie, auto-supervisé en permanence.

Environnement

La production, distribution et consommation d'électricité sont au cœur des préoccupations environnementales. En plus de ces enjeux de performances, trois facteurs d'évolution " techniques " influent désormais très fortement sur ce que doit devenir la topologie des réseaux électriques :

- L'émergence de ressources distribuées : les nouvelles énergies renouvelables donnent lieu à l'installation d'unités de production beaucoup plus petites, plus nombreuses et réparties sur le réseau. Elles doivent pouvoir injecter leur production sur le réseau, là où elles se trouvent, sans générer de perturbation.
- Les véhicules électriques, promis à un développement prochain, nécessitent une infrastructure de charge inexistante à ce jour.
- Le stockage d'énergie électrique, actuellement inexistant ou presque, doit trouver des réponses pour favoriser les réponses à ces enjeux [30].

Conclusion

Les technologies de réseau intelligent s'attaquent à des problèmes techniques qui limitent la flexibilité, la fiabilité et l'efficacité de la production et de la distribution d'énergie. En se basant sur le grand défi actuel, correspondant à la problématique de stockage, les systèmes intelligents affectent aux opérateurs une gestion sereine des pics et des creux de l'offre et de la demande qui surviennent au moment des jours les plus froids et les plus chauds de l'année. Pour les opérateurs du réseau, c'est à la fois un défi et une opportunité auxquels la technologie du Smart Grid répondra. Le stockage de l'énergie facilitera la gestion au niveau du réseau de grandes quantités d'énergie, dont la production est fondamentalement irrégulière. Quant à la décentralisation de

la production, assurée par les sources renouvelables, cette dernière permet de réduire les temps de coupure suite à des pannes longues sur la production principale.

Conclusion Générale

Les réseaux électriques ont un rôle très important dans le mouvement et dans l'épanouissement des sociétés modernes. Le mouvement et dans l'épanouissement .Il revient aux producteurs et aux distributeurs d'énergie électrique dans les accompagner et satisfaire leurs exigences qui sont de plus en plus croissantes. L'un des évènements redoutés par l'ensemble concerné par les réseaux électriques sont les pannes généralisées ou en d'autre terme du black-out. Ils découlent de la perte de stabilité du réseau et causent des dégâts immenses au niveau économique et social. Bien que les réseaux électriques soient pourvus de systèmes d'automatisation et de protection ainsi que de plans de défense pour éviter les instabilités du système, des blackouts se produisent régulièrement dans le monde.

Dans le but de concevoir un système de prévention des blackouts, dans un premier temps, après l'analyse des pannes apparues dans le monde en 2003 et en 2012, on distingue une division de la progression des blackouts en cinq phases séquentielles : les préconditions, les événements initiaux, la cascade d'événements, l'état final et la restauration.

La modélisation de l'occurrence des blackouts à travers le monde par les séries chronologiques révèle l'adéquation des modèles de prévisions de Box et Jenkins, et particulièrement ARMA. Il a été démontré que la prévision des productions d'énergies renouvelables, le délestage programmé et surtout le stockage de l'électricité à différentes échelles de temps participent à la stabilité et la sécurité des réseaux électriques, quand ils sont associées aux TIC et à des algorithmes de gestion de systèmes .

Bibliographie

- [1] L. Wei, B. Yvon, Z. Eric and R. Daniel, "Blackouts : description, analysis and classification", proceedings of the 6th WSEAS international conference on power systems, Lisbon, Portugal", september 22-24, 2006.
- [2] R. Touileb, "Blackout 03 février 2003 sur le réseau algérien".
- [3] G. Stéphane, "Analyse du blackout nord Américain", BKW, FMB, ENERGIESA, 2004.
- [4] E.M. Michele, "Le black out du 28 septembre 2003 en Italie", SEE -paris, le 9 février 2004.
- [5] [http ://www.fr.wikipedia.org/wiki/Panne de courant de juillet 2012 en Inde](http://www.fr.wikipedia.org/wiki/Panne_de_courant_de_juillet_2012_en_Inde), 2014.
- [6] D. Gado, "Séris chronologiques", mémoire de master de statistique appliquée, 2008-2010.
- [7] J. Philippe, "Séris chronologiques", université paris 1, Septembre 2007.
- [8] P. Michel, K. Christine, R. Rossignol, "Séris chronologiques", université paris-sud, master ingénierie mathématiques, deuxième année, Année scolaire 2010-2011.
- [9] S. Rainer, V. Sébastien , "Séris chronologiques", stat 2414, 4e édition, 26 septembre 2005.
- [10] O. Roustant, "Introduction aux séris chronologiques", école nationale supérieure des mines de saint-etienne, 2008-2009.
- [11] P. Corinne, "Séris chronologiques", quelques éléments du cours, Année 2004-2005.
- [12] A. Florin, "Séris temporelles : régression, et modélisation ARIMA (p,d,q)", 2 décembre 2012.

- [13] R. Bernard , "Dur, duré Les séries chronologique", centre interuniversitaire de Calcul de Grenoble, 18 aout 1993.
- [14] Ch. Arthur, "Modèles de prévision ,séries temporelles", 15 mai 2012.
- [15] [http ://math.univ-lille1.fr/ viano/economcours.pdf](http://math.univ-lille1.fr/viano/economcours.pdf).28 février 2014.
- [16] R. Sylvain, "Séries temporelles", M1 IM, université nice sophia antipolis,2000.
- [17] J.J. Daudin, C. Duby, S. Robin et P. Trécourt, "Analyse de séries chronologiques", mai 1996.
- [18] Jean. M, "Initiation au logiciel R", université paris dauphine, U.F.R. mathématiques de la décision, MAT-6-3 : statistique exploratoire et numérique (NOISE), Année 2005-2006.
- [19] Z. Walter, N. Oleg, "Time series analysis with R", Part I, 19 mai 2008.
- [20] T. Mini, K. Parmod, and Ch. Vinay, "Design, development, and Commissioning of a Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) laboratory for research and training ". IEEE transactions on power system, vol. 19, NO.3, august 2004.
- [21] S. Mohammad, "SCADA systems", mechatronics engineering department hashemite university, Octobre 2008.
- [22] A. Roberts, T. Berry, W.D Wilson, " Un système de gestion de la distribution moderne pour les compagnies d'électricité régionales", schneider Electric Ltd, RU,2001.
- [23] G.Robvan,J. Saskia et W. Rob ,C. Kema,"Le comptage intelligent" ,fr.leonardo-energy.org, décembre 2009.
- [24] T. Mark, "Réseaux électriques intelligent", des industriels au service de l'intelligence énergétique, groupement des industries de l'équipement électrique, du contrôle-commande et des services, edition mars 2011.
- [25] F. Gallo, "Courants porteurs de ligne.doc", extraits de source diverses récoltées en 2003.
- [26] C. Bras, "Courant Porteur en Ligne : techniques, enjeux, offres". Cycle C réseaux cnam 2004.
- [27] [http ://www.Intelligence des fibres optiques](http://www.Intelligence des fibres optiques), performance du réseau électrique, 28 février 2011.
- [28] M. Zima, M. Larsson, P. Korba, C. Rehtanz, G. Andersson, "Design Aspects for Wide-Area Monitoring and Control Systems", Proceedings of the IEEE, Vol. 93,n°5, mai 2005.

- [29] F. Iberraken, R. Medjoudj, D. Aissani , K.D. Haim , "ARMA models for blackouts forecasting and markov methode for interruption modeling in electrical power systemes",international conferance AMCME,14-pragne.R.C ,2-4 Avril 2014.
- [30] M.Eric, "Smart Grids :une vision systémique et intégrative de leur développement",Octobre 2010.

Bibliographie

- [01] :L. Wei, B. Yvon ,Z. Eric and R. Daniel, “blackouts: description, analysis and classification”, proceedings of the 6th WSEAS international conference on power systems, lisbon, portugal, september 22-24, 2006.
- [02]: R. Touileb, blackout du 03 février 2003 sur le réseau algérien, société algérienne de l'électricité et du gaz.
- [03] :G. Stéphane, “analyse du blackout nord Américain”, BKW, FMB, ENERGIESA,2004.
- [04] :E.M. Michele, “ le blackout du 28 septembre 2003 en Italie”, SEE –Paris, le 9 février 2004.
- [05] : http://www.fr.wikipedia.org/wiki/Panne_de_courant_de_juillet_2012_en_Inde,2014.
- [06] : D. Gado, Mémoire de Master de statistique appliquée, département de mathématique et sciences physiques à l'ENSP de Yaoundé, 2008-2010.
- [07] : J. Philippe, “Sériés chronologiques”, université paris 1, Septembre 2007.
- [08] : P. Michel, K. Christine, R. Rossignol, séries chronologiques, université paris-sud, Master Ingénierie Mathématiques, deuxième année, Année scolaire 2010–2011.
- [09] : S. Rainer & V.B. Sébastien, 'stat 2414, “Sériés chronologiques”,4^e édition, 26 septembre 2005.
- [10] : O. Roustant , “ Introduction aux séries chronologiques”, école nationale supérieure des mines de saint-etienne, 2008-2009.

Bibliographie

- [11] : P. Corinne , “ séries chronologiques”, quelques éléments du cours, république française institut national de la statistique et des études économiques, Année 2004-2005.
- [12] : A. Florin, “ Séries temporelles : régression, et modélisation ARIMA (p,d,q) ”, 2 décembre 2012.
- [13] : R. Bernard, “ Dur, duré Les séries chronologique”, Centre Interuniversitaire de Calcul de Grenoble, 18 aout 1993.
- [14] : Ch. Arthur, “ modèles de prévision, séries temporelles”, UQAM, ACT6420, Hiver 2011, 15 mai 2012.
- [15] : [http : //math.univ-lille1.fr/ viano/economcours.pdf](http://math.univ-lille1.fr/~viano/economcours.pdf).28 février 2014.
- [16]: http://www.math.unice.fr/~rubentha/enseignement/ST_tp1.pdf, 2008.
- [17]: J.J. Daudin, C. Duby, S.Robin & P. Trécourt, “ analyse de séries chronologiques”, (INA-PG, mathématiques), mai 1996.
- [18]: M. Jean, “initiation au logiciel R”, université paris dauphine, U.F.R. mathématiques de la décision, MAT-6-3 : statistique exploratoire et numérique (NOISE), Année 2005–2006.
- [19]: http://www.statoek.wiso.uni-goettingen.de/.../ts_r_intro.pdf, 19 mai 2008.
- [20]: T. Mini, K. Parmod, and Ch. Vinay, “ design, development, and Commissioning of a Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) laboratory for research and training ”. IEEE transactions on power system, vol. 19, NO.3, august 2004.
- [21]: S. Mohammad, “SCADA systems”, mechatronics engineering department hashemite university, Octobre 2008.
- [22]: A. Roberts, T. Berry, W.D. Wilson, “ un système de gestion de la distribution moderne pour les compagnies d’électricité régionales”, schneider Electric Ltd, RU, 2001.
- [23] : G. Rob van, J. Saskia et W. Rob, C. Kema, “Le comptage intelligent”, fr.leonardo-energy.org, décembre 2009.
- [24] : T. Mark, “réseaux électriques intelligent”, des industriels au service de l’intelligence énergétique, groupement des industries de l’équipement électrique, du contrôle-commande et des services, Edition mars 2011.

Bibliographie

- [25]: <http://www.fdigallo.online.fr/cours/cpl.pd>, extraits de source diverses récoltées en 2003.
- [26] : C. Bras, “Courant Porteur en Ligne : techniques, enjeux, offres”. Cycle C réseaux cnam 2004.
- [27] : [http://www. Intelligence des fibres optiques](http://www.Intelligence%20des%20fibres%20optiques.com), performance du réseau électrique, 28 février 2011.
- [29]: F. Iberraken, R. Medjoudj, D. Aissani , K.D. Haim , “ARMA models for blackouts forecasting and markov methode for interruption modeling in electrical power systemes”,international conferance AMCME,14-pragne.R.C ,2-4 Avril 2014.
- [30] : M. Eric, Smart Grids : “ Une vision systémique et intégrative de leur développement”, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (Paris - 1983),Octobre 2010.

Résumé

Avec l'extension de la dérégulation du système électrique, les réseaux électriques sont exploités de plus en plus près de leurs limites de sécurité et de stabilité. Les conditions d'exploitation des réseaux deviennent de plus en plus complexes. Dans cette situation, des blackouts se produisent plus fréquemment. Les blackouts à grande échelle provoquent d'énormes pertes économiques et sociales. Nous avons tout d'abord analysé les grands blackouts apparus dans le monde en 2003 et 2012, classifié leurs caractéristiques selon des phases temporelles identifiées au préalable. Ensuite on utilise les modèles de Box et Jenkins, et d'ARMA à l'aide de langage R. Pour les prévisions des futurs black-outs aux Etats-Unis. Le comportement des événements futurs semble être constant, grâce à l'intégration de systèmes intelligents dans le réseau électrique, ou de distribution utilisant les TIC pour optimiser toute la chaîne de la production, du transport et de la distribution, et de la consommation d'électricité. Finalement nous avons présenté le plan de remise en service après le black-out.

Mots clés: *Black-outs ; les modèles de Box et Jenkins, ARMA ; les TIC ; Smart Grids, reconstruction du réseau.*

Abstract

With the spread of deregulation, power systems are operated more and more close to their security and stability limits, and system conditions have become increasingly complex. Under this situation, blackouts occur more often, and large-scale black-outs cause enormous economic losses and social problems. Firstly, we analyze the important blackouts in the world from 2003 and 2012. And we classify their features in each phase, and give some recommendations for preventing the future black-outs. Using the Box and Jenkins models, and ARMA models in the field with the distribution of energy using language R. for North American black-outs forecasting. Where the trend is quite constant, we have demonstrated that the ICT integration performs both power system operation and some reliability indices. Finally we presented the plan of start-up after the blackout.

Keys words: *Black-outs; Box and Jenkins models, ARMA models, the ICT integration, Smart Grids, rebuilding of the network.*