



**HAL**  
open science

# CONTRIBUTION AU BON USAGE DE MODELES DE MARKOV

Manuel Avila

► **To cite this version:**

Manuel Avila. CONTRIBUTION AU BON USAGE DE MODELES DE MARKOV. Automatique / Robotique. Université d'Orléans, 2018. tel-02378550

**HAL Id: tel-02378550**

**<https://hal.science/tel-02378550>**

Submitted on 25 Nov 2019

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

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

LABORATOIRE PRISME

## **Habilitation à Diriger des Recherches**

présentée par :

**Manuel AVILA**

Discipline / Spécialité : SCIENCES ET TECHNOLOGIES INDUSTRIELLES

---

## **CONTRIBUTION AU BON USAGE DE MODELES DE MARKOV**

---

soutenue le 10 décembre 2018

### **RAPPORTEURS :**

**Zohra CHERFI BOULANGER** Professeur des Universités, Université de Technologie de Compiègne

**Jean-Marc THIRIET** Professeur des Universités, Université Grenoble Alpes

**Dimitri LEFEBVRE** Professeur des Universités, Université du Havre

---

### **JURY :**

**Zohra CHERFI BOULANGER** Professeur des Universités, Université de Technologie de Compiègne

**Jean-Marc THIRIET** Professeur des Universités, Université Grenoble Alpes

**Dimitri LEFEBVRE** Professeur des Universités, Université du Havre

**Audine SUBIAS** Maître de Conférences HDR, INSA Toulouse

**Kamal MEDJAHER** Professeur des Universités, ENI Tarbes

**Frédéric KRATZ** Professeur des Universités, INSA CVL Bourges

**Youssef TOURE** Professeur des Universités, Université d'Orléans





*A la mémoire de Christine et de Diego.*

*A Stéphanie,  
A Marion, Aurore et Esteban,  
A Mathilde et Antoine  
A mis padres y mis hermanos,  
A mes amis,  
Je dédie ce mémoire.*



# Remerciements

Aussi loin que remontent mes souvenirs, je crois que j'étais déjà passionné par les technologies. Je n'avais pas encore 10 ans que je bricolais une planche en bois et des roulettes pour en faire un skateboard. Dans ma campagne, j'étais plus attiré par les activités extérieures que par la littérature. Il faudra attendre que je tombe sur des livres de science-fiction pour m'éveiller à la lecture.

Merci à Isaac Asimov pour ses nombreuses nouvelles qui ont développé cette passion pour les technologies. Comme le disait Jules Verne : « Tout ce qu'un homme est capable d'imaginer, d'autres hommes seront capables de le réaliser ». Les auteurs de science-fiction et d'anticipation proposent ainsi de nombreux challenges à relever...

Depuis le lycée technique à aujourd'hui, mes activités se sont peu éloignées de la dimension technologique. Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au laboratoire La3i (devenu ensuite PSI) à l'Université de Rouen puis au laboratoire PRISME de l'Université d'Orléans sur le site de Châteauroux de l'IUT de l'Indre.

Je tiens à remercier Youssoufi Touré, alors directeur du laboratoire, d'avoir contribué au développement de l'activité à Châteauroux, notamment en apportant son aide pour l'encadrement des premiers doctorants sur le site. Merci également à Christine Mounaïm qui a suivi à la direction du laboratoire. Merci aussi à Azeddine Kourta, directeur actuel, de m'avoir poussé à présenter cette habilitation à diriger des recherches qui nous permettra à Châteauroux de poursuivre notre développement.

Dans cette phase initiale de développement de nos activités de recherche sur le site de Châteauroux, nous avons pu bénéficier de l'aide de la direction de l'IUT. Je tiens à remercier tout particulièrement Christian Etienne pour avoir œuvré pour le développement de la recherche sur le site. Merci à lui également pour avoir partagé sa grande expérience et sa grande connaissance du système universitaire que ce soit au niveau de la gestion budgétaire ou au niveau de l'innovation pédagogique. Je lui adresse mes sincères remerciements. Merci également à Jean-Christophe Bardet qui a suivi à la direction de l'IUT. Il a su maintenir le soutien à la recherche.

Je tiens ensuite à remercier Frédéric Kratz avec qui nous avons pu réorganiser nos activités de recherche sur le site de Châteauroux autour des problématiques de maintenance. Il a assuré, depuis, l'encadrement des doctorants que nous avons suivis à Châteauroux. Je le remercie également pour les remarques et conseils pour la construction de ce mémoire.

Je remercie vivement Zohra Cherfi Boulanger, Dimitri Lefevre et Jean-Marc Thiriet d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

Je remercie de leur participation à ma soutenance Audine Subias, Kamal Medjaher, Jean-Marc Ogier, Youssoufi Touré et Frédéric Kratz.

Je remercie mes collègues et amis du laboratoire et de l'IUT.

Merci à Nicole pour ses nombreuses relectures.

Merci à Stéphane pour nos nombreux échanges et discussions, pour ses commentaires sur le mémoire et pour me supporter dans le bureau.

Merci à Pascal, Florent, Jean-Christophe, David pour leurs relectures et pour ce travail collaboratif depuis de nombreuses années.

Merci à Marie pour son aide précieuse et pour ses nombreux cafés ou infusions partagés.

Je tiens également à remercier les doctorants avec qui j'ai travaillé et échangé de façon plus ou moins animée.

Merci à Vincent, Tien Sy, Pascal, Bernard et Toufik. L'encadrement de doctorants est une expérience très enrichissante...



## SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>5</b>
<b>CHAPITRE 1 - PRESENTATION SYNTHETIQUE .....</b>	<b>9</b>
1.1 ETAT CIVIL .....	9
1.2 TITRE ET DIPLOMES .....	9
1.3 SITUATION ACTUELLE .....	9
1.4 EXPERIENCE PROFESSIONNELLE .....	10
1.4.1 Enseignement .....	10
1.4.2 Recherche .....	10
1.4.3 Administration .....	10
1.5 SYNTHESE DES ACTIVITES DE RECHERCHE .....	11
1.5.1 Bilan de la production scientifique .....	11
1.5.2 Encadrement doctoral et de stages de recherche .....	11
1.5.3 Participation à la vie scientifique et responsabilités collectives .....	11
1.5.3.1 Participation à la vie scientifique .....	11
1.5.3.2 Participation à des groupes de travail .....	11
1.5.3.3 Organisation de manifestations scientifiques .....	12
1.5.3.3.1 Participation à des comités de programme .....	12
1.5.3.3.2 Participation à l'organisation d'une manifestation .....	12
1.5.3.4 Relectures scientifiques .....	12
1.5.3.4.1 Articles soumis pour des revues internationales .....	12
1.5.3.4.2 Communications soumises à des conférences .....	12
1.5.3.5 Responsabilités collectives diverses .....	13
1.6 SYNTHESE DES ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT ET D'ADMINISTRATION DE L'ENSEIGNEMENT ....	13
1.6.1 Enseignements au niveau Licence : .....	13
1.6.2 Enseignements au niveau Master : .....	14
1.6.3 Administration de l'enseignement .....	14
1.7 PUBLICATIONS : LISTE DETAILLEE .....	15
1.8 ENCADREMENT DOCTORAL ET DE STAGES DE RECHERCHE .....	20
1.8.1 Co-Encadrements de thèses .....	20
1.8.2 Encadrements de stagiaires .....	21
1.8.2.1 Encadrements de stagiaires de Master Recherche .....	21
1.8.2.2 Stagiaires de Recherche étrangers .....	22
<b>CHAPITRE 2 - ACTIVITES PEDAGOGIQUES .....</b>	<b>23</b>

2.1	DETAILS DES ENSEIGNEMENTS .....	24
2.1.1	<i>Enseignements au niveau Licence</i> :.....	24
2.1.2	<i>Enseignements au niveau Master</i> :.....	25
2.2	INNOVATION PEDAGOGIQUE.....	26
2.2.1	<i>La pédagogie par projet</i> .....	26
2.2.2	<i>La démarche</i> .....	27
2.2.3	<i>Application à d'autres disciplines</i> .....	29
2.2.3.1	L'informatique industrielle par le projet.....	29
2.2.3.2	L'automatique par le projet.....	30
2.2.4	<i>Bilan</i> .....	31
2.3	ECHANGES PEDAGOGIQUES INTERNATIONAUX.....	32
2.3.1	<i>Mobilités Erasmus</i> .....	32
2.3.2	<i>Echanges internationaux</i> .....	33
2.4	PILOTAGE DE FORMATIONS .....	34
<b>CHAPITRE 3 - MODELISATION PAR MODELES DE MARKOV.....</b>		<b>37</b>
3.1	LES MODELES DE MARKOV POUR L'ECRIT.....	38
3.1.1	<i>Le problème de l'écrit</i> .....	38
3.1.2	<i>Les Modèles de Markov pour la reconnaissance de l'écrit</i> .....	40
3.1.2.1	Quel sens pour la modélisation ? .....	40
3.1.2.2	Modélisation de la lettre .....	42
3.1.2.3	Modélisation du mot.....	44
3.1.2.4	Modélisation de la phrase.....	45
3.1.3	<i>Synthèse</i> .....	47
3.2	DIAGNOSTIC/PRONOSTIC DE SANTE D'UN SYSTEME INDUSTRIEL.....	47
3.2.1	<i>Diagnostic par MMC</i> .....	51
3.2.1.1	Choix des MMC.....	51
3.2.1.2	Donner du sens à la topologie du MMC.....	51
3.2.1.3	Sous-ensemble pour l'agroalimentaire .....	53
3.2.1.3.1	Codification des observations.....	53
3.2.1.3.2	Résultats obtenus sur une peseuse.....	54
3.2.2	<i>Etat de santé d'un système fondé sur les résidus</i> .....	56
3.2.2.1	Système de régulation du niveau d'eau .....	57
3.2.2.2	Comportement du système.....	59
3.2.2.3	Etat de santé du système par MMC .....	60
3.2.3	<i>De l'état de santé au pronostic</i> .....	62
3.2.3.1	Comportement asymptotique des MMC .....	62
3.2.3.2	Du modèle de Markov au pronostic .....	64
3.2.3.3	Application du pronostic par MMC.....	64

3.2.3.4	Conclusion .....	66
3.3	APPORT DES MMC.....	66
3.3.1	<i>Par rapport à des Lois de survie</i> .....	66
3.3.2	<i>Par rapport à une modélisation fondée sur les résidus</i> .....	68
3.3.3	<i>Du diagnostic au pronostic par MMC</i> .....	68
3.4	CONCLUSION.....	69
<b>CHAPITRE 4 - EVALUATION ET OPTIMISATION DES MODELES DE MARKOV</b>		<b>73</b>
4.1	OUTILS D'OPTIMISATION .....	74
4.1.1	<i>Sensibilité et incertitudes</i> .....	74
4.1.2	<i>Mesures de pertinences de modèles</i> .....	75
4.1.2.1	Entropie de Shannon.....	75
4.1.2.2	Critères d'Akaike, de Bayes et d'Hannan-Quinn .....	76
4.2	OPTIMISATION DE JEUX DE SYMBOLES .....	78
4.2.1	<i>Choix de graphèmes par l'entropie de Shannon</i> .....	78
4.2.1.1	Alphabet hiérarchisé par entropie .....	81
4.2.1.2	Alphabet « entropique » .....	83
4.2.1.2.1	Problématique .....	83
4.2.1.2.2	La réduction .....	84
4.2.1.2.3	Fusion de 2 graphèmes.....	84
4.2.1.2.4	Validation des fusions correctes .....	85
4.2.1.2.5	L'alphabet obtenu sur la base de mots .....	85
4.2.2	<i>Comparaison des résultats obtenus</i> .....	86
4.2.2.1	Résultats des graphèmes hiérarchisés entropiques .....	87
4.2.2.2	Résultats des graphèmes entropiques .....	88
4.3	PERTINENCE DES SYMBOLES ET COMPARAISON DE MODELES .....	89
4.3.1	<i>Modèle de synthèse</i> .....	89
4.3.2	<i>Pertinence des symboles</i> .....	91
4.3.3	<i>Pertinence du corpus d'apprentissage</i> .....	92
4.3.3.1	Analyse sur une fenêtre glissante .....	93
4.3.3.2	Discussion .....	93
4.3.4	<i>Comparaison de modèles</i> .....	94
4.3.4.1	Entropie de Shannon.....	95
4.3.4.2	Maximum de vraisemblance .....	95
4.3.4.3	Critères d'AIC et de BIC.....	96
4.3.4.4	Vérification avec d'autres modèles de synthèse.....	96
4.4	CONCLUSION.....	100
<b>CHAPITRE 5 - PROJET DE RECHERCHE.....</b>		<b>101</b>

5.1	CONTRIBUTION AU CHOIX DE MODELES DE MARKOV.....	102
5.2	APPRENTISSAGE DE MODELES DE MARKOV.....	103
5.3	FINANCEMENT DES PROJETS.....	105
	<b>CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>107</b>
	<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>111</b>

## INTRODUCTION

Comment résumer plus de 20 ans de travaux de recherche menés dans différents laboratoires et sur différents thèmes ?

Mes activités de recherche ont débuté en DEA à l'Université de Rouen. L'étude s'insérait dans le cadre d'une thèse sur le traitement automatique de documents soutenue en 1993 au laboratoire PSI (Trupin, 1993). L'objectif de ce travail concernait la différenciation d'images composées de textes ou de graphiques sur des documents imprimés de tous types. La méthode proposée était originale. Elle consistait à employer la transformation de Hough afin de détecter des alignements dans une image, le propre des images composées de textes étant de présenter des alignements réguliers.

Une application de la Transformée de Hough à la recherche de l'axe de lecture de sommes manuscrites de chèques a ensuite été menée à bien. Mon sujet de thèse était lancé.

La rivière, quand elle prend naissance à sa source, sait-elle quel est le « meilleur » chemin qui la conduira à la mer ou à l'océan ?

De septembre 1992 à décembre 1996 (interruption de 10 mois en raison de mon Service National), j'ai préparé ma thèse de Doctorat au sein du groupe « Analyse de documents » du laboratoire PSI-La3i dans le cadre d'un financement par le Ministère de la Recherche et de l'Espace. Mes travaux ont été consacrés à la recherche et à l'optimisation de modèles markoviens pour la reconnaissance de l'écrit : la lecture des montants littéraux de chèques.

Depuis septembre 1997, en tant qu'ATER, je suis chercheur au laboratoire PRISME de l'Université d'Orléans. Mes activités ont tout d'abord débuté dans l'équipe « vision » puis se sont ensuite orientées vers l'équipe « automatique ».

En septembre 1998, j'ai été nommé Maître de conférences à l'IUT de l'Indre, site de Châteauroux quelques années seulement après sa création. Les infrastructures pédagogiques étaient presque totalement opérationnelles. Cependant pour l'activité recherche, tout restait à faire. Les chercheurs nommés sur Châteauroux étaient associés aux activités du Laboratoire Vision et Robotique (LVR) localisé à Bourges, laboratoire qui, après plusieurs fusions, deviendra le

laboratoire PRISME. Il est présent aujourd'hui sur l'ensemble des sites universitaires de l'Université d'Orléans et sur l'INSA Centre Val de Loire.

Dans ce contexte et en début de carrière, les choix sont relativement restreints : se rattacher à des activités de recherche en s'associant à des collègues sur Bourges ou de tenter de démarrer et de développer des activités localement sur Châteauroux. Mon choix a consisté à développer l'activité de recherche localement, dans cet IUT à dimension humaine. L'un de nos rôles d'Universitaire consiste à contribuer à l'aménagement du territoire notamment en matière de transferts de technologie. C'est à travers ce type de missions que les activités de recherche ont débuté à Châteauroux.

Dès mon arrivée à Châteauroux en 1997, le département GEII était engagé dans une démarche de gestion de projet innovante : placer les étudiants dans une situation semblable à celle pour laquelle nous les formons. Ces projets se faisaient donc très souvent en partenariat avec des industriels. Le premier projet, sur lequel j'ai été impliqué, portait sur la mise à jour d'un Défectographe en partenariat avec la société *Vectra*. Ce premier transfert de technologie était l'amorce d'une longue collaboration. En 2003, le premier sujet de thèse était lancé sur un problème de caractérisation de marquage au sol, traité par des outils de vision. Une seconde thèse suivra quelques années plus tard. L'activité sur le site était lancée...

### **Optimisation**

*Définition* : Démarche consistant à rendre optimal le fonctionnement d'un système

En 2005, nous avons débuté une action de transfert de technologie pour la Société *Michel Kremer*. Ce travail avait pour but de réduire les consommations énergétiques d'une ligne de production de pâtisseries. Après une phase d'expertise de la chaîne de production, nous avons identifié les dispositifs énergivores et nous avons proposé des modifications sur la ligne en installant des composants utilisant les nouvelles (à l'époque) technologies de la communication digitale.

En 2008, nous avons effectué une mission pour la société *Arc International*. Ce travail consistait à mettre en place un moyen de suivi des consommations énergétiques. L'objectif était d'arriver à détecter rapidement une anomalie dans les consommations d'énergie du site de production de verre *Pirex*. Afin de caractériser l'impact d'une anomalie de consommation, nous pouvons signaler que la société *Arc International* est la plus grosse consommatrice d'énergie à Châteauroux, d'où l'importance d'un diagnostic précis et rapide sur ce sujet. Par la suite, plusieurs actions ont été menées dans le cadre de stages d'étudiants afin d'améliorer l'efficacité énergétique du site.

La tendance pour utiliser les « nouvelles » technologies de communication dans les systèmes automatisés orienta nos travaux de recherche autour de la thématique de la eMaintenance. La première thèse sur ce thème débuta en 2007 et ce domaine est devenu notre spécificité.

Dans ce mémoire, après un premier chapitre présentant de façon synthétique mon parcours, je développe dans le second chapitre mes activités autour de la pédagogie. Je liste les disciplines dans lesquelles j'ai apporté ma contribution. Par la suite, je détaille la démarche innovante que j'essaye de développer régulièrement. Je liste également mes expériences en matière d'échanges pédagogiques internationaux. Je termine ce chapitre par un résumé des activités administratives auxquelles j'ai participé.

Les chapitres 3 et 4 sont consacrés, quant à eux, à mes activités de recherche. Dans le chapitre 3, je montre comment les modèles de Markov permettent de répondre à des problématiques variées comme la lecture de textes manuscrits ou la mise en œuvre d'outils de diagnostic et de pronostic de l'état de santé de systèmes industriels. Le chapitre 4 porte sur l'optimisation des modèles de Markov. Les outils présentés peuvent contribuer à améliorer le codage des observations utilisées par les modèles de Markov ainsi que la structure de ceux-ci (topologie, nombre d'états, signification d'un état).

Dans le chapitre 5, je présente mon projet de recherche. Les pistes envisagées sont, d'une part, la contribution au choix de modèles de Markov et, d'autre part, une nouvelle approche pour l'apprentissage de ces modèles. Ce document se termine, comme c'est l'usage, par une conclusion et des perspectives.





# Chapitre 1 - Présentation synthétique

## 1.1 Etat civil

### **Manuel AVILA**

Né le 16 juillet 1969 à Noyon (60), 4 enfants  
Laboratoire PRISME, Université d'Orléans  
IUT de l'Indre  
2 avenue F. Mitterrand  
36000 CHATEAUROUX  
+33(2) 54 08 25 50  
[Manuel.Avila@univ-orleans.fr](mailto:Manuel.Avila@univ-orleans.fr)

## 1.2 Titre et diplômes

- DOCTORAT de l'Université de Rouen : Mention Très Honorable. Titre de la Thèse : « Optimisation de Modèles Markoviens pour la Reconnaissance de l'Écrit ». Directeur de Thèse : Professeur Christian Olivier. Soutenue le 11 décembre 1996 à l'UFR des Sciences de l'Université de Rouen.
- D.E.A Instrumentation et Commande, Option : Instrumentation, Traitement et Commande : Mention Bien. UFR des Sciences, Université de Rouen. 1992
- MAITRISE en Electronique Electrotechnique et Automatique. UFR des Sciences, Université de Rouen. 1991
- DUT Génie Electrique et Informatique Industrielle - Option Automatismes et Systèmes. IUT du Havre. 1989
- BACCALAUREAT série E, Lycée Technique Modeste Leroy, Evreux. 1987

## 1.3 Situation actuelle

Maître de Conférences, 61<sup>ème</sup> Section (Hors Classe au 7<sup>ème</sup> échelon) à l'IUT de l'Indre, Université d'Orléans depuis septembre 1998.

- Enseignant au département Génie Electrique et Informatique Industrielle de l'IUT de l'Indre.
- Chercheur au laboratoire PRISME (EA 4229) de l'Université d'Orléans.

## **1.4 Expérience professionnelle**

### **1.4.1 Enseignement**

- 1991-1992 : Vacataire en DEUG, Université de Rouen.
- 1993-1996 : Moniteur de l'Enseignement Supérieur. Formation du Centre d'Initiation à l'Enseignement Supérieur du Grand Ouest.
- 1996-1997 : Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche, Université de Rouen.
- 1997-1998 : Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche, IUT de l'Indre.
- Depuis 1998 : Maître de Conférences à l'IUT de l'Indre, Département GEII, Université d'Orléans.
- 2009-2011 : Vacataire en Master Maîtrise de l'Efficacité Energétique à l'école Hubert Curien à Bourges.
- Depuis 2009 : Vacataire à l'INSA CVL (site de Bourges anciennement ENSI) sur les technologies numériques communicantes et spécifiques au contexte industriel.
- 2013-2015 : Vacataire en cycle d'Ingénieur à HEI Campus Centre pour des enseignements en électronique numérique (VHDL).
- 2014 : Vacataire à l'INSA CVL en conception de solutions informatiques pour la mise en œuvre de bases de données.
- 2018-2019 : Vacataire en cycle d'Ingénieur à HEI Campus Centre pour des enseignements en systèmes embarqués (Raspberry Pi).

### **1.4.2 Recherche**

- 1992 : Stages de DEA au La3i, « Discrimination texte/graphique par Transformée de Hough », Université de Rouen.
- 1993-1996 : Doctorant au PSI-La3i, « Optimisation de Modèles Markoviens », Université de Rouen.
- Depuis 1997 : Chercheur au Laboratoire PRISME, Université d'Orléans.

### **1.4.3 Administration**

- 2002-2015 : Chargé de Mission TICE à l'IUT de l'Indre.
- 2002 : Porteur du projet de création de la Licence Professionnelle / Automatismes, Réseaux et Internet.
- 2002-2013 : Responsable de la Licence Professionnelle / Supervision des Automatismes et des Réseaux (anciennement Automatismes, Réseaux et Internet).
- 2007-2013 : Coordinateur de l'apprentissage pour la Licence Professionnelle Supervision des Automatismes et des Réseaux (anciennement Automatismes, Réseaux et Internet).
- 2007-2013 : Chef du Département Génie Electrique et Informatique Industrielle.

## 1.5 Synthèse des activités de recherche

### 1.5.1 Bilan de la production scientifique

Liste exhaustive en 1.7

- *Participation à un ouvrage collectif* : 3
- *Articles dans des revues internationales avec comité de lecture* : 6 dont 5 JCR
- *Articles dans des revues nationales avec comité de lecture* : 5
- *Articles dans des revues sans comité de lecture* : 10
- *Conférences internationales à comité de lecture et actes publiés* : 29
- *Conférences nationales à comité de lecture et actes publiés* : 25
- *Conférences sur la pédagogie* : 16
- *Participation à des présentations orales pour les GT* : 11

### 1.5.2 Encadrement doctoral et de stages de recherche

- Thèses soutenues (% cumulé d'encadrement) : 4 (180%)
- Stage de recherche (Master) : 8

### 1.5.3 Participation à la vie scientifique et responsabilités collectives

#### 1.5.3.1 Participation à la vie scientifique

J'ai participé à l'animation des actions de collègues enseignants-chercheurs sur le site de l'IUT de l'Indre à Châteauroux. J'ai associé les collègues à l'encadrement de doctorants sur les financements que j'ai concrétisés avec la société *Vectra* (Ingénierie routière).

- Responsable du contrat d'accompagnement du financement de thèse de Vincent Voisin (Thèse avec la société *Vectra*) de 2003 à 2006.
- Co-responsable scientifique du contrat d'expertise pour la société *Michel Kremer* de 2005 à 2008.
- Responsable du contrat d'accompagnement du financement de thèse de Tien Sy Nguyen (Thèse avec la société *Vectra*) de 2006 à 2010.
- Participation au montage et au suivi du contrat d'accompagnement du financement de la thèse de Jassem Mansouri avec la société *PGA-Astronics* (Ingénierie en avionique).
- Participation au montage et au suivi du projet APR 2013 – Sdf-IO.
- Participation au montage et au suivi du projet APR IA 2017 – IoT\_CIA.

#### 1.5.3.2 Participation à des groupes de travail

- Participation à plusieurs Groupes de Travail (GT) du GdR MACS : GT S3 (Sûreté / Surveillance / Supervision), H2M (Health Management and Maintenance) ex GT MACOD.
- Participation au groupe de travail (GTR) Soutien Logistique, Maintenabilité et Maintenance (SL2M) de l'IMdR (Institut pour la Maîtrise des Risques).

### **1.5.3.3 Organisation de manifestations scientifiques**

#### *1.5.3.3.1 Participation à des comités de programme*

- EPE 2012, International Conférence and Exposition on Electrical and Power Engineering, Iasi, Roumania, October 25-27, 2012.
- EPE 2014, International Conférence and Exposition on Electrical and Power Engineering, Iasi, Roumania, October 16-18, 2014.
- EPE 2016, International Conférence and Exposition on Electrical and Power Engineering, Iasi, Roumania, October 20-22, 2016.
- EPE 2018, International Conférence and Exposition on Electrical and Power Engineering, Iasi, Roumania, October 18-19, 2018.

#### *1.5.3.3.2 Participation à l'organisation d'une manifestation*

- Colloque GEII 2002, IUT de l'Indre, CHATEAUROUX.
- 6<sup>èmes</sup> Journées Doctorales / Journées Nationales MACS, Ecole en Modélisation, Analyse et Conduite des Systèmes Dynamiques (MACS), 16-17 juin 2015, INSA Centre Val de Loire, Campus de BOURGES.
- Qualita 2017, INSA Centre Val de Loire, Campus de BOURGES.
- Congrès du club EEA 2018, INSA Centre Val de Loire, Campus de BLOIS.

### **1.5.3.4 Relectures scientifiques**

#### *1.5.3.4.1 Articles soumis pour des revues internationales*

- IJCA en 2009 : International Journal of Computers and Applications.
- IEEE Trans. RELIABILITY en 2015.
- JESA en 2015 : Journal Européen des Systèmes Automatisés.
- AUTCON en 2015 : Automation in Construction.
- 3x Trans ITS En 2015 : Transactions on Intelligent Transportation Systems.
- Trans ITS En 2016 : Transactions on Intelligent Transportation Systems.
- Trans ITS En 2017 : Transactions on Intelligent Transportation Systems.
- Trans ITS En 2018 : Transactions on Intelligent Transportation Systems.
- IJMI en 2017 : International Journal of Medical Informatics.

#### *1.5.3.4.2 Communications soumises à des conférences*

- EUSIPCO en 2008 : European Conference on Signal Processing.
- Safeprocess en 2015.
- MIM en 2016 : Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control.
- IFAC WC 2017 : International Federation of Automatic Control.
- ICPS 2018 : International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems.

### **1.5.3.5 Responsabilités collectives diverses**

De 2010 à 2011, j'ai été membre élu du conseil de Laboratoire PRISME. Depuis 2016, je représente le site délocalisé de Châteauroux au niveau de ce conseil.

J'ai participé aux comités de sélections pour le recrutement de plusieurs collègues à l'Université d'Orléans et à l'Université de Rouen.

J'ai participé durant de nombreuses années au Conseil de l'Institut de l'IUT (anciennement CA) en tant qu'élu ou en tant que responsable de formations.

De 2002 à 2015, j'étais chargé de mission NTIC dans l'équipe de Direction de l'IUT de l'Indre.

## **1.6 Synthèse des activités d'enseignement et d'administration de l'enseignement**

### **1.6.1 Enseignements au niveau Licence :**

- Electronique Analogique et Numérique : 2<sup>ème</sup> année de DUT GEII (CM, TD, TP)  
*Cours sur la transmission de l'information, orienté fonctions de base de l'électronique (filtre, mélangeur, oscillateur...).*
- Informatique Industrielle : 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> année de DUT GEII (CM, TD, TP)  
*Programmation en assembleur, en C, orientée vers le pilotage de systèmes « industriels » sur la base de programmation synchrone.*
- Logique Programmable (VHDL) : 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> année de DUT GEII (TD, TP)  
*Logique. Configuration de circuits programmables.*
- Système d'exploitation LINUX : LP SAR (CM, TD, TP)  
*Initiation au système Linux. Installation et initiation à l'administration.*
- Réseaux : LP SAR (CM, TD, TP)  
*Modèle OSI. Architecture des réseaux. Configuration de matériels réseaux.*
- Automatique : 2<sup>ème</sup> année de DUT GEII (TD, TP), LP SAR (CM, TD, TP)  
*Identification de système. Choix de correcteurs. Pédagogie par projet en LP SAR : objectif optimisation du réglage de deux axes sur un robot, mise en œuvre d'un Segway en Lego Mindstorm.*
- Innovation : LP Entrepreneuriat (CM, TP)  
*Partage d'expérience de transferts de technologie entre l'université et l'entreprise.*
- Projet : 2<sup>ème</sup> année de DUT GEII, LP SAR  
*Action de partenariat avec différents partenaires industriels. Conception de maquettes pédagogiques. Réalisation (ex : lecteur MP3...).*
- Suivi de stages et d'apprentis : 2<sup>ème</sup> année de DUT GEII, LP SAR, LP Entrepreneuriat.

### 1.6.2 Enseignements au niveau Master :

- Electronique Analogique : Master MEE H. Curien Bourges (CM, TD)  
*Composants et fonctions de base de l'électronique. Interprétation de schémas électroniques.*
- Langage du Web : INSA CVL, H. Curien (TP)  
*HTML, PHP, MySQL.*
- Architecture des systèmes : Cycle Ingénieur INSA CVL Bourges (CM, TD)  
*Modèle OSI. Architecture des réseaux. Ethernet industriel.*
- Systèmes embarqués : Cycle Ingénieur Polytech iBat (TD)  
*Architecture des microprocesseurs. Programmation de microcontrôleurs.*
- Réseaux de communication industriels : Cycle Ingénieur Polytech iBat (CM, TD)  
*Modèle OSI. Architecture des réseaux. Ethernet industriel.*
- FPGA : Cycle Ingénieur HEI Châteauroux (TD, TP)  
*Langage VHDL. Développement et tests d'applications sur une carte FPGA.*
- Suivi d'apprentis : Cycle Ingénieur Polytech iBat.
- Systèmes embarqués à base de Raspberry Pi : Cycle Ingénieur HEI Châteauroux.

### 1.6.3 Administration de l'enseignement

Voici la liste des actions de pilotage dans lesquelles j'ai été impliqué :

- 1998 à 2013 : Conception et administration du système informatique sur le site de Châteauroux.
- 2002 : Portage du dossier pour la création de la Licence Professionnelle Automatismes, Réseaux et Internet devenue depuis Supervision des Automatismes et des Réseaux (LP SAR).
- 2002 à 2013 : Responsable de la LP SAR.
- 2002 à 2007 : Gestion financière des LP Entrepreneuriat, MOTSES et SAR (Centre de Responsabilités unique à l'IUT).
- 2007 : Portage du dossier d'ouverture par apprentissage de la LP SAR.
- 2007 à 2013 : Chef du département Génie Electrique et Informatique Industrielle.

De 2002 à 2013, j'ai eu à rédiger de nombreux rapports d'évaluation pour la LP SAR et pour le département GEII.

## 1.7 Publications : liste détaillée

### Liste classée des publications :

#### *Participation à un ouvrage collectif.*

- [O1] Vrignat P., **Avila M.**, Duculty F., Kratz F., « Towards a Maintenance and Servicing Indicator », Advances in Production Management Systems. New Challenges, New Approaches, Vol 338, pp 113-120, 2010, Burbidge Award for the Best Presentation.
- [O2] Voisin V., **Avila M.**, Emile B., Begot S., Bardet J.C., « Road markings detection and tracking using Hough Transform and Kalman filter », Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), Vol 3708 LNCS, pp 76-83, 2005.
- [O3] Olivier C., Paquet T., **Avila M.**, Lecourtier Yves, « Optimal order of markov-models applied to bankchecks », Series in Machine Perception and Artificial Intelligence, Vol 28, pp 327-338, 1997.

#### *Articles dans des revues internationales avec comité de lecture.*

- [A1] Vrignat P., Aggab T., **Avila M.**, Duculty F., Kratz F., « Improvement indicators for Total Productive Maintenance policy », Control Engineering Practice, Vol 82, Jan 2019, Pages 86-96, **(IF 2,616)**.
- [A2] Vrignat P., **Avila M.**, Duculty F., Kratz F., « Failure Event Prediction Using Hidden Markov Model Approaches », IEEE Transactions on Reliability, Vol 99, pp 1-11, 2015, **(IF 2,729)**.
- [A3] Roblès B., **Avila M.**, Duculty F., Vrignat P., Bégot S., Kratz F., « Hidden Markov model framework for industrial maintenance activities », Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, Vol 228, N° 3, pp 230-242, 2014, **(IF 1,373)**.
- [A4] Vrignat P., **Avila M.**, Duculty F., Aupetit S., Slimane M., Kratz F., « Maintenance policy: degradation laws versus Hidden Markov Model availability indicator », Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, Vol 226, N° 2, pp 137-155, 2012. **Winner of the SAGE Best Paper Prize, (IF 1,373)**.
- [A5] Vrignat P., **Avila M.**, Duculty F., Kratz F., « Use of HMM for Evaluation of maintenance activities », International Journal of Adaptive and Innovative Systems, Vol 1, N° 3/4, pp 216-232, 2010.
- [A6] Olivier C., Paquet T., **Avila M.**, Lecourtier Y., « Optimal order of markov-models applied to bankchecks », International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, Vol 11, N° 5, pp 789-799, 1997, **(IF 1,029)**.

#### *Articles dans des revues nationales avec comité de lecture.*

- [A7] Vrignat P., **Avila M.**, Duculty F., Aupetit S., Slimane M., Kratz F., « Génération d'indicateurs de maintenance par une approche semi-paramétrique et par une approche markovienne », Revue Sciences et Maintenance, Association française des ingénieurs et responsables de maintenance (AFIM), pp 1-28, 2012.
- [A8] Vrignat P., **Avila M.**, Duculty F., Aupetit S., Slimane M., Kratz F., « Estimation du niveau de dégradation d'un processus à l'aide de lois de dégradation et d'un modèle de Markov caché », Journal Européen des Systèmes Automatisés, Vol 1, pp 41-72, 2012.
- [A9] Voisin V., **Avila M.**, Emile B., Begot S., Bardet J.C., « Relevés de profil de routes par stéréoscopie active », revue e-STA, N°4 - Spécial CIFA, Vol 3, 2006.
- [A10] Vrignat P., Duculty F., **Avila M.**, Begot S., Aggab T., Millet J.F., Delouche D., Kratz F., « Développement et utilisation d'applications complémentaires dans une approche SCADA avec une solution communicante Bluetooth », J3EA, Journal sur l'enseignement des sciences et technologies de l'information et des systèmes, 2016.
- [A11] Vrignat P., **Avila M.**, Millet J.F., Roblès B., Duculty F., Bégot S., Bardet J.C., Delouche D., Aggab T., Thuillier J., Kratz F., « Des exemples de briques technologiques dans le cadre d'une application pour l'industrie du futur », 3EI, Société de l'Electricité, de l'Electronique et des TIC, 2018.

**Articles dans des revues sans comité de lecture.**

- [A12] Vrignat P., **Avila M.**, Roblès B., Millet J.F., Duculty F., Begot S., Bardet J.C., Delouche D., Aggab T., Thuillier J., Kratz F., « DES EXEMPLES DE BRIQUES TECHNOLOGIQUES DANS LE CADRE D'UNE APPLICATION POUR L'INDUSTRIE DU FUTUR », Revue 3EI, Société de l'électricité, de l'électronique et des technologies de l'information et de la communication, Vol. 92, pp. 48-64, 2018.
- [A13] Vrignat P., Millet J.F., **Avila M.**, Duculty F., Begot S., Bardet J.C., « La pédagogie par projet en 2ème année GEii, retour sur expérience », Gesi n°90, Revue des Départements : Génie Electrique et Informatique Industrielle en IUT, 2018.
- [A14] Vrignat P., Aggab T., Duculty F., **Avila M.**, Begot S., Millet J.F., Jules-Rossette T., « Une collaboration industrielle dans le cadre de l'Industrie 4.0 », Gesi n°88, Revue des Départements : Génie Electrique et Informatique Industrielle en IUT, pp. 52-55, 2017.
- [A15] Duculty F., Vrignat P., Begot S., **Avila M.**, « Des robots et des bâtiments maintenant connectés aux Smartphones », Revue COVALENCES n°93, Centre Science, 2014.
- [A16] Vrignat P., **Avila M.**, Duculty F., Kratz F., « Retour sur Expérience : sur une thèse passée par un enseignant du second degré en IUT », Gesi, 2011.
- [A17] Vrignat P., **Avila M.**, Duculty F., Begot S., Millet J.F., « Utilisation d'une architecture logicielle dans le cadre d'une mise en place d'une solution multi-clients via un serveur OPC », Gesi n°78, 2011.
- [A18] Vrignat P., **Avila M.**, Duculty F., Limousin S., Magnoux M., « L'IUT de l'Indre sort gagnant des Victoires de l'Apprentissage ! », Gesi n°74, 2010.
- [A19] Vrignat P., **Avila M.**, Duculty F., Begot S., « Identification automatique par codes-barres & historisation des saisies », Gesi n°72, 2009.
- [A20] Vrignat P., **Avila M.**, Etienne C., « Ecology and passion for taste », XPLORE, NewAutomation Award, Munich, 2008.
- [A21] Vrignat P., **Avila M.**, Bardet J.C., « Contrôle Commande et Supervision - Formation et développement in situ et à distance », Gesi n°70, 2007.

**Conférences internationales à comité de lecture et actes publiés.**

- [C1] Aggab T., Kratz F., **Avila M.**, Vrignat P., « Model-based prognosis applied to a coupled four tank MIMO », 10th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes. 2018.
- [C2] Vrignat P., Roblès B., **Avila M.**, Kratz F., « OPC UA: examples of digital reporting applications for current industrial processes », International Conference on Electrical, Control, Automation and Robotics, Xiamen, China, 16-17 September, 2018.
- [C3] Aggab T., Kratz F., Vrignat P., **Avila M.**, « An Approach for Assessment of Level of Degradation and RUL Estimation for a dynamic system », 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Beijing. 2017.
- [C4] Aggab T., Kratz F., Vrignat P., **Avila M.**, « Estimation du niveau de dégradation et de la durée de vie résiduelle pour un système dynamique », QUALITA'2017, Bourges, 2017.
- [C5] Aggab T., Kratz F., Vrignat P., **Avila M.**, « Prognosis Method Using an Observer and Time Series Predictions ». In 10th International Conference on Mathematical Methods in Reliability. 2017.
- [C6] Aggab T., Kratz F., Vrignat P., **Avila M.**, « Remaining Useful Life prediction method using an observer and statistical inference estimation methods », Annual conference of the prognostics and health management society 2017, Oct 2017, St. Petersburg, Florida., United States.
- [C7] Vrignat P., Millet J.F., Duculty F., Bardet J.C., Aggab T., **Avila M.**, « Transfert de technologie pour le contrôle-commande de feux d'artifices », CETISIS, May 2017, Le MANS, France. 2017.
- [C8] Vrignat P., Bégot S., Duculty F., Bardet J.C., Millet J.F., **Avila M.**, « Créer une Interface Homme-Machine : un nouveau support de compétences pour nos enseignements en Licence Professionnelle », CETISIS, May 2017, Le MANS, France. 2017.
- [C9] Aggab T., Vrignat P., **Avila M.**, Kratz F., « Estimation du niveau de dégradation par un modèle de Markov caché multi-flux », QUALITA, Nancy, 2015.
- [C10] **Avila M.**, Begot S., Duculty F., Nguyen T.S., « 2D image based road pavement crack detection by calculating minimal paths and dynamic programming », IEEE International Conference on Image Processing, ICIP, Paris, pp 783-787, 2014.



- [C11] Roblès B., **Avila M.**, Duculty F., Vrignat P., Begot S., Kratz F., « Evaluation of Minimal Data Size by Using Entropy, in a HMM Maintenance Manufacturing Use », MIM'2013 Manufacturing Modelling, Management and Control, Saint Petersburg, Russia, pp 1536-1541, 2013.
- [C12] Roblès B., **Avila M.**, Duculty F., Vrignat P., Begot S., Kratz F., « HMM Framework, for Industrial Maintenance Activities », QUALITA, Compiègne, 2013.
- [C13] Roblès B., **Avila M.**, Duculty F., Vrignat P., Begot S., Kratz F., « Methods to choose the best Hidden Markov Model topology for improving maintenance policy », MOSIM'12, 9th International Conference of Modeling, Optimization and Simulation, Bordeaux, 2012.
- [C14] Roblès B., **Avila M.**, Duculty F., Vrignat P., Kratz F., « Statistical evaluation of Hidden Markov Models topologies, based on industrial synthetic model », INCOM 2012, 14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing Information Control Problems in Manufacturing, Bucharest, Roumania, Vol 14, pp 1029 - 1034, 2012.
- [C15] Vrignat P., **Avila M.**, Duculty F., Roblès B., Kratz F., « Decision support with a markovian approach for maintenance context activities », European Safety and Reliability Conference, Troyes, Vol 1, 2011.
- [C16] Roblès B., **Avila M.**, Duculty F., Vrignat P., Kratz F., « Evaluation of relevance of stochastic parameters on Hidden Markov Models », European Safety and Reliability Conference, Troyes, Vol 1, 2011.
- [C17] Mariut F., Fosala C., **Avila M.**, Petrisor D., « Detection and classification of traffic signs using Gabor Filter », Telecommunications and Signal Processing (TSP), 34th, Budapest, Hungary, pp 554-558, 2011.
- [C18] Petrisor D., Fosala C., **Avila M.**, Mariut F., « Algorithm for Face and Eye Detection Using Colour Segmentation and Invariant Features », Telecommunications and Signal Processing (TSP), 34th, Budapest, Hungary, pp 564-569, 2011.
- [C19] Nguyen T.S., Begot S., Duculty F., **Avila M.**, « Free-form anisotropy: a new method for crack detection on pavement surface images », 18th IEEE International Conference on Image Processing, Bruxelles, Belgique, pp 1069-1072, 2011.
- [C20] Nguyen T.S., Begot S., Duculty F., Bardet J.C., **Avila M.**, « Pavement cracking detection using an anisotropy measurement », 11ème IASTED International Conference on Computer Graphics and Imaging (CGIM), Innsbruck, Austria, 2010.
- [C21] Nguyen T.S., **Avila M.**, Begot S., « Automatic Detection and Classification of Defect on road Pavement using Anisotropy Measure », European Signal Processing Conference, Glasgow, Scotland, pp 617-621, 2009.
- [C22] Nguyen T.S., **Avila M.**, Begot S., Bardet J.C., « Detection of Defects in Road Surface by a Vision System », Electrotechnical Conference, The 14th IEEE Mediterranean, IEEE MELECON, Ajaccio, pp 847 - 851, 2008.
- [C23] Vrignat P., **Avila M.**, Duculty F., Kratz F., « Conventional approaches to the modelling of a dysfunctional process in the context of maintenance activity », Electrotechnical Conference, The 14th IEEE Mediterranean, IEEE MELECON, Ajaccio, pp 41-47, 2008.
- [C24] Emile B., Begot S., **Avila M.**, Bardet J.C., Etienne C., « Estimation of Movement », Proceedings of the IASTED International Conference on Visualization, Imaging and Image Processing (VIIP 2001), Marbella, Spain, pp 642-646, 2001.
- [C25] Paquet T., **Avila M.**, Olivier C., « Word modeling for handwritten word recognition. », Vision Interface, Trois-Rivières, Québec, pp 49-56, 1999.
- [C26] Olivier C., Jouzel F., **Avila M.**, « Markov model order optimization for text recognition », Fourth International Conference on Document Analysis and Recognition, ICDAR, Ulm, Germany, Vol 2, pp 548-551, 1997.
- [C27] Olivier Christian, Paquet Thierry, **Avila M.**, Lecourtier Yves, « Recognition of handwritten words using stochastic models », Third International Conference on Document Analysis and Recognition, ICDAR, Montreal, Canada, Vol 1, pp 19-23, 1995.
- [C28] Olivier C., **Avila M.**, Courtellemont P., Paquet T., Lecourtier Y., « Handwritten word recognition by image segmentation and hidden Markov models », International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, IECON '93, Maui, Hawaiï, Vol 3, pp 2093-2097, 1993.
- [C29] Courtellemont P., Olivier C., **Avila M.**, « 2-D modeling and Hough transform for document analysis », International Conference on Industrial Electronics, Control, Instrumentation, and Automation, Buffalo, USA, Vol 3, pp 1325-1330, 1992.

**Conférences nationales à comité de lecture et actes publiés.**

- [C30] Aggab T., Vrignat P., **Avila M.**, Kratz F., « Etablissement d'un pronostic de dégradation sur un système asservi », 20ème Congrès de Maîtrise des Risques et de Sécurité de Fonctionnement,  $\lambda\mu$ , Saint Malo, 2016.
- [C31] Aggab T., Vrignat P., **Avila M.**, Kratz F., « Estimation du niveau de dégradation d'un système dans un contexte de maintenance dynamique », JN MACS'2015, Bourges, 2015.
- [C32] Roblès B., **Avila M.**, Duculty F., Kratz F., Vrignat P., Begot S., « Industrial degradation level modeling with hidden markov models », 19ème Congrès de Maîtrise des Risques et de Sécurité de Fonctionnement, Lambda Mu, Dijon, 2014.
- [C33] Roblès B., **Avila M.**, Duculty F., Vrignat P., Begot S., Kratz F., « Mise à jour dynamique de Modèles de Markov Cachés : Application dans l'Aide à la Décision pour une Maintenance Préventive Industrielle », CNRIUT, Corte, 2013.
- [C34] Roblès B., **Avila M.**, Duculty F., Vrignat P., Begot S., Kratz F., « Quantité minimale d'observations pour l'estimation de Modèles de Markov Cachés, dans le cadre d'une politique de maintenance préventive », 5èmes Journées Doctorales / Journées Nationales MACS, Strasbourg, 2013.
- [C35] Roblès B., **Avila M.**, Duculty F., Vrignat P., Begot S., Kratz F., « Incertitudes Stochastiques sur des Modèles de Markov Cachés : Application dans l'Aide à la Décision pour une Maintenance Préventive Industrielle », CNRIUT, Colloque National de la Recherche en IUT, Tours, 2012.
- [C36] Roblès B., **Avila M.**, Duculty F., Vrignat P., Begot S., Kratz F., « Mesures de pertinence par les critères du maximum de vraisemblance de BIC et AIC appliqués à l'évaluation des paramètres stochastiques de Modèles de Markov Cachés », CNRIUT, Colloque National de la Recherche en IUT, Tours, Vol 1, 2012.
- [C37] Vrignat P., **Avila M.**, Duculty F., Roblès B., Begot S., Kratz F., « Generation d'indicateurs dans le cadre d'une politique de maintenance preventive conditionnelle », 18ème Congrès de Maîtrise des Risques et de Sécurité de Fonctionnement, Lambda Mu, Tours, Vol 1, pp 177-196, 2012.
- [C38] Vrignat P., **Avila M.**, Duculty F., Aupetit Sébastien, Slimane Mohamed, « Génération d'indicateurs de maintenance par une approche semi-paramétrique et par une approche markovienne », 12ème forum international de la maintenance, Paris, 2011.
- [C39] Roblès B., **Avila M.**, Duculty F., Vrignat P., Kratz F., « Mesures de pertinence par les critères du maximum de vraisemblance et de BIC appliqués à l'évaluation des paramètres stochastiques de modèles de Markov cachés », 17ème Colloque National de la Recherche en IUT (CNRIUT), Cherbourg, 2011.
- [C40] Roblès B., **Avila M.**, Duculty F., Vrignat P., Kratz F., « Evaluation de la pertinence des paramètres stochastiques sur des Modèles de Markov Cachés », 16ème Colloque National de la Recherche en IUT (CNRIUT), Angers, 2010.
- [C41] Nguyen T.S., **Avila M.**, Begot S., Duculty F., Bardet J.C., « Etude d'un algorithme de détection de défauts sur des images de chaussées », XXII° Colloque GRETSI, Dijon, 2009.
- [C42] Vrignat P., **Avila M.**, Duculty F., Kratz F., « Evaluation et organisation des activités opérationnelles en maintenance dans le cadre de processus industriels », Colloque International Francophone, Evaluation des Performances et Maîtrise des Risques Technologiques pour les Systèmes Industriels et Energétiques, Le Havre, 2009.
- [C43] Vrignat P., **Avila M.**, Duculty F., Roblès B., Kratz F., « Utilisation des chaînes de Markov cachées pour une évaluation des activités de maintenance dans le cadre d'un processus industriel pour l'agroalimentaire », 15ème Colloque National de la Recherche en IUT (CNRIUT), Lille, 2009.
- [C44] Vrignat P., **Avila M.**, Duculty F., Kratz F., « Modélisation des dysfonctionnements d'un système dans le cadre d'activités de maintenance », 16ème Congrès de Maîtrise des Risques et de Sécurité de Fonctionnement, Lambda Mu, Avignon, 2008.
- [C45] Nguyen T.S., Vrignat P., **Avila M.**, Begot S., Duculty F., « Détection de défauts sur la surface de chaussées par système de vision », XXI° Colloque GRETSI, Troyes, 2007.
- [C46] Voisin V., **Avila M.**, Emile B., Begot S., Bardet J.C., « Relevés de profil de routes par stéréoscopie active », Conférence Internationale Francophone d'Automatique, CIFA 2006, Bordeaux, 2006.
- [C47] Emile B., **Avila M.**, Begot S., Bardet J.C., Etienne C., « Estimation du mouvement d'un amer dans une image », TAIMA, Hammamet, Tunisie, 2001.
- [C48] Emile B., **Avila M.**, Begot S., « Etude du mouvement d'un robot », 6ème Colloque National de la Recherche en IUT (CNRIUT), Bourges, 2000.

- [C49] Buzduga M., Etienne C., **Avila M.**, Bardet J.C., Emile B., « Interactions dans un double oscillateur électromagnétique », 5ème Colloque National de la Recherche en IUT, Aix-en-provence, 1999.
- [C50] Paquet T., **Avila M.**, Olivier C., « Modélisation de mots manuscrits: une étude comparative. », 11ème RFLA, Clermont-Ferrand (France), pp 425-432, 1998.
- [C51] Bardet J.C., Buzduga M., Etienne C., **Avila M.**, « Suivi de la trajectoire d'un robot », 4ème Colloque National de la Recherche en IUT, CNRIUT'98, Créteil Fontainebleau, pp 367-368, 1998.
- [C52] Paquet Thierry, Olivier C., **Avila M.**, « Reconnaissance de mots manuscrits par modèle de Markov », XV° Colloque GRETSI, Juan les Pins, Vol 2, pp 637-640, 1995.
- [C53] Olivier C., Courtellemont P., **Avila M.**, Paquet T., « Traitement des sommes littérales de chèques. », 6th Int. Conf. on handwriting and drawing, Paris (France), pp 37-39, 1993.
- [C54] **Avila M.**, Olivier C., Paquet T., Lecourtier Y., « Procédure de reconnaissance de l'écriture manuscrite, basée sur des chaînes de Markov cachées, et appliquée à un vocabulaire limité », 14ème colloque GRETSI, Juan les Pins, Vol 2, pp 803-806, 1993.

***Conférences sur la pédagogie et applications en ingénierie.***

- [C55] Begot S., Duculty F., **Avila M.**, Vrignat P., Bardet J.C., « Approche « rolistique » de la pédagogie ou développer sa compétence à transmettre », Colloque international Apprendre, Transmettre, Innover à et par l'Université, ATIU, 2ème Edition, Montpellier, France, 2018.
- [C56] Vrignat P., Millet J.F., Duculty F., Bardet J.C., Aggab T., **Avila M.**, « Transfert de technologie pour le contrôle-commande de feux d'artifices », CETSIS, Colloque sur l'Enseignement des Technologies et des Sciences de l'Information et des Systèmes, 12ème Edition, Le Mans, France, 2017.
- [C57] Vrignat P., Begot S., Duculty F., Bardet J.C., Millet J.F., **Avila M.**, « Créer une Interface Homme-Machine : un nouveau support de compétences pour nos enseignements en Licence Professionnelle », CETSIS, Colloque sur l'Enseignement des Technologies et des Sciences de l'Information et des Systèmes, 12ème Edition, Le Mans, France, 2017.
- [C58] Vrignat P., Duculty F., **Avila M.**, Begot S., Millet J.F., Delouche D, « En route vers l'industrie 4.0 retour sur experience dans nos enseignements », Questions de Pédagogie dans l'Enseignement Supérieur, QPES, Brest, 2015.
- [C59] Vrignat P., Millet J.F., Duculty F., Begot S., **Avila M.**, « A technology shift for a fireworks controller », 2nd International Congress in Education, Innovation and Learning Technologies, Granada, Spain, 2015.
- [C60] Vrignat P., Millet J.F., Duculty F., Begot S., **Avila M.**, « Développement et utilisation d'applications complémentaires dans une approche SCADA : retour sur expérience avec des étudiants Bac+2 et Bac+5 », 11ème CETSIS, Besançon, pp 76-81, 2014.
- [C61] Vrignat P., Millet J.F., Duculty F., Begot S., **Avila M.**, « Rédaction d'un cahier des charges fonctionnel dans le cadre d'une organisation au sein d'un projet : retour sur expérience avec des étudiants Bac+2 », 28ème Congrès - Association Internationale de Pédagogie Universitaire, Mons, Belgique, 2014.
- [C62] Vrignat P., Duculty F., Begot S., Millet J.F., Roblès B., **Avila M.**, « Solution Bluetooth : utilisation d'une architecture logicielle dans le cadre d'une mise en place d'une solution multi-clients à partir d'un serveur OPC », 10ème CETSIS, Caen, 2013.
- [C63] Begot S., Duculty F., **Avila M.**, Vrignat P., Millet J.F., Bardet J.C., « Une possible réponse ludique pour les processus industriels communicants », 9ème CETSIS, Trois Rivières, Québec, 2011.
- [C64] Duculty F., **Avila M.**, Vrignat P., Millet J.F., Begot S., Bardet J.C., « Développement d'une maquette pédagogique virtuelle pour la programmation de Grafset en langage C sur microprocesseur en informatique industrielle », 9ème CETSIS, Trois Rivières, Québec, 2011.
- [C65] Duculty F., **Avila M.**, Begot S., Vrignat P., Josserand L., Novales C., « Web embarqué : du projet tuteuré aux travaux pratiques sur un module d'E/S communicant », CETSIS, Grenoble, 2010.
- [C66] Vrignat P., Begot S., Duculty F., **Avila M.**, « Une nouvelle approche de la maintenance " on-line " : un cas d'ecole », CETSIS, Bruxelles, 2008.
- [C67] Nguyen T.S., **Avila M.**, Begot S., Duculty F., « Détection de fissures sur des images de chaussées », 13ème Colloque National de la Recherche en IUT (CNRIUT), Thionville, 2007.
- [C68] **Avila M.**, Vrignat P., Begot S., Duculty F., « Approche de l'électronique par les fonctions », CETSIS, Bordeaux, 2007.

- [C69] Vrignat P., **Avila M.**, Bardet J.C., Kratz F., « Que peut-on attendre aujourd'hui des nouveaux produits d'automatisme pour la e-maintenance ? », 13ème Colloque National de la Recherche en IUT (CNRIUT), Thionville, 2007.
- [C70] **Avila M.**, Bardet J.C., Begot S., Vrignat P., Stride N., « La pédagogie par projets », CETSIS, Nancy, 2005.

### **Mémoire.**

- [M1] **Avila M.**, « Optimisation de modèles markoviens pour la reconnaissance de l'écrit », Thèse de doctorat, Rouen, 1996.

### **Présentation en Groupe de Recherche.**

- [GT1] Aggab T., Vrignat P., **Avila M.**, Kratz F., « Estimation de la RUL par l'utilisation conjointe d'un observateur et d'un MMC », GT Recherche Méthodologique de l'IMdR le 19 Janvier 2017.
- [GT2] Aggab T., Vrignat P., **Avila M.**, Kratz F., « Estimation de l'état de santé et de la RUL d'un système contrôlé en boucle fermées' », GT S3 le 15 Septembre 2016.
- [GT3] Aggab T., Vrignat P., **Avila M.**, Kratz F., « Estimation de la RUL par l'utilisation conjointe d'un observateur et d'un HMM », GT H2M Journées STP Nantes, le 26 novembre 2015.
- [GT4] Aggab T., Vrignat P., **Avila M.**, Kratz F., « Estimation du niveau de dégradation d'un système », GT SL2M de l'IMdR le 11 décembre 2014.
- [GT5] Aggab T., Vrignat P., **Avila M.**, Kratz F., « Prognosis approach based on Multi-stream HMM », Séminaire Jeunes Chercheurs. Université d'Orléans, 4-5 juin 2015.
- [GT6] Vrignat P., **Avila M.**, Duculty F., Kratz F., « Modélisation des dysfonctionnements d'un système dans le cadre d'activités de maintenance », IMdR - GT REX : Réunion n°12, Paris, 31 Mars 2008.
- [GT7] Vrignat P., **Avila M.**, Duculty F., Kratz F., « Génération d'indicateurs dans le cadre d'une politique de maintenance préventive conditionnelle », Journée "Risque" du pôle scientifique 3, Université d'Orléans, 5 juin 2012.
- [GT8] Vrignat P., **Avila M.**, Duculty F., Kratz F., « Génération d'indicateurs de maintenance par une approche semi-paramétrique et par une approche markovienne », 12ème Forum international de la maintenance, AFIM, Villepinte, PARIS, 15 novembre 2011.
- [GT9] Vrignat P., **Avila M.**, Duculty F., Kratz F., « Génération d'indicateurs de maintenance par une approche semi-paramétrique et par une approche markovienne », Journée sur les processus stochastiques, Pôle IRAus, Université d'Orléans, 6 octobre 2011.
- [GT10] Vrignat P., **Avila M.**, Duculty F., Kratz F., « Aide la planification de la maintenance : Quels indicateurs ? », GT S3 (Sûreté - Surveillance - Supervision) - GDR MACS, Paris, ENSAM, 19 octobre 2009.
- [GT11] Vrignat P., **Avila M.**, Duculty F., Kratz F., « Estimation du taux de dégradation d'un processus et aide à la décision pour un meilleur ordonnancement des activités opérationnelles de maintenance », R&D EDF, Chatou-Paris, 13 octobre 2008.

## **1.8 Encadrement doctoral et de stages de recherche**

### **1.8.1 Co-Encadrements de thèses**

- **Vincent VOISIN**

« Utilisation de la vision, dans une solution multi-capteurs pour l'amélioration de la gestion d'infrastructures routières », Doctorant Université d'Orléans, 2003-2006

Directeur de Recherche : Y. Touré (10%), Co-Encadrants : M. Avila (60%), S. Bégot (30%)

Financement : Bourse CIFRE avec la société *Vectra*

Publications : [O2], [A9], [C46]

Dernière situation connue : Ingénieur à l'INRETS

Thèse non soutenue. Abandon du doctorant, pour raisons personnelles, dans la phase de rédaction.

- **Tien Sy NGUYEN**

« *Extraction de structures fines sur des images texturées : application à la détection automatique de fissures sur des images de chaussées* »

Date de soutenance : 30 Novembre, 2010

Directeur de Recherche : Y. Touré (10%), Co-Encadrants : M. Avila (60%), S. Bégot (30%)

Financement : Bourse Région cofinancée par la société *Vectra*

Publications : [C10], [C11], [C19-C22], [C41], [C45], [C67]

Situation actuelle : Ingénieur chez Diagway

- **Pascal VRIGNAT**

« *Génération d'indicateurs de maintenance par une approche semi-paramétrique et par une approche markovienne* »

Date de soutenance : 14 Octobre, 2010

Directeur de Recherche : F. Kratz (40%), Co-Encadrants : M. Avila (30%), F. Duculty (30%)

Sans financement : Collègue PRAG

Publications : [O1], [A4-A5], [A7-A8], [C15-C16], [C23], [C37-C40], [C42-C45]

Situation actuelle : Maître de Conférences à l'IUT de l'Indre, Chercheur au laboratoire PRISME

- **Bernard ROBLES**

« *Etude de la pertinence des paramètres stochastiques sur des Modèles de Markov Cachés paramétriques et semi-paramétriques, mesures des incertitudes et recherche des symboles manquants dans l'élaboration des modèles* »

Date de soutenance : 18 décembre 2013

Directeur de Recherche : F. Kratz (40%), Co-Encadrants : M. Avila (30%), F. Duculty (30%)

Sans financement : Collègue BIATS

Publications : [A3], [C11-C16], [C32-37], [C39-C40], [C43]

Situation actuelle : Ingénieur d'études à l'IUT de l'Indre, Chercheur au laboratoire PRISME

- **Toufik AGGAB**

« *Politique de maintenance adaptative basée sur un processus de pronostic de dégradation* »

Date de soutenance : 12 décembre 2016

Directeur de Recherche : F. Kratz (40%), Co-Encadrants : M. Avila (30%), P. Vignat (30%)

Financement : Bourse MESR

Publications : [A1], [A14], [C1], [C3-C7], [C9], [C30-C31]

Situation actuelle : ATER IUT de Figeac, Chercheur au laboratoire PRISME

- **Jassem MANSOURI**

« *Modélisation et commande d'un système multiaxes sous contraintes spatiales et contrôle de charge* »

Date de soutenance : 27 novembre 2018

Doctorant Université d'Orléans, octobre 2014 - septembre 2017

Directeur de Recherche : F. Kratz (40%), Co-Encadrants : M. Avila (30%), S. Bégot (30%)

Financement : Bourse CIFRE avec la société *PGA Astronics*

## 1.8.2 Encadrements de stagiaires

### 1.8.2.1 Encadrements de stagiaires de Master Recherche

- Master de **Jassem Mansouri** : « *Modélisation d'un système multi-axes avec des contraintes spatiales* », avril-août 2014.
- Master de **Pascal Vignat** : « *Modélisation des dysfonctionnements d'un système dans le cadre d'activités de maintenance* », Rapport de stage, Master 2 Recherche, Université d'Orléans, 2007.

### ***1.8.2.2 Stagiaires de Recherche étrangers***

- Période doctorale de **Felix Mariut** : ce stage a fait l'objet d'une communication [C17] sur un algorithme de détection des yeux.
- Période doctorale de **Daniel Petrisor** : ce stage a fait l'objet d'une communication [C18] sur un algorithme de détection et de reconnaissance de marquages routiers.
- Stage Master 2 de **Oana Costea** : ce projet de transfert de technologie avec *PGA* concernait l'étude d'une solution tout IP fondée sur un système embarqué (Xp Embedded).
- Stage Master 2 de **Alina Samoila** : ce projet de transfert de technologie avec *PGA* concernait l'étude d'une solution tout IP fondée sur un système embarqué (Xp Embedded).
- Stage de **Timo Lohonen** : ce projet de transfert de technologie pour la société *Merkur* consistait à instrumenter un banc de mesures de filtres afin de caractériser leur colmatage.
- Stage Master 2 de **Daniel Popa** : ce projet de transfert de technologie avec la société *Vectra* consistait à associer un GPS et une centrale inertielle (bas coût) afin de réaliser une localisation précise de véhicule.

## Chapitre 2 - Activités pédagogiques

Le métier d'enseignant est pleinement complémentaire à celui de chercheur. La capacité à transmettre les connaissances est primordiale pour permettre d'avancer sur des sujets complexes. Quelle meilleure façon de progresser, sur le plan de la communication, que de tenter de faire assimiler des informations à des apprenants « récalcitrants » ? Ce sont moins les étudiants brillants, que ceux qui ont des difficultés de compréhension qui nous poussent à expérimenter de nouvelles approches de la pédagogie...

L'enseignement : aide ou contrainte pour le chercheur ?

Lors de mon arrivée dans le département GEII de l'IUT de l'Indre sur le site de Châteauroux, je ne disposais que de quelques années d'expérience concernant le métier d'enseignant. Durant mon DEA, j'avais expérimenté l'enseignement en assurant quelques TP de physique en première année de DEUG. Puis, j'ai obtenu un poste de moniteur de l'enseignement supérieur durant ma thèse. Les formations associées au contrat de 64 heures annuelles ont éveillé ma curiosité pour l'innovation pédagogique. Je me souviens de cette séance où nous, les stagiaires, étions à distance de l'objet à analyser : un pendule perpétuel. Nous devions imaginer ce qui se cachait dans l'objet sans pouvoir le toucher ou l'approcher. Cet exercice n'était en fait qu'un prétexte pour placer les étudiants dans une phase active d'accès à l'information, phase active en opposition à un état souvent passif de l'apprenant lorsqu'il assiste à un cours magistral. Depuis, j'essaie, autant que possible, de provoquer ce genre de situation par le biais de la pédagogie inversée ou de la pédagogie dite par projet.

Lors de mon arrivée à Châteauroux, il m'a été confié le module d'électronique : « transmission de l'information ». J'ai progressivement fait évoluer son contenu vers une approche de l'électronique par les fonctions : une première étape vers l'innovation pédagogique. J'ai assuré les cours, les travaux dirigés et les travaux pratiques de cet enseignement. J'ai conçu des maquettes de TP sur la base d'une « carte mère » recevant des fonctions élémentaires (filtre, oscillateur, mélangeur...) pour constituer des systèmes plus complexes (PLL, démodulateur...). J'ai partagé cette expérience dans le cadre d'une présentation au CETSIS en 2007 [C68] : présentation d'une démarche orientée vers l'innovation pédagogique.

## 2.1 Détails des enseignements

Les principaux enseignements dans lesquels j'interviens sont :

- L'électronique,
- L'informatique industrielle et les objets connectés,
- L'automatique,
- L'administration de systèmes d'exploitation « Linux ».

### 2.1.1 Enseignements au niveau Licence :

- Electronique Analogique et Numérique : 2<sup>ème</sup> année de DUT GEII  
*Cours sur la transmission de l'information, orienté fonctions de base de l'électronique (filtre, mixer, oscillateur, ...).*
- Informatique Industrielle : 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> année de DUT GEII  
*Programmation en assembleur, en C, orientée vers le pilotage de systèmes « industriels » sur la base de programmation synchrone.*
- Logique Programmable (VHDL) : 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> année de DUT GEII  
*Logique. Configuration de circuits programmables.*
- Système d'exploitation LINUX : LP SAR  
*Initiation au système Linux. Installation et initiation à l'administration.*
- Réseaux : LP SAR  
*Modèle OSI. Architecture des réseaux. Configuration de matériels réseaux.*
- Automatique : 2<sup>ème</sup> année de DUT GEII, LP SAR  
*Identification de système. Choix de correcteurs. Pédagogie par projet en LP SAR : objectif optimisation du réglage de deux axes sur un robot, mise en œuvre d'un Segway en Lego Mindstorm.*
- Innovation : LP Entrepreneuriat  
*Partage d'expérience de transferts de technologie entre université et entreprise.*
- Projet : 2<sup>ème</sup> année de DUT GEII, LP SAR  
*Action de partenariat avec différents partenaires industriels. Conception de maquettes pédagogiques. Réalisation (ex : lecteur MP3...).*
- Suivi de stages et d'apprentis : 2<sup>ème</sup> année de DUT GEII, LP SAR, LP Entrepreneuriat.

J'ai créé l'enseignement en administration de systèmes d'exploitation « Linux » lors de la mise en place de la Licence Professionnelle Supervision des Automatismes et des Réseaux (LP SAR). L'objectif de cet enseignement était de faire découvrir cette alternative en matière de systèmes d'exploitation. Dans le cadre de la LP, il s'agissait de donner des bases au niveau de l'hébergement de services Internet. Les étudiants sont tenus d'installer un système Linux complet avec plusieurs services réseaux (Apache, DNS, NFS, nagios, Samba...). Cette confrontation avec la mise en œuvre de ces différents services permet d'acquérir les premières bases d'administration d'un système Linux.



### 2.1.2 Enseignements au niveau Master :

- Electronique Analogique : Filière MEE H. Curien Bourges  
*Composants et fonctions de base de l'électronique. Interprétation de schémas électroniques.*
- Langage du Web : INSA CVL, H. Curien  
*HTML, PHP, MySQL.*
- Architecture des systèmes : Cycle Ingénieur INSA CVL Bourges  
*Modèle OSI. Architecture des réseaux. Ethernet industriel.*
- Systèmes embarqués : Cycle Ingénieur Polytech iBat  
*Architecture des microprocesseurs. Programmation de microcontrôleurs.*
- Réseaux de communication industriels : Cycle Ingénieur Polytech iBat  
*Modèle OSI. Architecture des réseaux. Ethernet industriel.*
- FPGA : Cycle Ingénieur HEI Châteauroux  
*Langage VHDL. Développement et tests d'applications sur une carte FPGA.*
- Suivi d'apprentis : Cycle Ingénieur Polytech iBat.
- Systèmes embarqués à base de Raspberry Pi : Cycle Ingénieur HEI Châteauroux.

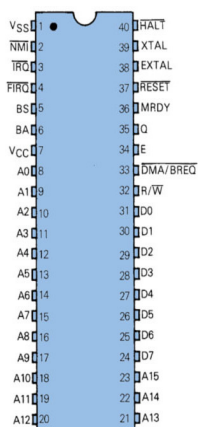
Depuis 2009, j'interviens dans la formation d'Ingénieurs de l'INSA CVL à Bourges (anciennement ENSI) sur la spécialité : architecture des systèmes industriels. Mon intervention porte sur les technologies communicantes spécifiques au contexte industriel : l'Ethernet industriel.

De 2011 à 2015, je suis intervenu pour la formation d'Ingénieurs HEI sur le site de Châteauroux. Nous avons développé avec un collègue un cours sur la programmation de cibles FPGA en langage VHDL fondé sur la pédagogie par projet. Les étudiants avaient pour objectif de réaliser un jeu de type "Pong".

Il est plus simple de mettre en place la pédagogie par projet avec des élèves- ingénieurs. Ce type de démarche correspond à leur futur quotidien professionnel. Malgré cela, la difficulté réside dans le dosage du degré de complexité de l'objet à réaliser. Trop simple, il ne permettra pas de mobiliser les étudiants ; trop complexe, les étudiants risquent de ne pas voir le bout du tunnel et ils pourraient rapidement se démotiver.

Depuis septembre 2018, j'interviens sur l'enseignement des systèmes embarqués. Sur la base d'une plateforme robotique Poppy, les étudiants doivent configurer et interfacier la carte Raspberry Pi avec l'outil Matlab. La démarche adoptée s'appuie également sur la pédagogie par projet.

## 2.2 Innovation pédagogique



Comme le montrent les paragraphes précédents, le DUT Génie Electrique et Informatique Industrielle offre la possibilité d'intervenir sur de nombreuses disciplines. J'ai eu la possibilité de contribuer dans plusieurs d'entre elles.

J'ai participé à des enseignements en informatique industrielle. Dans ce cadre, j'ai créé plusieurs maquettes de TP comme, par exemple, une partie opérative réelle pilotée par carte microprocesseur : un 6809. Depuis, nous avons fait évoluer nos solutions technologiques avec des cartes à base de microcontrôleur actuel pilotant des parties opératives émulées. Nous avons conçu ces maquettes en interfaçant la partie opérative virtuelle avec des cartes zWorld programmables en langage C. Ces

TP nous permettent de travailler sur des sujets parfaitement adaptés pour mettre en œuvre une stratégie de programmation dite synchrone. Ces réalisations ont fait l'objet d'une présentation au CETSIS en 2011 [C64] .

Depuis la création de la licence professionnelle Supervision des Automatismes et des Réseaux, nous avons eu à monter de nouveaux cours et maquettes de TP. Ces créations ont fait l'objet de nombreuses présentations de la part de l'équipe pédagogique : aux différents CETSIS depuis 2008 (7 présentations [C56], [C62-C66]), à la conférence QPES 2015 [C58] , dans différents GESI (revue des départements GEII [A14], [A17], [A19], [A21]) et dans le journal J3EA en 2016 [A10].

### 2.2.1 La pédagogie par projet

Depuis quelques années, j'ai repris l'enseignement de l'automatique en Licence Professionnelle Supervision des Automatismes et des Réseaux. La particularité des étudiants de cette formation est qu'ils viennent de parcours de formations très variés. De facto, ils présentent un niveau de compétences très hétérogène en automatique. De plus, le volume horaire étant relativement faible, la pédagogie se devait d'être spécifique. Après avoir testé une pédagogie « classique » (CM, TD, TP), j'ai opté pour une pédagogie par projet. Cette adaptation fait suite à plusieurs échanges aux conférences CETSIS avec notamment des collègues québécois adeptes de ce type d'approche. J'ai donc proposé aux étudiants un sujet concret de réglages de commandes d'axes. Disposant d'un robot conçu en local, composé de deux axes différents : une vis à billes pour l'un et une courroie crantée pour l'autre, leur travail consistait donc, à régler les paramètres des variateurs (correcteurs) pour optimiser les déplacements sur ces

Trop d'autonomie tue l'autonomie ?  
Encadrement ou assistantat ?

deux axes. Les étudiants étaient donc amenés rapidement à manipuler sur les systèmes et à se poser les questions du bon choix des paramètres de réglages.



Ne disposant que d'une seule partie opérative, j'ai par la suite changé la cible sur laquelle les étudiants travaillaient. Maintenant, je leur propose un kit Lego Mindstorm et je leur demande de mettre en œuvre un gyropode à échelle réduite (type de pendule inversé). C'est un sujet suffisamment complexe, bien adapté à la démarche de pédagogie par projet.

De plus, cette démarche projet s'intègre de façon plus générale dans la formation des étudiants. C'est une opportunité supplémentaire pour les inciter à adopter cette démarche.

A mon arrivée à l'IUT, Christian Etienne, alors responsable du DUT GEII, avait proposé une démarche permettant d'intégrer un projet tuteuré dans la formation des étudiants de deuxième année. Pour permettre la mise en œuvre d'un projet transverse pluridisciplinaire, des heures avaient été prélevées dans chacune des disciplines de la maquette pédagogique de la formation afin de pouvoir en assurer l'encadrement. Le client de ces projets était, soit interne à l'IUT, soit un partenaire industriel. L'objectif principal de cette activité pédagogique consistait à guider l'étudiant vers une démarche professionnelle en :

- rédigeant un cahier des charges fonctionnel,
- travaillant en groupe,
- planifiant les actions à mener,
- chiffrant le budget du projet,
- présentant le travail effectué...

Cette démarche projet a fait l'objet de plusieurs présentations : CETSIS 2005 [C70], AIPU 2014 [C61] et ICEILT 2015 [C59]. Depuis le programme pédagogique national (PPN) de 2005, les projets tuteurés font partie intégrante du programme de formation...

### 2.2.2 La démarche

A travers un projet, nous essayons de placer les étudiants dans une situation professionnelle « réelle » avec des contraintes similaires tout en proposant des sujets intéressants qu'ils doivent pouvoir s'approprier. Notre souhait est de leur soumettre des sujets dans lesquels ils deviennent acteurs et ne se contentent plus de rôles de « bons exécutants, de consommateurs ou de

spectateurs ». Ces projets se font parfois en partenariat avec des industriels, ce qui ajoute de l'intérêt et une motivation supplémentaire pour les étudiants. Ces projets sont nouveaux (ou presque) tous les ans et sont différents pour chaque groupe de projet. Cela implique un investissement important des étudiants et des enseignants qui encadrent ces projets.

- **Cahier des charges fonctionnel**

La première étape du projet consiste à vérifier la bonne compréhension du besoin exprimé par le « client ». Cette étape passe donc par la rédaction du cahier des charges fonctionnel qui permet de retranscrire le besoin exprimé. Une fois ce document validé, il prend un rôle contractuel entre le client et le prestataire (cf. enseignant et élèves).

- **Groupe de travail**

La réalité du monde du travail est qu'il est très rare de trouver des travailleurs isolés. Aujourd'hui, la capacité à travailler en groupe est un levier d'accès à l'emploi essentiel. Pour répondre à la mission confiée par le client, un travail en groupe efficace est donc primordial. Des outils de planification, de répartition des tâches, de suivi sont alors nécessaires pour bien avancer dans le projet. Malheureusement, notre expérience avec les étudiants montre que ces outils ne prennent réellement de sens qu'après un échec : un projet qui n'est pas mené jusqu'au bout faute de temps, d'organisation ou de moyens.

- **Planification**

Comment gérer plusieurs actions à mener en répartissant le travail sur chaque membre de l'équipe ? C'est la question essentielle posée par la contrainte associée à un projet. Après avoir traduit la mission du client à l'aide du cahier des charges fonctionnel, il faut quantifier les tâches à mener et les répartir sur les membres du groupe pour créer le planning prévisionnel. L'erreur fréquente des étudiants est de vouloir refaire le planning prévisionnel pendant l'avancement du projet alors qu'il doit servir de référentiel par rapport aux échéances et permettre de déclencher des « actions correctives » pour garantir la livraison en temps et en heure.

- **Rendre compte**

Malgré d'excellentes compétences techniques, de grandes capacités de travail, une bonne organisation, le client peut être insatisfait. Pour quelle raison ? L'explication des solutions proposées est incompréhensible...

Pour sensibiliser les étudiants à l'importance de la qualité de la présentation, aussi bien dans sa forme que dans son contenu, nous obligeons, à plusieurs reprises durant le projet, les étudiants à exposer l'état d'avancement de leurs travaux. Bien qu'éloigné des difficultés techniques, cet aspect est primordial pour la réussite du projet. Cette pédagogie oblige les étudiants à rendre compte régulièrement sur des sujets variés (pas uniquement dans l'enseignement des techniques de communication et d'expression).

### 2.2.3 Application à d'autres disciplines

La démarche utilisée pour les projets tuteurés peut être adaptée à l'enseignement de certaines disciplines. Le public actuel a tendance à s'effrayer à la vue de certaines expressions mathématiques qui n'auraient pas été diffusées par « snapchat » ...

Afin de les captiver suffisamment longtemps sur un sujet, la démarche projet présentée ci-dessus peut être un bon moyen d'y parvenir.

#### 2.2.3.1 L'informatique industrielle par le projet

L'informatique industrielle vue par le projet n'est pas une grande révolution pédagogique. Cependant, plutôt que de décliner des heures de cours, de travaux dirigés et des travaux pratiques, voici la démarche que nous avons mise en place (CETSIS 2011 [C63]).

Les étudiants travaillent en binôme ou trinôme. Lors de la première séance, les objectifs à atteindre sont présentés ainsi que les moyens qui seront mis à leur disposition.

Chaque groupe dispose d'une maquette composée d'un ordinateur embarqué et d'une partie opérative virtuelle (Figure 2-1). Chaque groupe est libre de choisir la partie opérative qu'il souhaite piloter (au choix parmi celles disponibles).

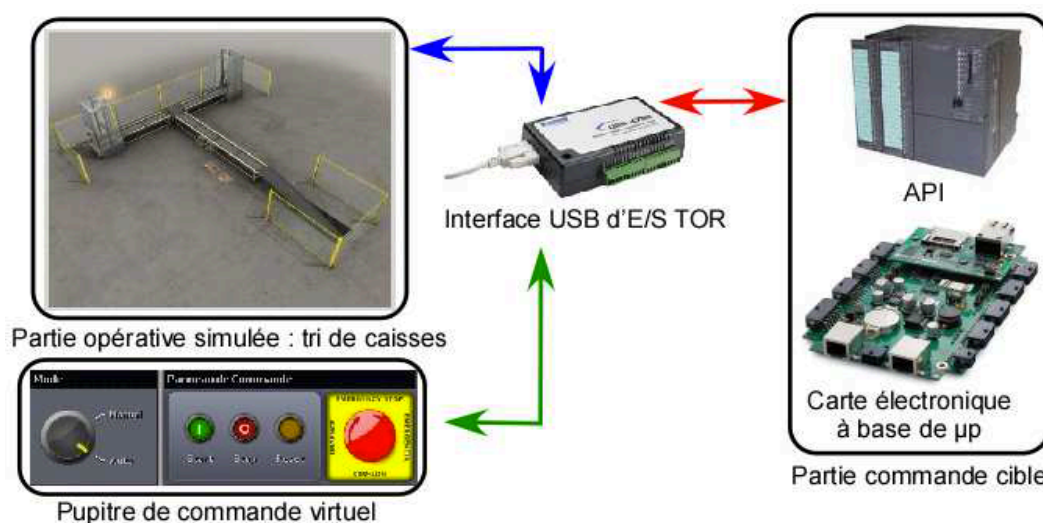


Figure 2-1 : Architecture générale du système automatisé étudié.

Une étude préalable de la partie opérative est alors nécessaire. Nous mettons à leur disposition des outils et des ressources pédagogiques comme le GRAFCET et le GEMMA. Ces outils leur permettent de décrire le fonctionnement séquentiel du système choisi en dehors de tout choix de cible matérielle de type µcontrôleur. Des exemples de programmes en C sont fournis pour les assister dans la partie codage des solutions retenues. Les étudiants sont contraints de chercher l'information et de formuler les questions leur permettant d'avancer. Ils deviennent ainsi plus actifs dans la démarche d'apprentissage.

Les parties organisation et planification sont souvent délaissées. Mais ici, l'objectif est plutôt de les conduire au constat d'échec : « si le travail n'est pas organisé, le temps va manquer... »

Pour l'évaluation, la rédaction de comptes rendus oblige les étudiants à produire des écrits qui se rapprochent des exigences « professionnelles » auxquelles ils seront confrontés dans le monde professionnel. Un rapport se doit d'être précis, clair et concis.

### 2.2.3.2 *L'automatique par le projet*

Dans cette partie, l'objectif du module de cours n'est pas de former des spécialistes des correcteurs PID, mais plutôt de donner quelques notions d'automatique aux étudiants de la licence professionnelle Supervision des Automatismes et des Réseaux. La vocation professionnelle des personnes formées est la mise en place ou la maintenance de systèmes automatisés fondés sur un réseau de communication de type Ethernet. Les correcteurs utilisés peuvent éventuellement intégrer le réseau dans la boucle de régulation. Sachant que le public des apprenants est très hétérogène, notre objectif est de lui permettre :

- de découvrir ou d'assimiler le vocabulaire de la discipline,
- de mettre en œuvre un correcteur numérique,
- de mesurer les difficultés liées à ce type de solutions.

La pédagogie par projet s'est donc révélée une solution parfaitement adaptée.

Le travail en groupe permet de mélanger les étudiants en fonction de leur cursus. Les « néophytes » de la discipline peuvent bénéficier de l'expérience de ceux qui ont déjà pratiqué.

Le système étudié est donc un gyropode construit à l'aide de Lego Mindstorm (Figure 2-2). Les étudiants disposent de ressources pédagogiques placées sur la plate-forme Moodle de l'environnement numérique de travail (ENT).



Figure 2-2 : Exemples de robots de type Segway.

Le calendrier est fourni au début de l'activité. Les étudiants disposent de 32 heures encadrées pour étudier leur problème, rechercher des solutions, mettre en œuvre la solution retenue, rendre des comptes et tester le gyropode.

Premier objectif : permettre au robot de rester debout en limitant les oscillations sur l'axe vertical. Puis ensuite, permettre au robot de se déplacer. Au final, une course entre robots est donc envisageable fixant ainsi l'objectif d'un déplacement rapide du robot.

### 2.2.4 Bilan

Le bilan de ce type d'activité me semble positif même s'il est nécessaire d'approfondir l'évaluation de l'approche pédagogique par le projet. Cette étude a déjà fait partie de plusieurs articles [C61], [C63].

Au début de l'activité, les étudiants disposent d'un capital « motivation » important. Ils sont pressés d'avoir le matériel. Il faut assembler, coder, ... pour pouvoir tester, ... sans avoir vraiment réfléchi à une démarche quelconque. La difficulté réside dans le maintien de cette motivation tout au long de l'activité. L'équilibre entre assistance et autonomie est difficile à trouver en fonction du public. Avec certains étudiants, l'augmentation de l'assistance peut provoquer l'extinction de la motivation et de la prise d'initiative. L'effet obtenu peut être totalement opposé à celui souhaité initialement.

Le pilotage de cette activité a évolué depuis sa mise en place. De nouvelles attentes ont alors été imposées aux étudiants. Plusieurs présentations sont demandées au cours de l'activité pédagogique. La première présentation oblige les étudiants à réfléchir à la planification et à la répartition des tâches au sein du groupe. Par la suite, les présentations les incitent à faire le point sur l'avancée du travail avec une contrainte qui est de restituer leur travail pour le rendre compréhensible à « tous les publics ».

Le retour des étudiants sur ce type de pédagogie est positif. Ils ont apprécié le fait de leur avoir confié une mission à mener en autonomie .

Il y a cependant parfois quelques étudiants qui « se cachent » dans le groupe. Ils confondent autonomie et « tourisme ». La proportion de ce type d'étudiants reste heureusement très faible. L'implication de ces étudiants aurait-elle été différente avec une pédagogie « plus classique » ?

C'est cet aspect qui pourrait être évalué pour conforter la démarche mais la méthode permettant de comparer l'impact d'une approche pédagogique par rapport à l'autre est assez difficile à définir. Ce sera probablement une étude à mener dans un futur proche.

## 2.3 Echanges pédagogiques internationaux

Les échanges internationaux sont d'excellentes opportunités pour découvrir et partager d'autres pratiques pédagogiques.

Lors de ma première mobilité enseignante Erasmus en Finlande à Oulu, j'ai été très surpris de voir les étudiants entrer et sortir pendant mon intervention. C'était assez surprenant. Les étudiants « consomment » à leur guise les enseignements. Ces étudiants étaient peut être dans leur entreprise quelques heures plus tôt et dès que leur emploi du temps le permet, ils viennent assister à des cours à l'Université...

### 2.3.1 Mobilités Erasmus

J'ai participé à plusieurs mobilités enseignantes dans le cadre de partenariat Erasmus. Je suis allé en Finlande, à Oulu et en Roumanie, à Iasi (à plusieurs reprises) ainsi qu'à Timisoara.

Quelques années après mon arrivée à Châteauroux, j'étais volontaire pour des missions de mobilité enseignante. La Finlande était une destination qui pouvait s'avérer très dépaysante (à juste titre !). Ce choix s'est effectué par rapport aux conventions déjà établies et sans occulter l'attrait « géographique ».

Après avoir accueilli une collègue finlandaise, Riikka Poutiainen, de l'Institut d'Oulu, des contacts ont été pris pour organiser mon séjour dans les mois qui suivaient. Il fallait, trouver des auditeurs (étudiants) dans un cursus correspondant aux disciplines sur lesquelles je pouvais intervenir. Dès que ces informations ont été disponibles, nous nous sommes accordés sur le contenu des cours à assurer et nous avons fixé les dates du séjour.

J'ai ensuite étudié un peu la Finlande, notamment le vocabulaire de base finnois : bonjour, merci, ... même si cela s'est montré insuffisant par la suite.

L'Institut entretient des collaborations avec les entreprises notamment dans le cadre de stages. Les laboratoires travaillent également avec les entreprises. L'Institut est doté d'une station de mesures et d'essais pour les voitures de rallye. La Finlande possède quelques grands pilotes.

Les enseignants peuvent également travailler pour les entreprises. Cela leur permet, par exemple, de garder un contact avec les réalités industrielles. C'est le cas pour le collègue qui m'a fait visiter les laboratoires.

Ce voyage était ma première expérience dans le cadre d'un programme Erasmus. Ce fut très positif. Sur le plan de la langue de Shakespeare, j'étais assez satisfait de mon niveau de compréhension et d'expression. Il me fallait parfois faire répéter les questions et il était nécessaire



quelquefois de reformuler mes propos. Par contre, concernant le finnois, il me faudrait beaucoup d'heures pour assimiler quelques bases...

Après la Finlande, j'ai foulé des terres plus à l'Est, à Iasi en Roumanie. A Châteauroux, nous avons accueilli des collègues roumains. A la suite de cette visite, un nouveau partenariat Erasmus a été conclu. Il prévoyait et prévoit encore des mobilités d'étudiants et d'enseignants. Ce partenariat a été l'un des plus riches en échanges pour le site de Châteauroux, aussi bien pour l'accueil que pour l'envoi d'étudiants et d'enseignants.

J'ai mené plusieurs missions de mobilité enseignante et j'ai accueilli plusieurs étudiant(e)s roumain(e)s. Aujourd'hui, certains de ces étudiants qui sont venus à Châteauroux sont devenus enseignant-chercheurs en Roumanie. Nous avons pu avec certains d'entre eux, publier des travaux en commun [C17 et C18]. Lors de ma dernière visite à Iasi, nous nous sommes retrouvés avec tous ces ex-étudiants pour un moment de convivialité. Ces échanges internationaux sont avant tout une expérience humaine riche d'échanges.

### **2.3.2 Echanges internationaux**

En 2006, j'ai participé à une école de printemps, dans le domaine des réseaux industriels à Nancy. A la suite, j'ai été convié à participer à un programme de partenariats avec le Maroc : Fonds Solidarité Prioritaire, Appui à la Réforme de l'Enseignement Supérieur Marocain (FSP ARESM). Ce projet incluait des volets comme l'aide à la mise en place de Licences Professionnelles, d'écoles doctorales... J'ai fait des présentations lors de séminaires à Casablanca en novembre 2006, à Marrakech en mars 2007 et en octobre 2007 à Fès. Nous avons accueilli à plusieurs reprises des collègues marocains venus étudier notre mode de fonctionnement.

Depuis 2012, nous accueillons, en licence professionnelle Supervision des Automatismes et des Réseaux, des étudiants mexicains du programme Mexprotec. Le constat fait par plusieurs établissements était le même : le profil des étudiants est parfois inadapté à la formation suivie en France. Afin de remédier à ces problèmes, des missions ont été programmées pour améliorer l'accueil de ces étudiants. En 2015, j'ai été volontaire pour participer à une mission dans laquelle étaient conviées plusieurs spécialités d'IUT. Nous étions deux enseignants de département GEII à participer à cette mission. Après une semaine de travail avec des responsables de licences professionnelles mexicaines, nous avons pu établir un tableau de correspondance permettant de garantir une bonne adéquation entre le profil des étudiants mexicains et la licence professionnelle choisie en France.

## 2.4 Pilotage de formations

Après mon arrivée à Châteauroux, je me suis rapidement impliqué dans l'administration de la pédagogie, du budget et des ressources humaines. Ma première implication a concerné le système informatique du département et ensuite de l'Institut. De 1998 à 2013, j'ai participé à la conception et à l'administration du système informatique sur le site de Châteauroux. J'ai proposé et participé à la mise en place d'une solution à base de serveur Windows NT pour remplacer un serveur Novell vieillissant. A cette « époque », nous ne disposions que d'une liaison Numéris à 64K (64 kilobits par seconde) pour permettre la connexion des postes administratifs à l'Université. Un seul poste informatique connecté à Internet permettait aux personnels de consulter sa messagerie. J'ai proposé à la direction de l'IUT une solution permettant de partager une connexion ADSL sur l'ensemble des postes informatiques de l'IUT et notamment les salles de TP utilisées par les étudiants. J'ai conçu et mis en service, en associant le technicien du département, un serveur Proxy permettant de mutualiser les accès à Internet par la ligne ADSL. Il était alors possible, pour chacun des personnels de consulter sa messagerie depuis son bureau. J'ai pu accompagner notre technicien, devenu depuis ingénieur informatique, pendant l'évolution des capacités de notre système d'information. J'étais chargé de mission informatique jusqu'en 2013.

En 2002, j'ai eu en charge le portage du dossier d'opportunité d'ouverture d'une licence professionnelle pour assurer une continuité à la formation de DUT GEII. Notre choix s'est porté sur une thématique « naissante » dans l'industrie : l'usage d'Internet. Nous avons donc construit un projet de formation de « chargé de projet intégrant les Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication » dans un contexte industriel. Notre souhait était de former des personnes ayant la culture de l'automatisme et de l'informatique pour permettre la gestion de projet utilisant l'interface entre ces « deux mondes ». La licence professionnelle Automatismes, Réseaux et Internet a ouvert en 2002.

En 2008, après une campagne d'évaluation nationale, la licence change d'appellation et devient « Supervision des Automatismes et des Réseaux », alors que la connectivité « Internet » devient une réalité industrielle. J'ai été responsable de cette formation de son ouverture en 2002 jusqu'en 2013.

Plusieurs licences professionnelles ont été créées en 2002 à l'IUT. Le choix de la direction avait été de ne créer qu'un seul Centre de Responsabilités au niveau budgétaire. J'ai été en charge de la gestion de ce CR pour les trois licences du site castelroussin (Entrepreneuriat, SAR, Management des Organisations du Tiers Secteurs et de l'Economie Solidaire MOTSES).

En 2006, au niveau du département, nous avons étudié l'opportunité de l'ouverture par la voie de l'apprentissage de la deuxième année de DUT GEII ainsi que la licence professionnelle SAR. J'ai porté le dossier d'opportunité pour la LP SAR. La licence ainsi que la deuxième année de DUT ont été ouverts par la voie de l'apprentissage à la rentrée de 2007. Pour limiter l'impact financier sur notre petite structure, nous avons construit une maquette pédagogique pour la licence permettant de mutualiser l'ensemble des cours. Pour le DUT GEII, une grande partie des cours a également pu être mutualisée.

En 2007, j'ai été nommé Chef du département Génie Electrique et Informatique Industrielle. J'ai effectué deux mandats, jusqu'en 2013. Afin de rationaliser les tâches administratives, j'ai proposé une organisation mutualisée sur les formations de DUT GEII et LP SAR. J'ai assuré le rôle de responsable de licence et de Chef de département assisté par une équipe de direction des études commune. Cette organisation est toujours en place actuellement.



## Chapitre 3 - Modélisation par Modèles de Markov

C'est en 1913 qu'Andreï Andreïevitch Markov décida d'analyser les statistiques de succession des lettres dans un roman : « Eugène Onéguine » d'Alexandre Pouchkine. Il faisait apparaître la forte dépendance de la lettre précédente dans les statistiques d'apparition des symboles de l'alphabet considéré. Cette dépendance était observable, quel que soit le langage utilisé (Gay, 2014). Les graphes qui décrivent en termes de probabilité les relations entre des évènements et leurs prédécesseurs seront appelés chaines de Markov.

Dans ce chapitre et le suivant, sont résumées la majorité de mes activités de recherche qui s'articulent autour de l'utilisation et de l'amélioration de modèles de Markov pour répondre à diverses problématiques qui débutent autour du traitement d'images (pour la lecture de montants de chèques) et qui dérivent vers des problématiques d'optimisation de la maintenance en fournissant une mesure de l'état de service d'un système. Le lien entre ces activités peut se résumer par la capacité des modèles de Markov à assimiler la « signature » particulière des informations collectées : l'enchaînement des formes des lettres dans le cas de l'écrit ou la suite d'observations caractéristiques de l'occurrence imminente d'une panne.

La littérature est assez volumineuse à propos des modèles de Markov. Une recherche sur votre moteur favori vous retournera des centaines de réponses ! Ces études sont pour la plupart liées à un domaine d'activité particulier :

- reconnaissance de l'écrit ou de la parole (Plötz and Fink, 2009),
- médecine (Chouaid, 2004),
- contrôle de flux (Stidham and Weber, 1993),
- prise de décision pour la finance (Bary, 2016),
- modélisation des jeux de hasard (Bewersdorff, 2004),
- ...

Dans ce chapitre, les problèmes présentés sont : problème de l'écrit et mesure de l'état de santé d'un système. Un état de l'art pour chaque problème est proposé. Ceux-ci sont à considérer par rapport au moment où ont été menés ces travaux. Nous montrons ainsi, la polyvalence des modèles de Markov pour résoudre ces problèmes et leur capacité à représenter différents niveaux de connaissance.

## 3.1 Les Modèles de Markov pour l'écrit

### 3.1.1 Le problème de l'écrit

Les systèmes de lecture automatique de texte ont fait l'objet de nombreuses études à l'horizon des années 2000. Depuis, de nombreux systèmes sont opérationnels pour la lecture des adresses sur le courrier ou les colis ainsi que pour la lecture des montants sur les chèques. Ces applications ont été développées pour des systèmes à haut rendement avec des capacités de calculs importantes. Nous avons également vu apparaître, sur nos ordinateurs personnels, des systèmes capables de lire des documents scannés ou des interfaces sur écran tactile capables de reconnaître le texte manuscrit.

Pour la lecture de cette partie, il est nécessaire de se positionner à l'horizon des années 2000 pour se resituer dans le contexte de l'époque qui a conduit aux choix que nous avons effectués pour résoudre ce problème de l'écrit.

La reconnaissance de l'écrit s'insère dans un cadre plus général de traitement de documents. Elle peut se décomposer en plusieurs domaines, comme la lecture de textes imprimés et de textes manuscrits. Dans les années 70, les premières solutions de lecture de textes imprimés sont utilisées par la poste aux Etats-Unis. Le domaine des textes manuscrits se décompose en deux sous-domaines : l'écrit en ligne et l'écrit hors ligne. L'étude de l'écriture en ligne permet d'utiliser toute la dynamique du tracé. Dans cette partie, nous étudions un problème de lecture de textes manuscrits hors ligne, mais dans un contexte particulier où le lexique utilisé est de taille réduite. L'application visée est la lecture des montants littéraux de chèques bancaires.

La reconnaissance de l'écriture manuscrite est l'une des dernières étapes d'un système de traitement ou de lecture automatique de documents. Ces systèmes sont composés de plusieurs sous-ensembles qui débutent par une acquisition des images. Ces images sont ensuite prétraitées, améliorées, binarisées... L'information pertinente doit ensuite être localisée et les parties non utiles doivent être filtrées. Ces parties ne sont pas traitées dans notre étude. Les images, sur lesquelles ont été réalisés les tests, ont été fournies par le Service de Recherche Technique de la Poste.

Focalisons nous sur le problème de la reconnaissance de l'écrit hors ligne à l'aide d'une image binaire. Plusieurs approches peuvent être envisagées en fonction de la méthode de segmentation utilisée. Ces approches diffèrent en fonction du nombre de niveaux de représentation considéré. Le découpage en trois niveaux semble correspondre à notre problème. Dans un ordre descendant, ces niveaux sont la phrase, le mot et la lettre et à chaque niveau correspond une méthode de segmentation.

« Il est paradoxal de vouloir segmenter le mot en lettres avant de les avoir reconnues »  
KM Sayre

Au niveau de la phrase, le but est de séparer les différents mots composant la phrase. En général, l'hypothèse émise est que les espaces entre les mots sont plus importants que ceux entre les lettres (Paquet and Lecourtier, 1993).

Les problèmes du niveau mot et du niveau lettre sont du même ordre concernant la segmentation. En effet, les méthodes se distinguent suivant que la segmentation produit des lettres ou plusieurs morceaux par lettre. Un état de l'art sur les méthodes de segmentation du mot en lettres est disponible dans l'article de (Casey and Lecolinet, 1996). Dans cet article, les auteurs proposent une classification des méthodes de segmentation en trois stratégies « pures », d'autres stratégies se résumant à des approches hybrides combinant ces stratégies :

- l'approche « classique » appelée « dissection » qui utilise des propriétés sur les formes des caractères pour réaliser le découpage du mot en lettres.
- l'approche basée sur la reconnaissance qui consiste à guider la segmentation par la reconnaissance.
- l'approche globale qui consiste à reconnaître le mot sans chercher à le découper en caractères.

La méthode de reconnaissance utilisée sera fonction du niveau de segmentation considéré. Pour la reconnaissance de caractères isolés, des méthodes de comparaison directe ou des méthodes géométriques et statistiques peuvent être utilisées. Les méthodes de comparaison, comme le « template-matching » ou « l'elastic-matching », sont en fait des mesures de ressemblances ou de dissemblances de modèles avec l'échantillon à reconnaître. Les principales méthodes géométriques et statistiques sont :

- la discrimination fonctionnelle,
- les k plus proches voisins,
- l'estimation de gaussiennes,
- les fenêtres de Parzen,
- les arbres de décision,
- les réseaux de neurones,
- les méthodes markoviennes.

Pour la reconnaissance de mots, des méthodes structurelles ou syntaxiques peuvent être utilisées. Les méthodes structurelles, souvent rencontrées dans le domaine qui nous intéresse, sont regroupées sous le terme générique de méthodes de comparaison dynamique dont une revue est présentée dans (Heutte, 1994). Les méthodes syntaxiques sont basées sur l'utilisation d'un alphabet pour coder la forme. La phase de décision consiste à analyser à l'aide de vérificateur de syntaxe les

séquences de codes ainsi obtenues (Oommen and Loke, 1997). Les méthodes markoviennes peuvent également se placer parmi les méthodes syntaxiques.

### **3.1.2 Les Modèles de Markov pour la reconnaissance de l'écrit**

Au début des années 90, les études fondées sur les MMC pour la reconnaissance de l'écriture sont en plein essor (Gilloux et al., 1995), (Chen et al., 1994). Elles s'appuient sur de bons résultats obtenus sur la reconnaissance de la parole (Rabiner, 1989) ou de l'écriture en ligne (Lorette et al., 1994).

C'est dans ce contexte que débutent mes travaux sur les modèles de Markov (Avila, 1996) dont sont extraits les paragraphes suivants. Plusieurs points de vue sont abordés correspondant aux différents niveaux de segmentation possibles évoqués. Ils illustrent la polyvalence des modèles de Markov à représenter et à assimiler des informations de natures différentes : les propriétés liant les enchaînements des mots ou des lettres, mais également la variabilité dans le nombre de morceaux (graphèmes) composant la lettre.

#### **3.1.2.1 *Quel sens pour la modélisation ?***

Le problème de lecture de l'écriture manuscrite, comme par exemple, les montants de chèques, peut se modéliser à différents niveaux de représentation des connaissances disponibles. Comme l'avait observé Andreï Andreïevitch Markov, l'enchaînement des lettres dans un mot suit des lois fortement liées à la langue mais également au contexte. Un document technique n'utilisera pas les mêmes termes qu'un roman ou qu'une encyclopédie.

En considérant chaque somme, figurant sur un chèque bancaire, comme équiprobable, les statistiques d'enchaînement des mots et des lettres peuvent donc être estimées. Ces statistiques traduiront la « grammaire » dans ce contexte. Par exemple, un montant ne peut pas débiter par Euros (ou francs il y a quelques années). De plus, ces statistiques peuvent être affinées si l'on dispose de données en grande quantité sur les sommes usuellement indiquées sur les chèques. Certaines sommes présentes sur les chèques sont plus fréquentes que d'autres : le montant d'une consultation chez le médecin ou le prix d'une bouteille de gaz. Le Tableau 3-1 montre la répartition non uniforme des mots dans deux bases utilisées pour les tests (Avila, 1996).



MOT	Effectif Base 1		Effectif Base 2	
zéro	5	0,14%	5	0,16%
un	20	0,55%	9	0,29%
deux	208	5,74%	207	6,58%
trois	126	3,48%	105	3,34%
quatre	263	7,26%	246	7,81%
cinq	124	3,42%	122	3,88%
six	51	1,41%	48	1,52%
sept	54	1,49%	51	1,62%
huit	59	1,63%	51	1,62%
neuf	65	1,79%	60	1,91%
dix	117	3,23%	107	3,40%
onze	11	0,30%	4	0,13%
douze	20	0,55%	15	0,48%
treize	11	0,30%	9	0,29%
quatorze	10	0,28%	11	0,35%
quinze	28	0,77%	35	1,11%
seize	9	0,25%	9	0,29%
vingt	263	7,26%	218	6,93%
trente	81	2,24%	94	2,99%
quarante	73	2,01%	53	1,68%
cinquante	78	2,15%	70	2,22%
soixante	113	3,12%	113	3,59%
cent	747	20,62%	633	20,11%
mille	127	3,51%	102	3,24%
et	29	0,80%	32	1,02%
francs	894	24,68%	687	21,82%
centimes	37	1,02%	52	1,65%
TOTAL	3623	100,00%	3148	100,00%

Tableau 3-1 : Répartition des mots dans les bases (extrait de (Avila, 1996)).

A partir de cette connaissance, il est possible de construire des modèles qui vont utiliser différents points de vue disponibles sur les images des montants de chèques (Avila et al., 1993). Par exemple, sur la Figure 3-1, on utilisera une description globale de la phrase. Les mots seront codés à l'aide des informations « dépassements » au-dessus ou en dessous du corps de ligne (Frishkop and Harmon, 1961).

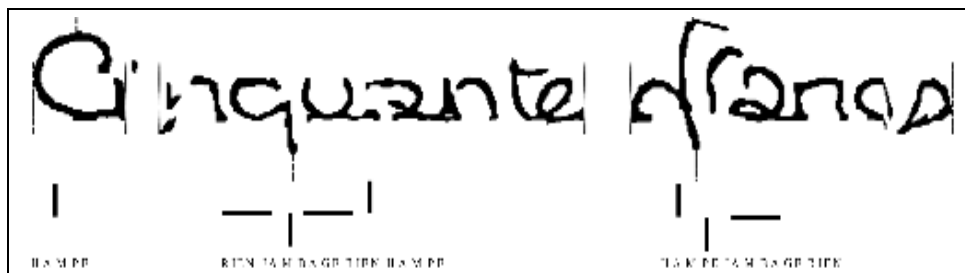


Figure 3-1 : Description globale d'une « phrase ».

Afin d'utiliser également les connaissances disponibles au niveau des statistiques d'enchaînement des lettres, il est possible d'utiliser une description analytique (Lecolinet, 1990), (Lethelier, 1996) comme le montre la Figure 3-2. L'image est squelettisée après des prétraitements consistant à redresser et normaliser le corps de ligne.

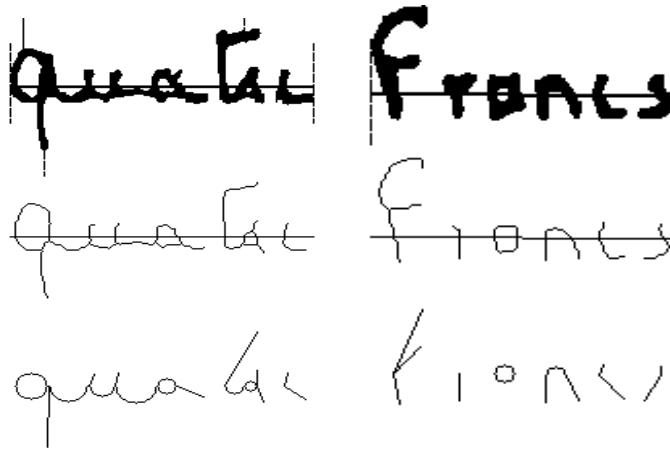


Figure 3-2 : Description analytique de quelques mots.

A partir des intersections de ce squelette avec l'axe médian, un code est attribué à chaque tracé. Cet ensemble de codes forme un alphabet de tracés élémentaires qui peut être utilisé pour la représentation des mots ou des lettres (Figure 3-3). Les combinaisons de ces tracés formeront des graphèmes qui seront utilisés comme observations pour les Modèles de Markov Cachés (MMC).

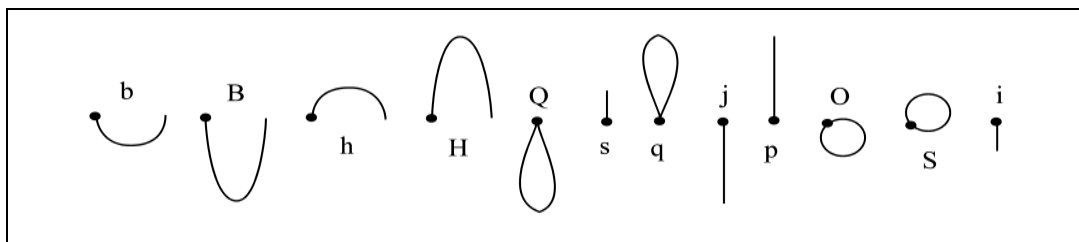


Figure 3-3 : Alphabet de tracés élémentaires.

### 3.1.2.2 Modélisation de la lettre

Une lettre peut être modélisée à l'aide de plusieurs états (Chen et al., 1994) pour prendre en compte les variantes liées à la segmentation. La Figure 3-4 montre la topologie du modèle de lettre utilisée dans notre étude (Avila, 1996). Chaque modèle de lettre est formé de 3 états, cependant, dans cette variante, les symboles sont émis sur les transitions. Cette topologie offre ainsi, une plus grande variété de situations qui permettent au modèle d'assimiler les nombreuses variations d'une lettre à l'autre (casse, segmentation...).

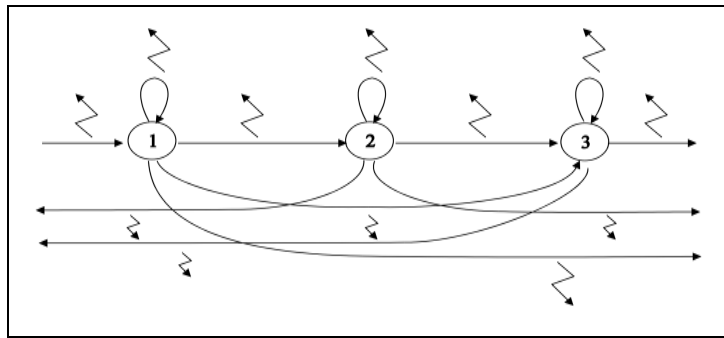


Figure 3-4 : Modèle de lettre.

Ces modèles de lettres sont ensuite utilisables dans une modélisation globale (Figure 3-5). Dans ce cas, le modèle traduit les statistiques d'enchaînements des lettres selon le contexte considéré lié par exemple au langage. La difficulté, pour la mise en œuvre de cette modélisation globale, se situe au niveau de la phase d'apprentissage de chacune des lettres. Il faut pouvoir disposer de bases de données étiquetées au niveau de la lettre avec le risque de ne pas pouvoir correctement assimiler les liaisons entre les lettres.

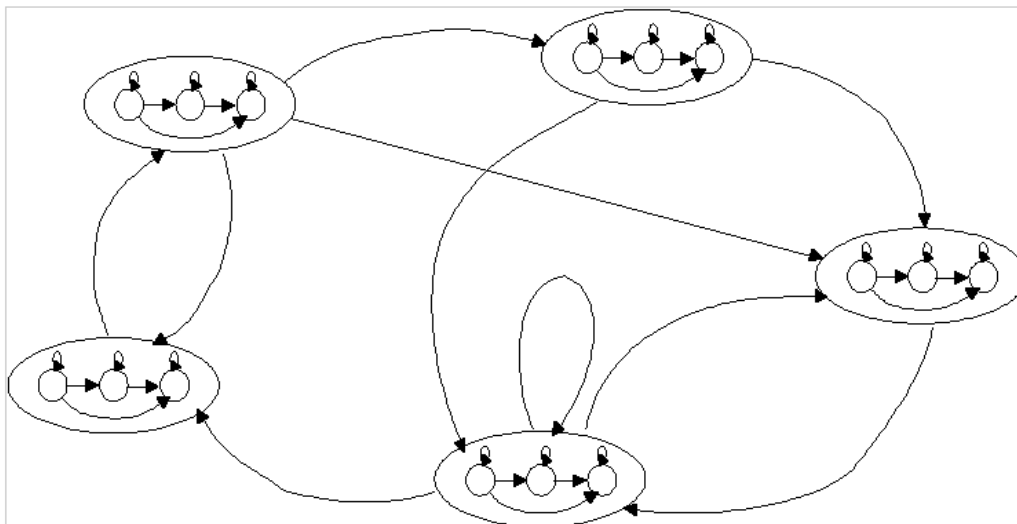


Figure 3-5 : Modèle global de lettres.

Les modèles de lettres peuvent également être concaténés afin de former des modèles de mots (Figure 3-6). Dans ce cas, chaque mot du lexique sera modélisé à l'aide des modèles de lettres le composant. Cette démarche ne peut se concevoir que sur des applications à lexique de petite taille comme c'est le cas sur l'écriture des montants de chèques. En effet, le problème consiste à reconnaître un mot parmi une trentaine de candidats possibles. Dans ce cas, c'est une mise en concurrence de plusieurs modèles.

Cette concaténation des modèles de lettres peut permettre de faciliter l'étape d'apprentissage des lettres. En effet, il peut être beaucoup plus simple de disposer d'une base d'apprentissage formée de mots plutôt que des lettres. L'apprentissage embarqué (Bideault et al., 2014; Kessentini, 2009) utilise ce principe.

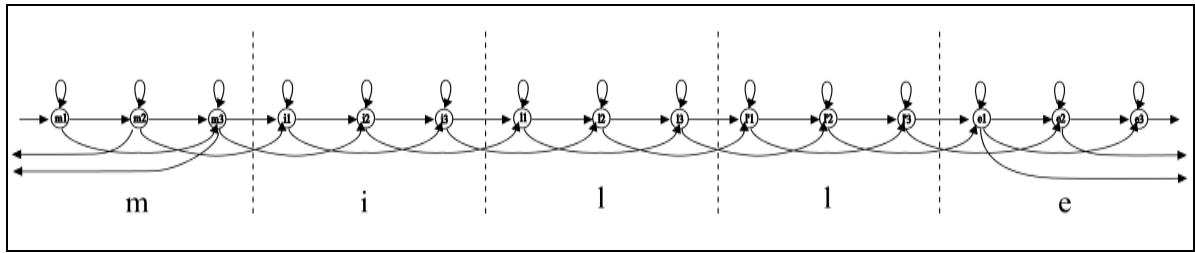


Figure 3-6 : Modèle du mot « mille » à partir des lettres.

### 3.1.2.3 Modélisation du mot

Dans le paragraphe précédent, les modèles de mots ont été formés à partir des modèles de lettres les composant. Une autre approche consiste à considérer une topologie unique similaire pour chaque mot du lexique. Cette topologie doit permettre d'assimiler les variabilités d'écriture d'un même mot et les grandes variations de longueur d'un mot à un autre comme le représente la Figure 3-7.

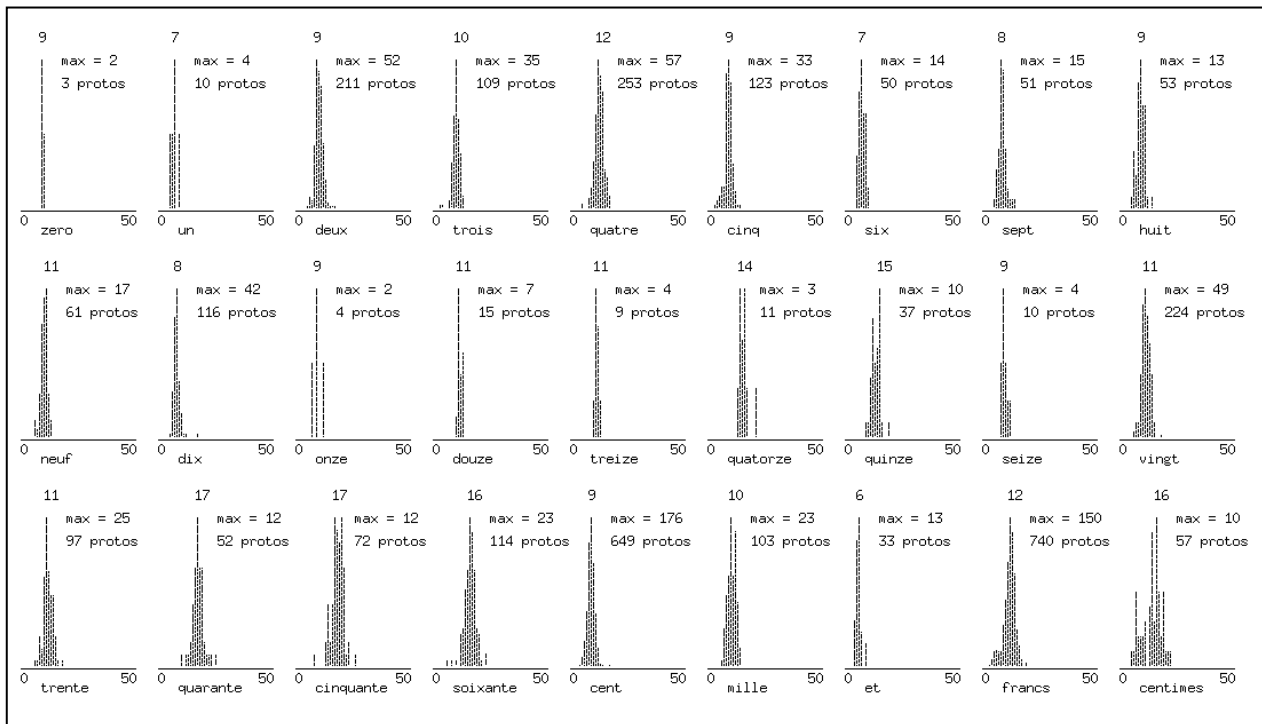


Figure 3-7 : Variation des longueurs de mots (unité : graphème).

Pour mettre en œuvre cette stratégie de modélisation, il faut pouvoir disposer de bases de données comportant des échantillons de chaque classe  $\lambda_i$  de mots. Comme le montre la répartition des mots liés au contexte (Tableau 3-1 page 41), certains mots sont peu présents dans les bases de données. Ces mots peuvent être très peu utilisés suivant le contexte (par exemple, le mot « zéro » dans les montants de chèques). Cela peut rendre plus difficile la phase d'apprentissage pour ces

classes. Les modèles fondés sur les lettres peuvent éventuellement pallier ce problème à condition que les lettres du mot considéré soient présentes dans les autres mots du lexique.

La capacité des MMC associée au choix pertinent de la topologie des modèles permet ainsi d'assimiler les différentes variations comme l'illustrent les Figure 3-8 et Figure 3-9.

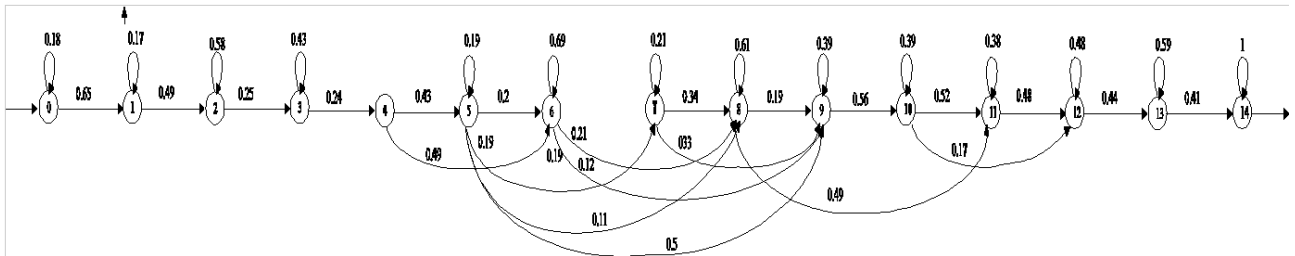


Figure 3-8 : Modèle du mot « cinquante ».

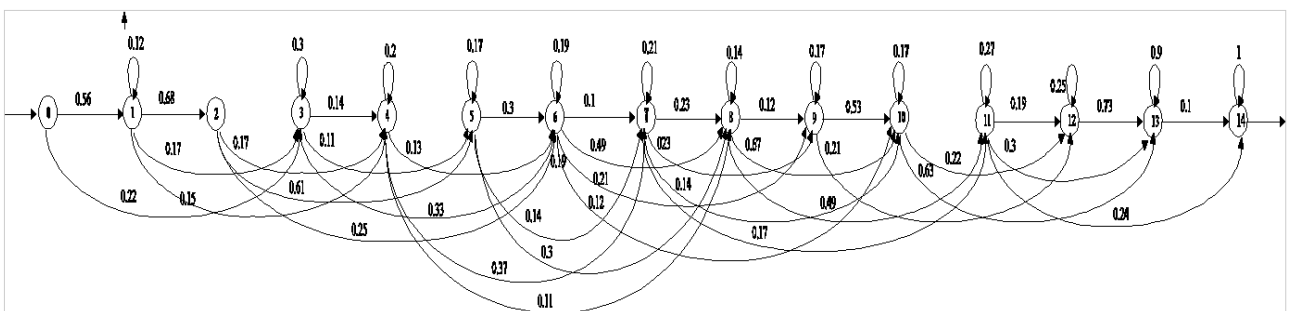


Figure 3-9 : Modèle du mot « cent ».

Cette stratégie a été mise en œuvre en utilisant l'algorithme de Baum-Welch pour apprendre chaque modèle  $\lambda_i$  de chaque classe. L'identification est ensuite réalisée en calculant la probabilité  $P(O | \lambda_i)$  et en classant les réponses. Les Figure 3-10 (a et b) montrent l'évolution des résultats suivant le nombre d'itérations de l'algorithme d'apprentissage. Les résultats, sur la base d'apprentissage (Figure 3-10 a), montrent une amélioration constante des performances. Cependant, les résultats sur la base de tests (Figure 3-10 b) montrent plutôt une baisse des performances à partir de 8 itérations.

**Erreur ! Aucune rubrique spécifiée.**

(a) base d'apprentissage

**Erreur ! Aucune rubrique spécifiée.**

(b) base de tests

Figure 3-10 : Evolution des performances en fonction du nombre d'itérations.

### 3.1.2.4 Modélisation de la phrase

Les MMC permettent également de modéliser des problèmes pseudo-bidimensionnels comme les Planar Hidden Markov Model (PHMM) ou Pseudo 2D MMC. Un PHMM est un MMC où la probabilité d'observations dans chaque état est donnée par un MMC secondaire comme l'illustre la Figure 3-11.

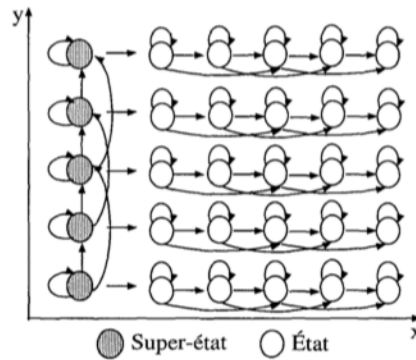


Figure 3-11 : Exemple d'architecture de PHMM (extrait de (Belaïd and Saon, 1997)).

Pour l'application de lecture des montants de chèques, il est possible d'utiliser ce type d'approche pour passer du niveau « mot » au niveau « phrase ».

<ol style="list-style-type: none"> <li>1 : quatre</li> <li>2 : quarante</li> <li>3 : francs</li> <li>4 : deux</li> <li>5 : trois</li> <li>6 : douze</li> <li>7 : quinze</li> <li>8 : cent</li> <li>9 : mille</li> <li>10 : vingt</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1 : vingt</li> <li>2 : cent</li> <li>3 : deux</li> <li>4 : cinq</li> <li>5 : sept</li> <li>6 : trois</li> <li>7 : dix</li> <li>8 : francs</li> <li>9 : quatre</li> <li>10 : huit</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1 : quatre</li> <li>2 : quarante</li> <li>3 : francs</li> <li>4 : deux</li> <li>5 : quinze</li> <li>6 : mille</li> <li>7 : cent</li> <li>8 : neuf</li> <li>9 : sept</li> <li>10 : vingt</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1 : francs</li> <li>2 : cent</li> <li>3 : deux</li> <li>4 : cinq</li> <li>5 : huit</li> <li>6 : neuf</li> <li>7 : dix</li> <li>8 : quatre</li> <li>9 : trois</li> <li>10 : six</li> </ol>

Figure 3-12 : Résultats des modules « mot ».

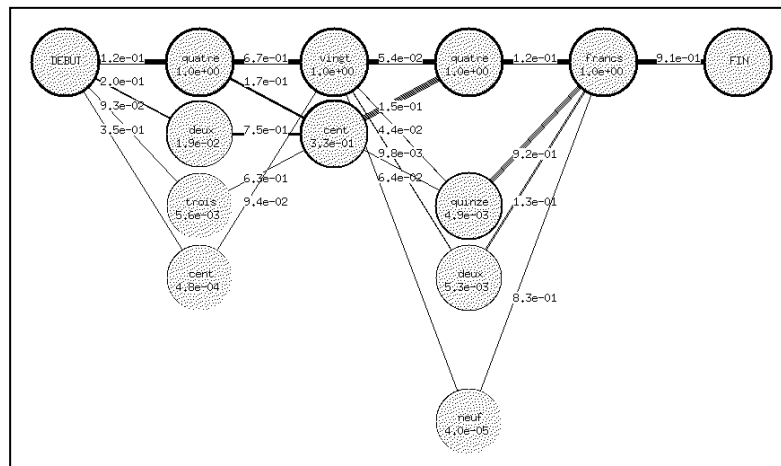


Figure 3-13 : Résultats pour la phrase.

Comme le montrent les Figure 3-12 et Figure 3-13, le classement au niveau des mots peut être infirmé ou confirmé par le modèle de la phrase. Dans l'exemple, les mots 1, 2 et 4 sont confirmés. Pour le mot 3, le classement est remis en cause par la prise en compte de la syntaxe de la phrase.

### 3.1.3 Synthèse

Dans cette partie, nous avons pu montrer une partie des possibilités offertes par les modèles de Markov. Dans le domaine de l'analyse de l'écrit, les états des modèles peuvent représenter des parties très concrètes de « l'objet » traité (les lettres ou les mots) ou ce sont différents modèles qui permettront de représenter ces « objets ». Dans ce dernier cas, on utilisera plutôt des modèles de Markov cachés qui auront la capacité d'assimiler les différentes variantes d'un même « objet » (mot ou lettre).

Cette particularité permet à ce type de modélisation d'assimiler différents niveaux de connaissance : les statistiques d'enchaînement des mots, des lettres ou des graphèmes. De plus, selon leur utilisation, un seul modèle peut être mis en œuvre pour fournir la séquence des états les plus probables en guise de réponse ou plusieurs modèles de même type peuvent être mis en concurrence pour identifier le modèle le plus vraisemblable parmi un ensemble de modèles candidats. La méthode d'apprentissage des lettres proposée permet de s'affranchir d'une segmentation précise en lettre. Cette méthode porte le nom d'apprentissage embarqué (Bideault et al., 2014; Kessentini, 2009).

Ce domaine d'application a fait, depuis ces années, l'objet de nombreuses études, comme le montre l'état de l'art de (Rabi et al., 2017). Les études actuelles intègrent notamment la possibilité de traiter plusieurs langages. De nombreuses nouvelles variantes de MMC ont pu être utilisées comme par exemple, les MMC multi-flux ou les MMC flous (Plötz and Fink, 2009).

## 3.2 Diagnostic/pronostic de santé d'un système industriel

Comme nous l'avons évoqué dans la partie pédagogique, nous avons suivi l'évolution des technologies de communication dans le domaine industriel. Nous étions parmi les premiers à proposer une formation dédiée à la mise en place d'automatismes fondés sur des technologies communicantes comme Ethernet ou Internet (licence professionnelle Automatismes, Réseaux et Internet créée en 2002).

De nos jours, cette mutation des usines, des processus, vers l'industrie du futur ou l'industrie 4.0 (Figure 3-14) s'appuie sur les nouveaux moyens de communication et ouvre la voie à de nombreuses nouvelles possibilités pour permettre à ces industries de rester compétitives dans un contexte de concurrence mondiale.

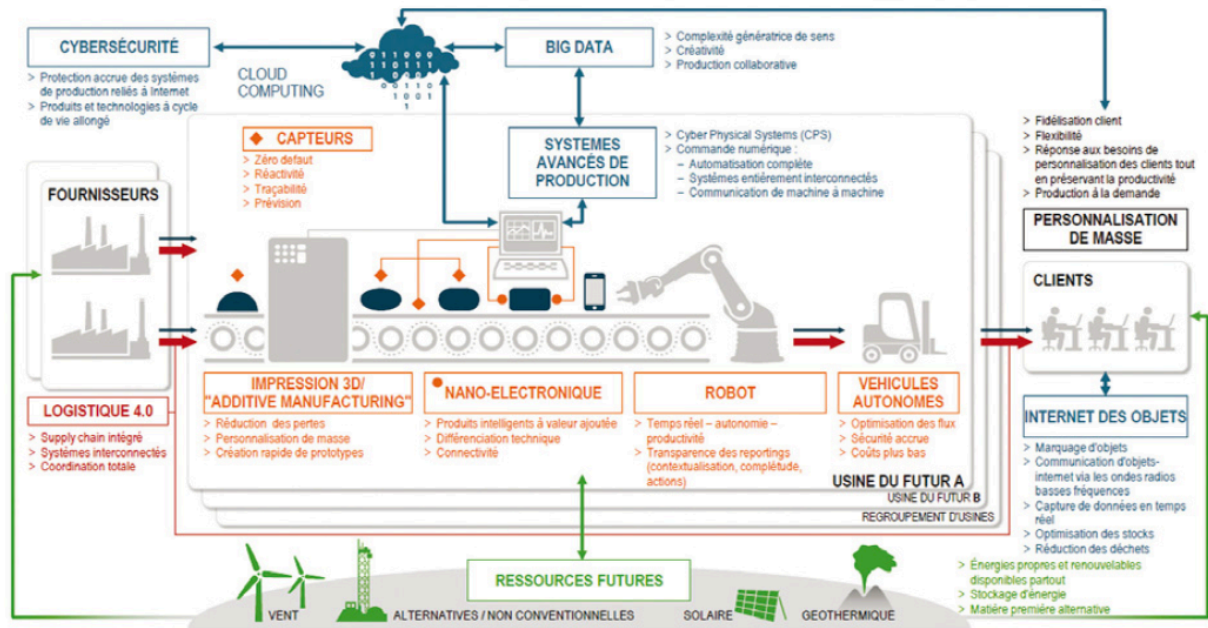


Figure 3-14 : Usine 4.0 (Gimelec, 2014).

L'amélioration des politiques de maintenance est un levier important pour arriver à exploiter au mieux les moyens de production et atteindre les objectifs souhaités. Cette thématique s'inscrit dans le cadre des activités de la communauté PHM « Prognostics and Health Management ». C'est dans ce contexte que les travaux présentés dans cette partie portent sur le diagnostic et le pronostic de défaillance pour des systèmes complexes. Les systèmes visés présentent la particularité d'une insuffisance d'instrumentation permettant d'apporter des indications sur une éventuelle dégradation.

Industrie du futur  
= Objets connectés ?

Le concept PHM (Figure 3-15) peut se représenter comme un cercle vertueux qui passe par trois phases (Javed et al., 2017) :

- l'observation : acquisition et traitement des données,
- l'analyse : estimation de l'état, diagnostic et pronostic,
- l'action : prise de décision et système d'information.



Figure 3-15 : Concept PHM (d'après (Thurston and Lebold, 2001)).



Les méthodes de diagnostic cherchent à détecter et à localiser les défaillances ainsi qu'à identifier leurs causes. Les méthodes de pronostic tentent de prévoir l'état futur du système avant que les défaillances ne se produisent. La métrique utilisée pour le pronostic est la RUL (Remaining Usefull Life ou Temps de Vie Restant). La Figure 3-16 illustre la différence entre ces deux approches.

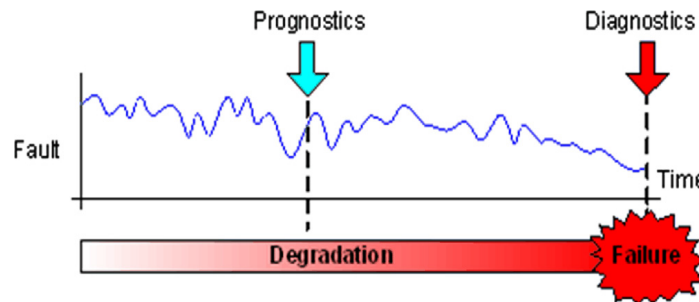


Figure 3-16 : Différence entre diagnostic et pronostic.

Un pronostic utile doit permettre de planifier l'action de maintenance avant l'arrivée de la panne (Gouriveau and Zerhouni, 2012). Une analyse précise des données disponibles doit permettre l'estimation de la RUL mais ce n'est pas suffisant. Cette estimation doit être associée à une connaissance globale des services de l'entreprise ou des moyens d'actions disponibles ; aussi bien les moyens humains que matériels permettant ainsi de planifier l'action de maintenance préventive voire la rendre adaptative.

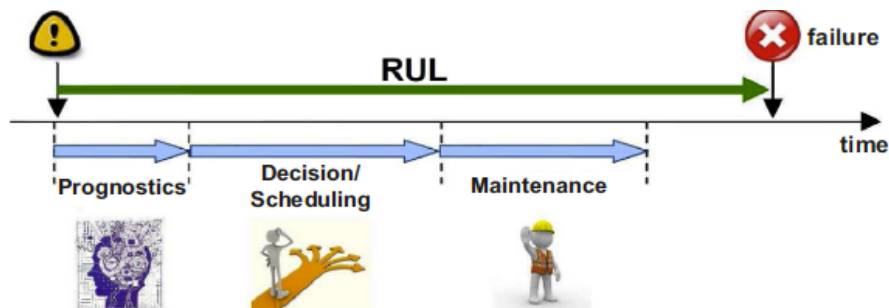


Figure 3-17 : Pronostic utile permettant de planifier la maintenance.

Les méthodes développées pour traiter les problèmes de diagnostic peuvent être classées en trois grandes catégories (Ribot, 2009) : les méthodes fondées sur la connaissance, les méthodes orientées données et les méthodes à base de modèles. Les premières méthodes exploitent la connaissance des experts sur le système (acquise durant la phase de conception et l'historique des dysfonctionnements). Ces méthodes dites « systèmes experts » sont principalement fondées sur l'intelligence artificielle (Verron, 2007). Les méthodes à base de logique floue sont également très utilisées (Lolas et al., 2007).

Les méthodes orientées données s'appuient sur l'analyse des données que l'on nomme généralement « observations ». Ces données ou observations sont collectées sur le système pour être utilisées en différé (historique) ou en « direct ». L'analyse de ces mesures extraites du système permet de déduire les modes de fonctionnement ou de dysfonctionnement du système. Le diagnostic orienté données peut s'appuyer sur des méthodes statistiques (Wise and Gallagher, 1996), sur des méthodes de classification (Soualhi et al., 2011) et sur des méthodes fondées sur l'intelligence artificielle (Yang, 2004).

Les méthodes à base de modèles exploitent les modèles physiques du système ou les modèles entrées/sorties (boîtes noires). Le principe de ces méthodes consiste à assimiler le comportement nominal du système à l'aide de modèles puis à comparer l'évolution de ces modèles avec l'évolution du système réel. Si une différence de comportement est observée entre le modèle et le système réel, il est alors possible d'en déduire un comportement anormal du système. Parmi les méthodes utilisées, nous pouvons citer les méthodes à base d'observateurs (Hammouri et al., 1999), les méthodes à base d'espace de parité (Ding, 2008) et les méthodes fondées sur l'estimation paramétrique (Isermann, 1984).

Les méthodes de pronostic se distinguent selon qu'elles sont fondées sur un modèle physique ou qu'elles sont guidées par les données. Des approches hybrides peuvent également combiner les deux aspects comme le résume la Figure 3-18.

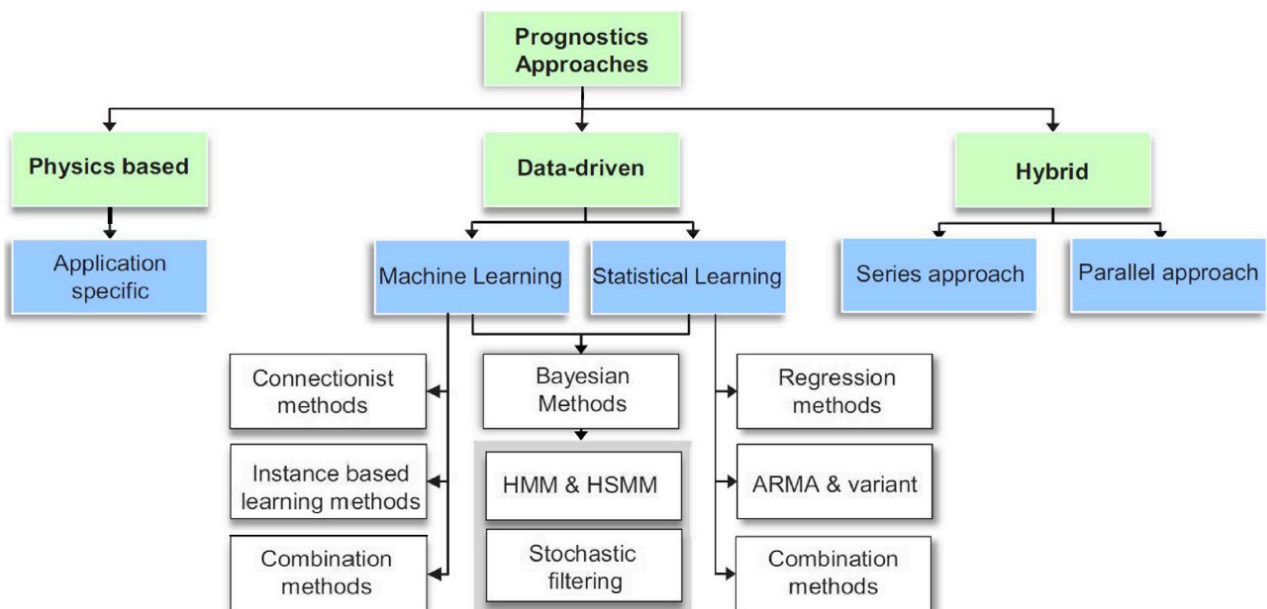


Figure 3-18 : classification des approches de pronostic (Javed et al., 2017).

Parmi ces méthodes, celles fondées sur un modèle physique nécessitent de modéliser la modification du comportement physique du système ou de l'équipement. Ces outils sont également

adaptés au niveau de la modélisation du composant. Contrairement aux approches guidées par les données, ces méthodes nécessitent moins de données. Ces modèles physiques peuvent être difficiles voire impossibles à estimer.

De nombreuses approches guidées par les données peuvent être utilisées. Les auteurs dans (Javed et al., 2017) proposent un état de l'art sur les méthodes de pronostic.

Dans la suite de ce chapitre, nous nous focalisons sur la mise en œuvre de modèles de Markov pour le diagnostic et le pronostic de systèmes industriels.

### 3.2.1 Diagnostic par MMC

#### 3.2.1.1 Choix des MMC

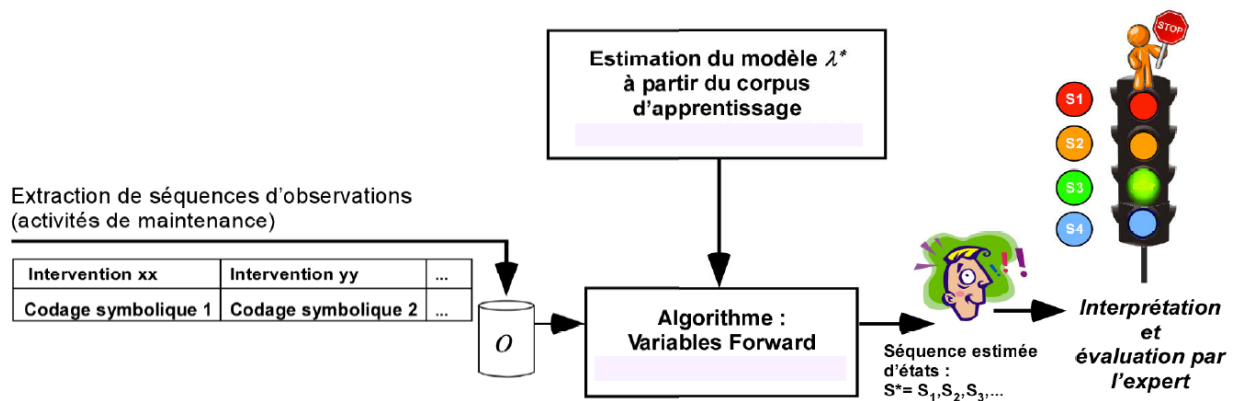


Figure 3-19 : Vers l'état de santé d'un système.

Les modèles de Markov ont été utilisés à de multiples reprises pour des problèmes de surveillance et de diagnostic de systèmes industriels. Nous pouvons citer (Kwon and Kim, 1999) pour l'identification des types d'incidents ou d'accidents dans une centrale nucléaire, (Bunks et al., 2000) pour la surveillance de boîtes de vitesses d'hélicoptère, (Ertunc et al., 2001) pour le diagnostic des défauts sur un rotor et (Li et al., 2005) pour la détection de défauts sur machines tournantes. La Figure 3-19 illustre le type de démarche qui a été mise en œuvre dans (Vrignat, 2010) et (Vrignat et al., 2012).

#### 3.2.1.2 Donner du sens à la topologie du MMC

Les techniques pour le choix de la topologie d'un MMC sont très souvent empiriques. Le choix de cette topologie doit se faire afin de donner du sens à chacun des états qui est défini. Dans la première application sur la reconnaissance de l'écriture, les états pouvaient soit représenter les mots ou les lettres, soit ils n'avaient pas de réelle

Combien de niveaux de vigilance doit-on choisir ?

signification physique comme pour les modèles gauche-droite de mots.

Dans cette seconde application sur l'état de santé d'un système, notre volonté est justement de donner du sens à chacun des états. Lors de la mise en fonction d'un système, celui-ci est supposé en parfait état de marche. Au cours du temps, son état de santé va se détériorer progressivement. Les événements observés sur le système, depuis sa mise en fonction jusqu'à l'arrivée d'une panne, formeront le corpus permettant l'apprentissage du modèle de dégradation. La topologie doit permettre de définir un état initial qui indique que tout va bien, pour progressivement s'orienter vers un état terminal qui indique que le système est en panne. Ces états représenteront les niveaux de vigilance estimés pour la planification d'actions de maintenance préventive.

**« Combien de niveaux de vigilance significatifs et interprétables peut-on choisir ? »**

Comme il n'existe pas de technique pour choisir la topologie d'un MMC, son nombre d'états est choisi de façon empirique. Cependant, pour le cas présent, ce choix peut être guidé par les éléments suivants :

- Le nombre de deux ne permettrait que de représenter les états marche et arrêt.
- Avec trois états, on dispose d'un niveau intermédiaire qui nous indique un début de dégradation, mais est-on plus près de la panne ou d'un système sain ?
- A partir de quatre états, nous disposons d'un état qui précède la panne et qui peut indiquer que celle-ci est imminente.
- Avec cinq états et plus, cette même information est disponible mais selon le rythme de mise à jour du modèle (passage d'un état à un autre) la détection d'une panne pourrait être trop lente.

Le choix s'est porté sur un modèle à quatre niveaux de vigilance. Ces modèles à quatre niveaux sont utilisés classiquement pour la mise en place d'actions préventives (prévention des risques liés aux inondations (Ministère de l'Écologie, 2006), Vigipirate (Ministère de l'intérieur, 2003)). Dans (Welte, 2008), une modélisation à quatre niveaux de vigilance est proposée dans une étude portant sur la détérioration de composants dans les centrales hydroélectriques (Figure 3-20).

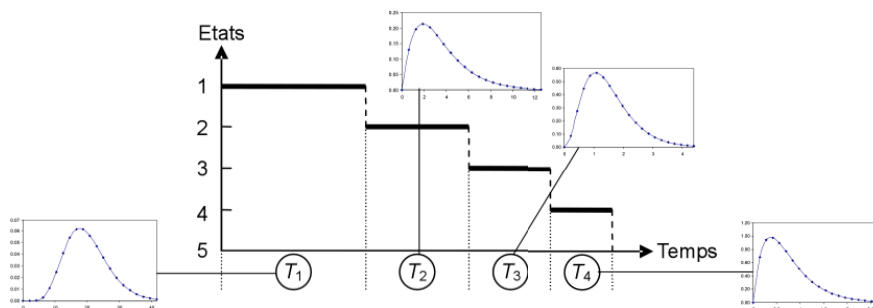


Figure 3-20 : Modélisation de la détérioration par un processus semi-markovien à états discrets (Welte, 2008).

Afin de traduire le caractère progressif de la dégradation, la topologie choisie est de type Bakis (orienté dans un sens) (Figure 3-21). Les sauts d'étapes ne sont pas autorisés dans le sens de la dégradation (de S4 à S1), mais ils sont autorisés dans l'autre sens, sens qui traduit une amélioration de l'état de santé du système (suite à une action de maintenance).

En résumé, le sens que nous avons voulu donner aux différents états :

- S4 « *tout va bien* »,
- S3 « *ça peut aller* »,
- S2 « *ça va mal* »,
- S1 « *trop tard !* ».

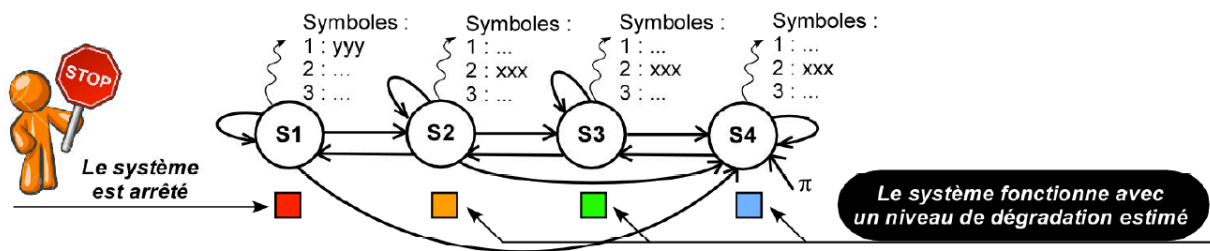


Figure 3-21 : Topologie du modèle retenu.

### 3.2.1.3 Sous-ensemble pour l'agroalimentaire

#### 3.2.1.3.1 Codification des observations

La topologie définie dans le paragraphe précédent est le support qui va émettre des symboles au rythme des observations qui seront définies sur le système industriel à surveiller. Ces séquences d'observations formeront le corpus qui permettra d'apprendre le modèle de MMC, avec les contraintes suivantes :

- au démarrage, le système est supposé en parfait état : début en S4,
- la panne conduit forcément à l'état S1.

La phase d'apprentissage consiste alors à assimiler les variantes observées, dans le corpus d'apprentissage, entre la mise en fonction et la panne.

Il se peut qu'aucun événement ne soit observé pour le rythme d'observations qui a été défini. Afin de permettre une mise à jour régulière du modèle, si aucun symbole n'est observé, un symbole particulier signifiant « *Ras* » (Rien à signaler (Figure 3-22)) est inséré dans la séquence initiale. Ce travail concernant les critères d'échantillonnage a fait l'objet de travaux dans la thèse de P. Vrignat (Vrignat, 2010).

$$O = (o_1, o_2, o_3, \dots, o_T)$$

$o_T = \text{observation de dépannage (DEP)}$

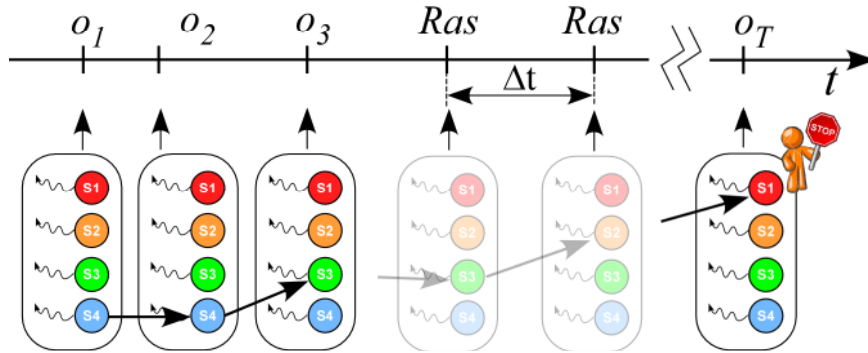


Figure 3-22 : Séquence de symboles observés avec insertions de symboles Ras.

Les activités de maintenance recensées Figure 3-23 sont codées arbitrairement (de 1 à 10 pour l'exemple (Figure 3-24)).

Nature des interventions (événements observés)	DEP (Dépannage/arrêt prod)	SEC (Sécurité) Activité liée à la sécurité de la machine et consignations.
	RM (Réglage Machine)	RAN (Remise A Niveau / planifié)
	AU (Autre) Cette activité peut être associée à de petits travaux	NET (Nettoyage Machine)
	OBS (Observation)	VEP (Visite Entretien Préventif) Cette activité peut être associée à de petits travaux
	TEP (Travaux Entretien Préventif pas d'arrêt prod)	Ras pas d'intervention
Etat du processus MARCHÉ ARRÉT		

Figure 3-23 : Liste des différentes actions de maintenance observées.

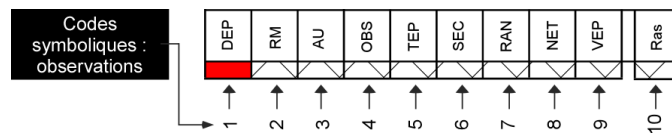


Figure 3-24 : Exemple de codification symbolique des différentes observations.

### 3.2.1.3.2 Résultats obtenus sur une peseuse

Nous avons souhaité donner « un sens très fort » à l'état S2. Le passage à l'état S2 suppose que la panne (état S1) peut survenir de façon imminente (au prochain cycle). Cet état doit donc indiquer l'arrivée de la panne suffisamment tôt pour permettre de planifier l'action de maintenance et pas trop tôt pour éviter d'engager sur le terrain des interventions inutiles.

Nous présentons une synthèse des résultats obtenus dans (Vrignat, 2010). Le tableau type aura la forme suivante :

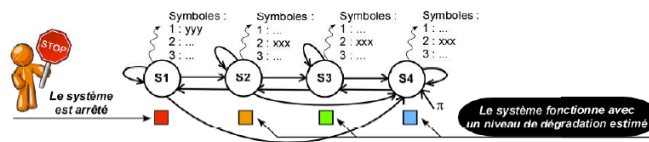
S1 DEP	S3 ou S4 : 1 observation avant DEP	Quantité successive de S2 avant S1					Quantité de S2 ne conduisant pas à S1
		1	2	3	4 - 5	+ de 5	

Tableau 3-2 : Modalité de lecture des tableaux.

Le Tableau 3-2 permet d'évaluer la détection de la panne : ni trop tard (cas extrême où l'état S2 n'apparaît pas avant S1 (②)), ni trop tôt (occurrence d'états S2 successifs avant S1(①)) ! Le cas ③ traduit l'amélioration du niveau de dégradation du système suite à des opérations de maintenance réalisées sur le système surveillé. Cette situation doit exister, mais doit être minimisée car elle traduit le niveau de sensibilité du modèle par rapport aux observations. Plus un modèle est sensible, plus il alertera de manière intempestive l'expert qui planifiera obligatoirement des interventions de maintenance inutiles.

Le Tableau 3-3 présente un bilan des résultats concernant le modèle choisi. Ce modèle estime bien l'état « ARRET » en fonction de l'activité de maintenance rattachée (DEP). Nous pouvons faire ressortir du Tableau 3-3 :

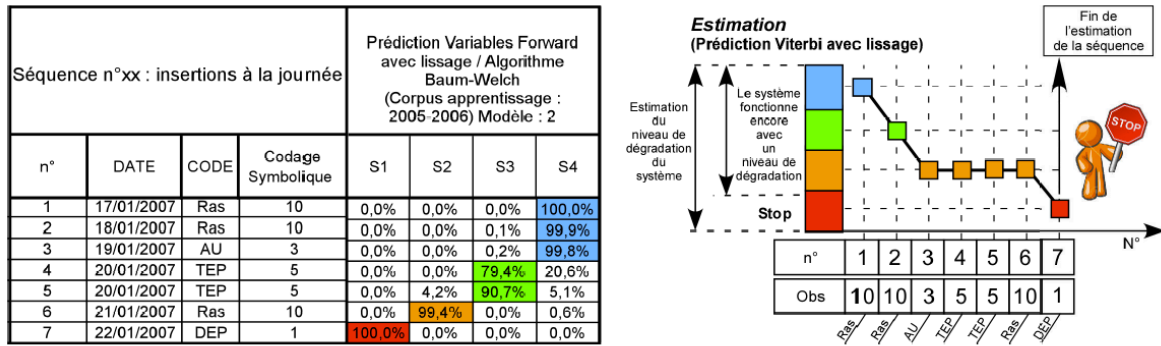
- Le modèle ne reconnaît pas un passage en S2 avant un passage en S1 (②) dans 12,5% des cas,
- Sa capacité à détecter la panne (①) est bonne. La prévision de la panne à + 3 observations est correcte dans 62,5% des cas,
- La sensibilité est bonne (③ = 0%).



		Prédiction : Variables Forward					Apprentissage : Baum-Welch
S1 DEP	S3 ou S4 : 1 observation avant DEP	Quantité successive de S2 avant S1					Quantité de S2 ne conduisant pas à S1
		1	2	3	4 - 5	+ de 5	
100%	12,5%	37,5%	12,5%	12,5%	12,5%	12,5%	0%

Tableau 3-3 : Tests du modèle sur la période 1<sup>er</sup> trimestre 2007.

La Figure 3-25 montre l'évolution de l'état de santé pour une séquence d'observations. Les estimations sont réalisées soit par la variable Forward (a), soit par l'algorithme de Viterbi (b).



(a) (b)  
Figure 3-25 : Résultats d'un test sur une séquence d'observations.

Le Tableau 3-4 propose une synthèse des résultats concernant la capacité du modèle à prédire l'arrivée de la panne (apparition de l'état S2 avant l'état S1). Ces résultats sont très pertinents. La panne arrive à +3 jours dans 85,7% des cas. La prédiction de panne est donc correcte. Cela laisserait le temps, à l'expert chargé de la maintenance, de programmer une action de maintenance préventive.

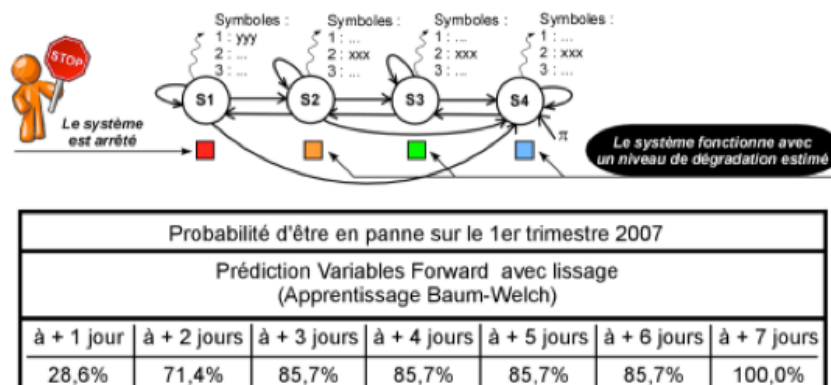


Tableau 3-4 : Prédiction de panne (peseuse M2).

### 3.2.2 Etat de santé d'un système fondé sur les résidus

Dans cette partie, les modèles de Markov utilisent en entrée une grandeur continue fournie par une modélisation fondée sur les résidus. Le résidu est un signal particulier permettant de mettre en évidence de manière simple l'apparition d'un défaut. L'étude plus détaillée est disponible dans les travaux de thèse de Aggab (Aggab, 2016). Le système est modélisé par un modèle mathématique. L'observateur va, à partir des informations disponibles (entrée, mesure), estimer l'état dans lequel se trouve le système. Les valeurs des résidus obtenus (l'écart entre le comportement du système et sa modélisation) sont découpées en classes et deviennent les observations des modèles de Markov.



L'approche (Figure 3-26) se décompose en deux phases :

- La phase d'apprentissage qui consiste à déterminer les classes et à estimer les modèles de Markov en utilisant des cycles complets de séquences de dégradation du système.
- Dans la phase d'exploitation, les classes et le modèle obtenus dans la phase précédente sont utilisés. A partir du résidu calculé en temps réel, la classe de l'observation est déterminée. L'algorithme consiste alors à rechercher la séquence d'états la plus probable à partir d'observations obtenues (algorithme de Viterbi). Le niveau de dégradation correspond alors au dernier état estimé (Figure 3-26).

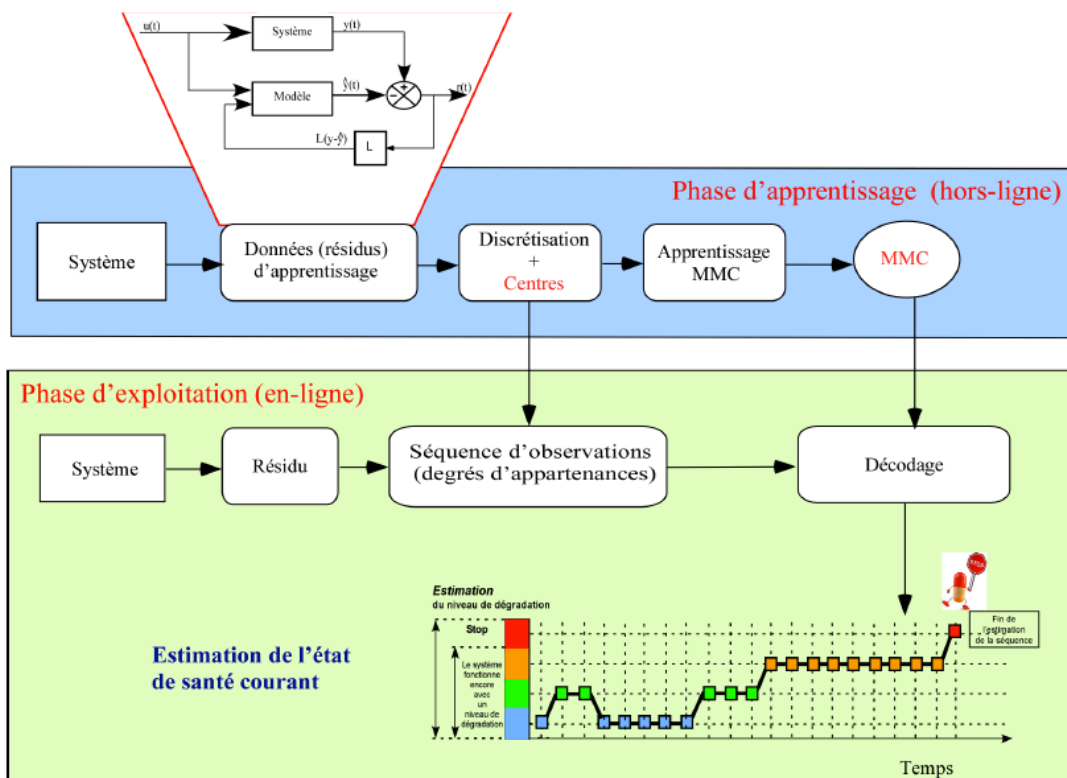


Figure 3-26 : Phases de la démarche de modélisation.

### 3.2.2.1 Système de régulation du niveau d'eau

Le système utilisé, dans cette partie, est un système bouclé. De part sa conception, ce type de système est prévu pour compenser d'éventuelles perturbations en ajustant la commande suivant les conditions de sollicitations ou de perturbations du système. On parle alors de système asservi ou régulé. L'arrivée d'une panne pourra donc être considérée comme une perturbation et passer inaperçue tant que la commande du système bouclé est capable de compenser les éventuelles dégradations des actionneurs.

Le choix s'est donc porté sur ce type de système pour montrer la pertinence de notre démarche.

L'application choisie est un système de régulation de niveau d'eau représenté par la Figure 3-27. Elle est présentée dans les travaux de Nguyen (Nguyen, 2015). L'eau est injectée par une pompe dans un premier réservoir de section notée  $S_1$ . Son écoulement par l'intermédiaire de la vanne  $V_1$  alimente le second réservoir de section notée  $S_2$ . La régulation est réalisée sur le niveau d'eau  $h_2$  du réservoir 2. Sa valeur est mesurée par un capteur et contrôlée par ajustement de l'entrée de commande de la pompe  $u$ . La commande est calculée à partir d'un régulateur de type PID.

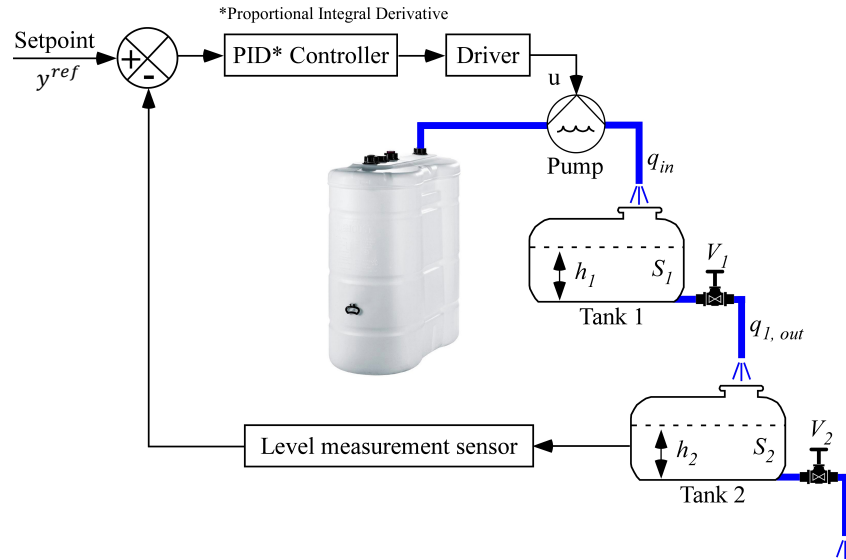


Figure 3-27 : Système de régulation du niveau d'eau.

Le système peut être décrit par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \frac{dh_1(t)}{dt} = \frac{1}{S_1} q_1(t) - \frac{K_{v1}}{S_1} \sqrt{2gh_1(t)} \\ \frac{dh_2(t)}{dt} = \frac{K_{v1}}{S_1} \sqrt{2gh_1(t)} - \frac{K_{v2}}{S_2} \sqrt{2gh_2(t)} \end{cases} \quad (3.1)$$

L'objectif de la commande est de maintenir le niveau  $h_2$  à la valeur de la consigne demandée notée  $y^{ref}$ . Sa mesure éventuellement bruitée,  $h_2^m$  est exprimée sous la forme :

$$h_2^m(t) = h_2(t) + d(t) \quad (3.2)$$

La perte de capacité partielle ou totale d'un actionneur peut engendrer une perte de performance du système dans le sens où elle modifie son comportement par rapport au comportement désiré. Par conséquent, la capacité de la pompe au temps  $t$  peut être exprimée comme suit :

$$K_a(t) = K_a^{init} - D(t) \quad (3.3)$$

où  $K_a^{init}$  est la capacité initiale de la pompe et  $D(t)$  décrit la dégradation de la pompe accumulée au temps  $t$ .

Les paramètres du régulateur PID sont réglés en phase de conception et ne sont pas modifiés au cours du fonctionnement du système.

### 3.2.2.2 Comportement du système

Dans cette partie, nous présentons un exemple d'évolution du système simulé. La consigne est variable et le système se dégrade dans le temps et de façon progressive. Le système sera considéré comme défaillant lorsque les objectifs ne seront plus satisfaits (recette de pilotage). Pour ce faire, la capacité réelle de la pompe doit être supérieure à une valeur critique fixée lors de la conception du système de commande notée  $K_{a\text{critique}}$ .

*Remarque* : pour un système réel, l'échelle de temps du modèle de comportement du système et celle du modèle de dégradation présenteraient un écart important. La vitesse de la dégradation a été accélérée pour les besoins de la simulation.

Dans cet exemple, la capacité de la pompe  $K_a$  diminue à partir de sa capacité nominale suivant un processus dit de « chocs ». Le processus d'arrivée des chocs est un processus de Poisson de paramètre  $\lambda = 10^{-3}$  arrivées.  $s^{-1}$ . Les tailles des chocs ( $z_n$ ) sont des variables aléatoires entre 0 et  $\Delta = 0,5$ . La valeur de la capacité reste constante entre deux chocs.

L'évolution de la consigne est illustrée sur la Figure 3-28 (a). Les niveaux d'eau des deux réservoirs sont représentés sur la Figure 3-28 (b) et (c). La trajectoire simulée de la capacité de la pompe est décrite sur la Figure 3-28 (d). Les Figure 3-28 (e) et Figure 3-28 (f) montrent l'entrée de la commande appliquée sur la pompe et le débit d'écoulement.

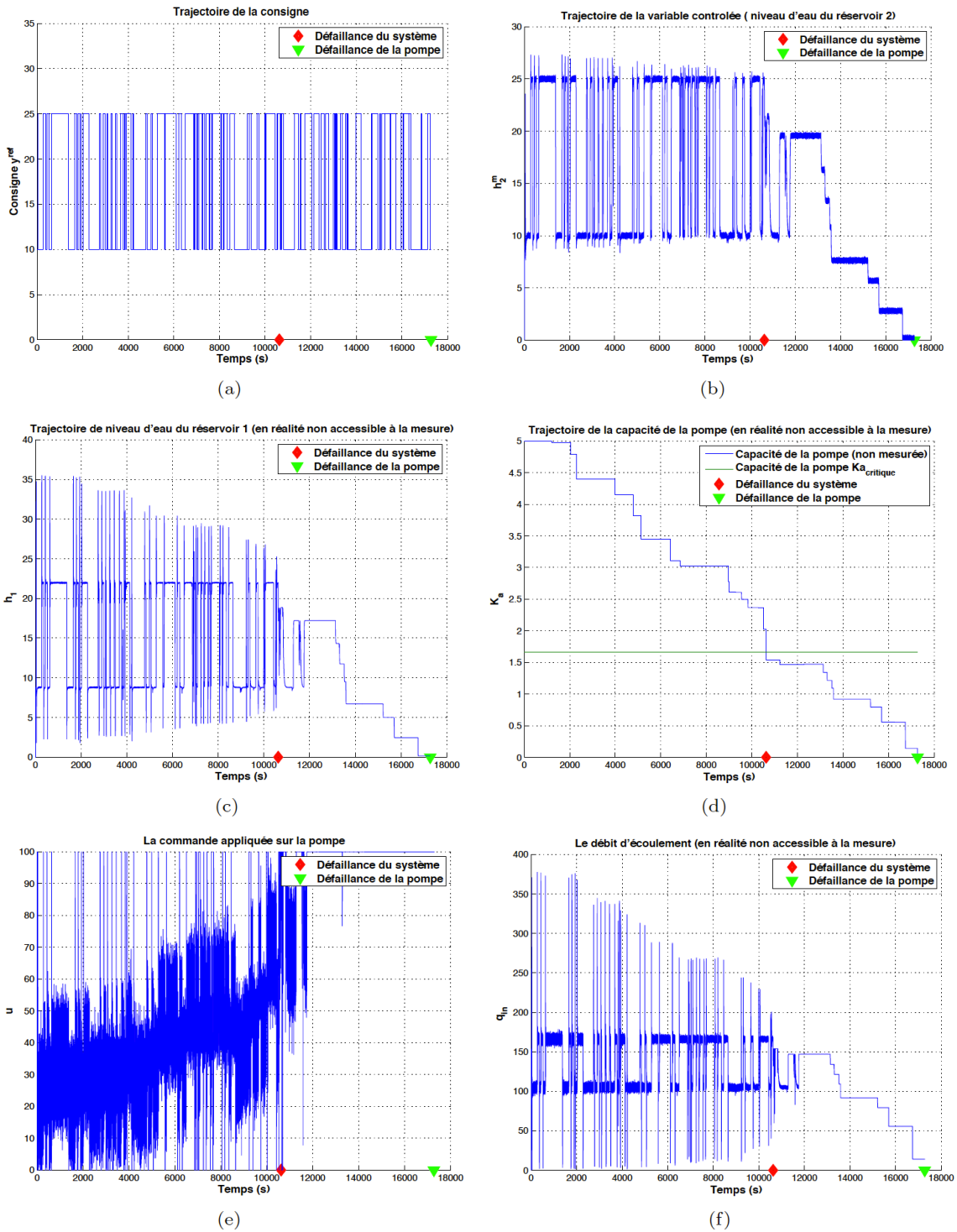


Figure 3-28 : Simulation d'une trajectoire du système jusqu'à la défaillance de la pompe : (a) la consigne, (b) le niveau d'eau du réservoir 2, (c) le niveau d'eau du réservoir 1, (d) la capacité de l'actionneur, (e) la valeur de commande appliquée sur l'actionneur et (f) le débit d'écoulement d'entrée correspondant.

### 3.2.2.3 Etat de santé du système par MMC

L'observateur utilisé pour modéliser le système (Figure 3-26 phase apprentissage) est un observateur à grand gain (Aggab, 2016). Les résidus obtenus entre le système et l'observateur sont ensuite discrétisés pour produire les codes des observations utilisés par les MMC.

L'ensemble des données est constitué de 60 essais de dégradations jusqu'à la défaillance de la pompe pour des missions à deux consignes avec une évolution aléatoire. La répartition aléatoire des données pour les tests a été la suivante : 2/3 pour l'apprentissage et 1/3 pour les tests.

Dans la phase d'apprentissage, pour étiqueter les résidus et fournir les codes des observations du modèle de Markov, des centres de classes ont été déterminés par l'algorithme « LBG » (Linde et al., 1980). Nous avons choisi arbitrairement un nombre de classes variant de 3 à 7. Dans la phase d'exploitation, une mesure de distance permet de coder le résidu. La topologie des MMC retenue est celle à quatre états décrite Figure 3-21 (Vrignat, 2010). Une variante floue a également été testée. L'apprentissage des modèles a été effectué en considérant que le système démarre en parfait état et termine en panne au dernier état.

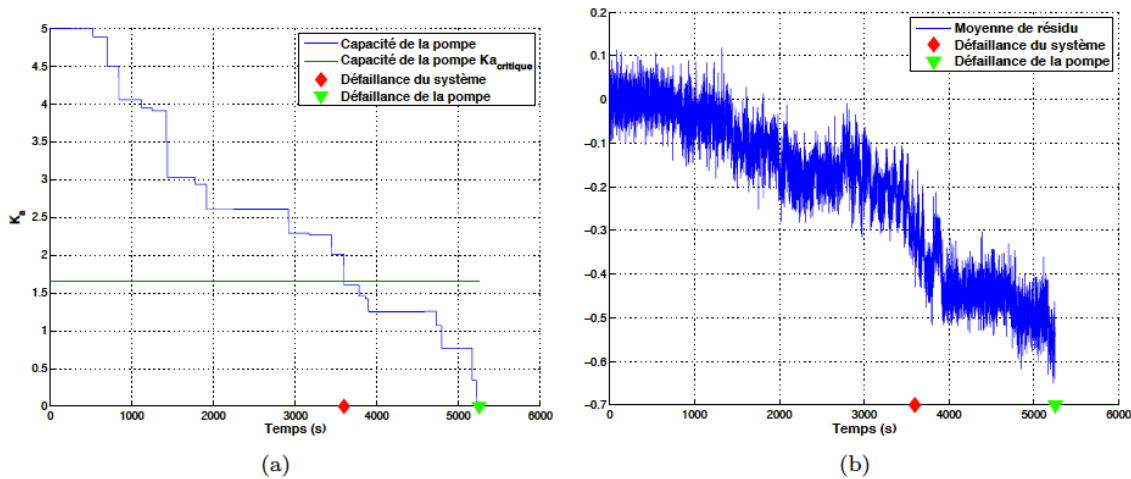


Figure 3-29 : Evolution jusqu'à la défaillance (a) de la capacité de la pompe, (b) de la moyenne de résidu.

La Figure 3-29 illustre l'évolution de la capacité de la pompe jusqu'à sa défaillance ainsi que la moyenne du résidu généré par l'observateur. La Figure 3-30 présente les niveaux de dégradation obtenus par un MMC et un MMC flou pour différents nombres de classes (de 3 à 7) utilisés pour coder le résidu.

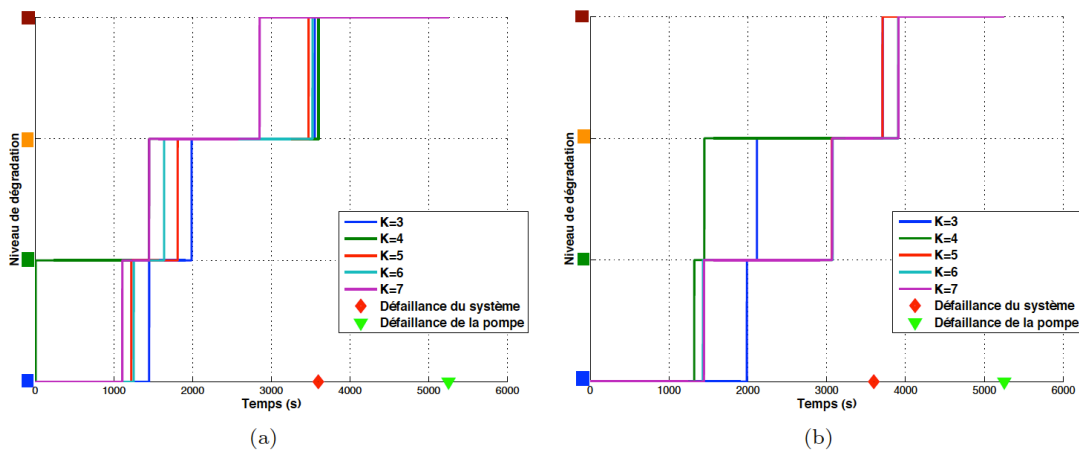


Figure 3-30 : Evolution du niveau de dégradation pour l'exemple (a) MMC, (b) MMC flou.

Tout comme pour l'exemple du sous-ensemble utilisé dans l'agroalimentaire (paragraphe 3.2.1.3), la Figure 3-30 montre que les MMC ont la capacité à appréhender l'arrivée de la panne à partir d'informations assez bruitées. Pour le modèle MMC (Figure 3-30 (a)), le passage au niveau de dégradation 3 se fait à  $t=2000$  s (pour le cas  $K=3$  classes), et pour le MMC flou (Figure 3-30 (b)), le passage au niveau de dégradation 3 se fait à  $t=3000$  s (pour le cas  $K=7$  classes). Le MMC flou fournit un très bon résultat en terme d'anticipation de la panne. Cependant, cela nécessite de faire en amont, un choix correct pour le nombre de classes  $K$ .

### 3.2.3 De l'état de santé au pronostic

Le comportement asymptotique des modèles de Markov peut être exploité pour calculer un pronostic de panne sur un système. Parmi les premiers travaux utilisant cette propriété, ceux de (Baruah and Chinnam, 2005; Chinnam and Baruah, 2003) peuvent être cités. L'objectif était d'estimer en temps réel la durée de vie résiduelle (Remaining Usefull Life : RUL) sur des outils d'usinage. Par la suite, (Zhang et al., 2005) ont utilisé les MMC pour estimer la durée de vie résiduelle de roulements mécaniques.

Différentes stratégies ont pu être testées. Par exemple, (Tobon-Mejia et al., 2012) s'appuient sur la topologie du MMC pour définir le chemin le plus court et le chemin le plus long en considérant une seule visite par état. La durée de vie résiduelle est alors estimée par l'addition des durées de séjour. Dans (Camci and Chinnam, 2010; Giantomassi et al., 2011), les auteurs ont recours à la simulation de Monte Carlo. La particularité est de ne pas nécessiter d'hypothèse sur le modèle.

La probabilité pour que le système atteigne un état défaillant, tend vers 1 lorsque le temps s'écoule (c'est à dire quand  $t$  tend vers l'infini). La probabilité de trouver le MMC dans l'état défaillant tend vers 1 quand  $t$  tend vers l'infini. Un tel état est dit : état absorbant. Cette caractéristique traduit le comportement asymptotique des MMC qui permet de calculer le nombre moyen de transitions que met le modèle pour atteindre l'état correspondant à la défaillance.

#### 3.2.3.1 Comportement asymptotique des MMC

Soit  $S$  l'ensemble des  $N$  états d'un modèle de Markov. Soit  $A$  la matrice des probabilités de transition entre états.  $a_{ij}^n$  est la probabilité d'arriver à l'état  $j$  en partant de l'état  $i$ , après  $n$  transitions.

*Définition 1* : on dit qu'un état  $j \in S$  est accessible depuis un autre état  $i \in S$ , s'il existe un temps  $n \in \mathbb{N}$  tel que  $a_{ij}^n \geq 0$ ; c'est à dire que partant de  $i$ ,  $j$  est atteint en un nombre  $n$  fini de pas.

*Définition 2* : un état  $i \in S$  est dit absorbant si  $a_{ii} = 1$  et donc nécessairement  $a_{ij} = 0$  pour tout  $j \neq i$ . Un modèle de Markov est dit absorbant, s'il existe un état absorbant accessible.

Pour l'estimation du *nombre moyen avant absorption*, nous conviendrons de numérotter les  $N$  états de manière à placer d'abord les  $q = N - r$  états non absorbants puis les  $r$  états absorbants. La matrice de transition  $A$  prend alors la forme canonique suivante :

$$A = \begin{pmatrix} Q & R \\ 0 & I \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

où  $Q$  est une matrice de taille  $q \times q$ ,  $R$  est une matrice de taille  $q \times r$ ,  $0$  désigne la matrice nulle de taille  $r \times q$ , et  $I$  la matrice identité de taille  $r$ . Il est facile de montrer par récurrence que :

$$A^n = \begin{pmatrix} Q^n & [I + Q + \dots + Q^{n-1}]R \\ 0 & I \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

Sachant, que la probabilité d'atteindre après un certain nombre de transitions un état absorbant est de 1. Nous obtenons alors :

$$\lim_{n \rightarrow \infty} Q^n = 0 \quad (3.6)$$

La matrice carrée  $I - Q$  est inversible, et son inverse vaut :

$$[I - Q]^{-1} = \sum_{k=0}^{\infty} Q^k \quad (3.7)$$

La matrice  $N = [I - Q]^{-1}R$ , est la matrice fondamentale du modèle. Nous obtenons pour la  $\lim_{n \rightarrow \infty} A^n$  de l'équation (3.5) :

$$\lim_{n \rightarrow \infty} A^n = \begin{pmatrix} 0 & NR \\ 0 & I \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

En conséquence, l'élément de matrice  $n_{ij}$  de  $N$  représente le nombre moyen de périodes séjournées dans l'état transitoire  $j$  pour une chaîne débutant son évolution dans l'état transitoire  $i$ .

Partant de l'état transitoire  $i$ ,  $E_{il}$  le nombre moyen de transitions avant d'atteindre l'état absorbant (persistant)  $l$  est égal à la somme des termes de la  $i^{\text{ème}}$  ligne de  $N$ .

$$E_{il} = \sum_j n_{ij} \quad (3.9)$$

$E_{il}$  correspond également au nombre moyen de transitions partant de l'état  $i$  vers l'état défaillant  $l$ .

3.2.3.2 Du modèle de Markov au pronostic

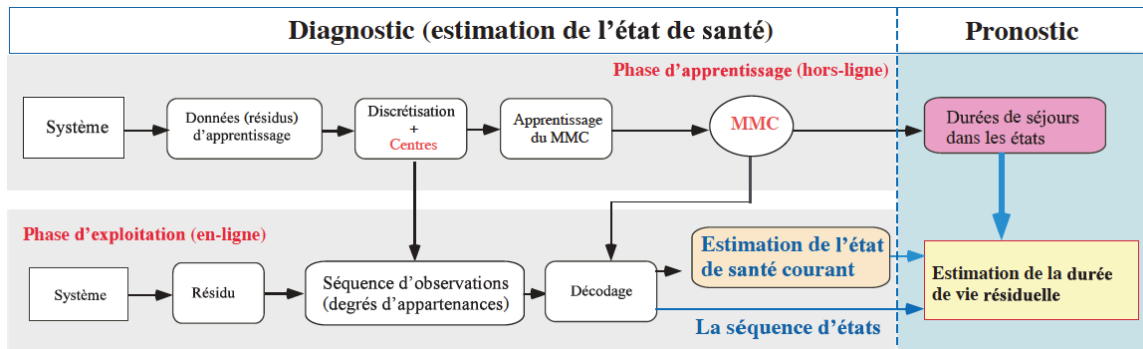


Figure 3-31 : Les différentes étapes pour la mise en œuvre du pronostic.

La réalisation du pronostic est une extension de l’approche de diagnostic (Figure 3-31). Elle se décompose en deux phases :

- Une phase d’apprentissage (hors ligne) durant laquelle les différents paramètres du modèle sont estimés (centres des classes, apprentissage du MMC).
- Une phase d’exploitation (en ligne), à partir de la séquence d’états estimés par la phase de diagnostic. Les valeurs de durée de vie résiduelle (*RUL*) sont estimées de la manière suivante :

$$RUL = E_{il} - t_i \tag{3.10}$$

$E_{il}$  comme défini précédemment,  $i$  et  $t_i$  respectivement l’état courant fourni par l’algorithme de Viterbi (phase diagnostic) et la durée passée dans cet état.

En considérant le coefficient de confiance  $n$ , l’intervalle de confiance associé à la *RUL* peut s’exprimer de la façon suivante :

$$RUL_{max} = E_{il}(1 + n) - t_i \tag{3.11}$$

$$RUL_{min} = E_{il}(1 - n) - t_i \tag{3.12}$$

3.2.3.3 Application du pronostic par MMC

L’approche décrite a été appliquée sur des données obtenues par simulation de la dégradation du système de régulation de niveau d’eau (§3.2.2.1). Après la synthèse de l’observateur, l’apprentissage du MMC et le calcul des durées moyennes de séjour, la *RUL* est estimée à partir de la séquence d’états obtenue par l’algorithme de Viterbi. Les différentes étapes et les algorithmes nécessaires à leur réalisation sont rappelés en Figure 3-32.



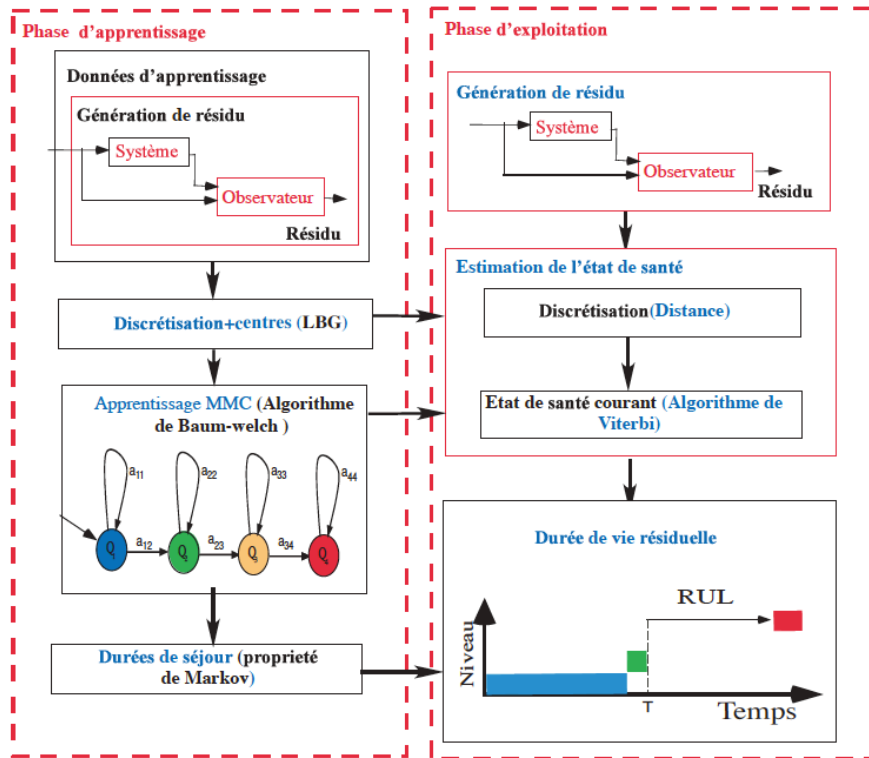


Figure 3-32 : Les étapes vers le pronostic.

Afin d'illustrer la méthode, un exemple de dégradation issue de la base de tests est présenté Figure 3-33. Il montre l'évolution de la capacité de la pompe jusqu'à sa défaillance et la moyenne du résidu généré par l'observateur.

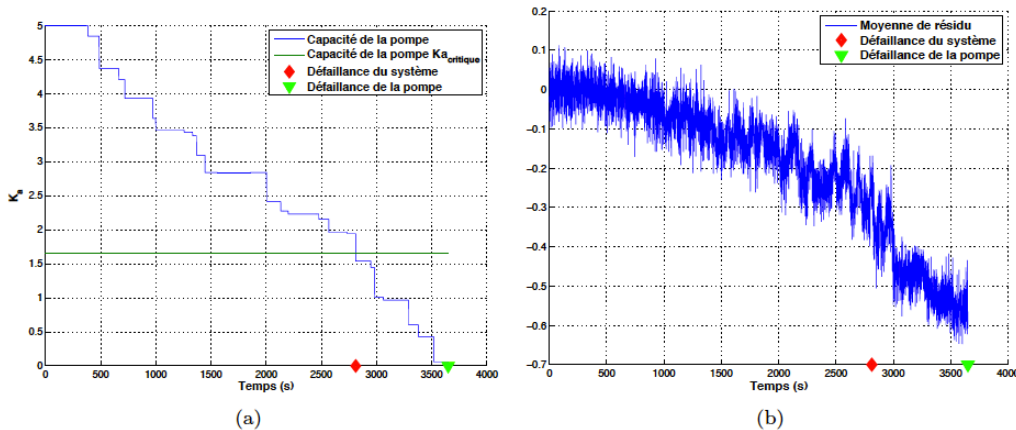


Figure 3-33 : L'évolution (a) de la capacité de la pompe et (b) de la moyenne du résidu.

Nous remarquons que le suivi de l'évolution du résidu ne reflète pas le niveau de dégradation atteint par le système. Il est autour de zéro en absence de dégradation et il augmente (en valeur absolue) en présence de dégradations avec une certaine fluctuation. Cela est dû au changement de consigne et aux bruits de mesure.

La séquence d'états et l'estimation de la RUL ainsi obtenues sont présentées dans la Figure 3-34. Le nombre de classes a été fixé à 4 en tenant compte des résultats de la phase de diagnostic

(Aggab, 2016). Les RUL estimées sont affichées en rouge (avec un coefficient de confiance de 0.1 en pointillés), l'évolution de la vraie RUL en bleue et les évolutions qui caractérisent l'intervalle de confiance pour un  $\alpha = 0.3$  (écart de 30% par rapport à la vraie RUL) en vert.

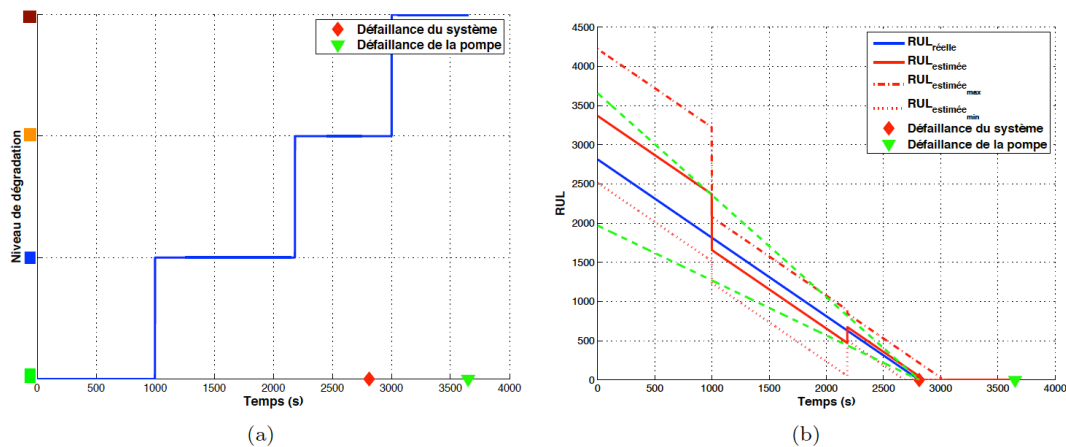


Figure 3-34 : Evolution de (a) la séquence d'états et (b) l'estimation de la durée de vie résiduelle (MMC).

### 3.2.3.4 Conclusion

Dans cette dernière partie, nous montrons un autre usage possible des modèles de Markov appliqué au pronostic. Le temps estimé de séjour dans les états permet de faire ce pronostic. Celui-ci peut être affiné grâce aux évènements qui peuvent accélérer le passage d'un état à l'autre. Le changement d'états peut provoquer des ruptures dans l'estimation de la RUL comme le montre les « paliers » aux changements d'états (Figure 3-34).

Tout comme pour le diagnostic, le pronostic sera d'autant plus pertinent que le choix du modèle de Markov sera adapté au système étudié. Ce sujet sera traité dans le chapitre suivant.

## 3.3 Apport des MMC

### 3.3.1 Par rapport à des Lois de survie

Dans le §3.2.1 concernant le diagnostic, sur la base des travaux de thèse de P. Vignat (Vignat, 2010), nous avons pu montrer l'intérêt d'utiliser les modèles de Markov pour estimer l'état de santé d'un système industriel [O1], [A5], [C15], [C37] et [C42-C44]. Tout comme pour la reconnaissance de l'écrit, les modèles de Markov sont capables d'appréhender la signature particulière de la panne et permettre ainsi de programmer des actions préventives pour l'éviter.

De plus, nous avons comparé les résultats fournis par les modèles de Markov avec des lois de survie classiques [A4], [A7-A8], [C23] et [C38]. Ces travaux ont montré l'apport des modèles de Markov par rapport aux méthodes classiques.

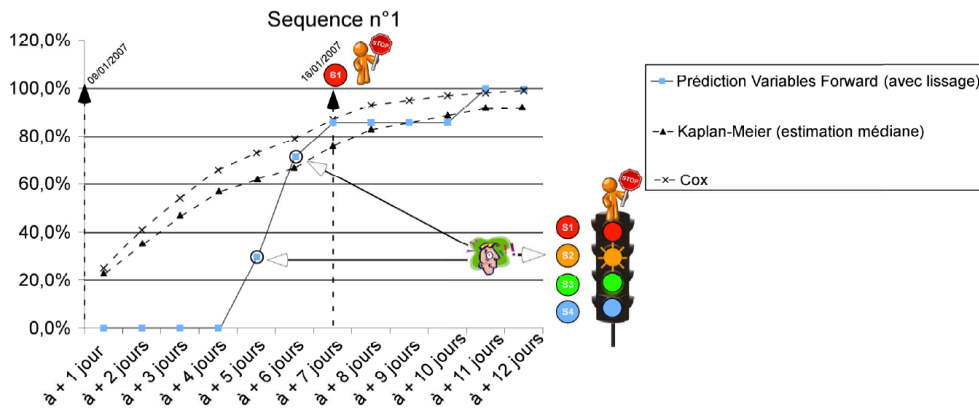


Figure 3-35 : Comparaison Lois de survie et MMC (agroalimentaire).

Les outils statistiques utilisés en fiabilité comme Cox ou Kaplan-Meier n'utilisent comme information en phase d'exploitation que le temps qui passe. En amont, ces outils utilisent le retour d'expérience sur le système ou la machine en analysant l'historique des pannes.

La différence essentielle des modèles de Markov cachés est qu'ils vont pouvoir, en phase d'exploitation, utiliser les événements observés sur le système. La phase d'apprentissage nécessitera également de disposer d'un historique des pannes. Comme le montre la Figure 3-35, les trois types de modélisation considèrent que le système démarre en bon état (à  $t = 0$ ) et termine dans une situation de panne lorsque  $t$  augmente. Cependant, les modèles de Markov, tels que nous les avons présentés, vont indiquer l'arrivée imminente de la panne de façon plus lisible (état S2 précède l'état en panne S1).

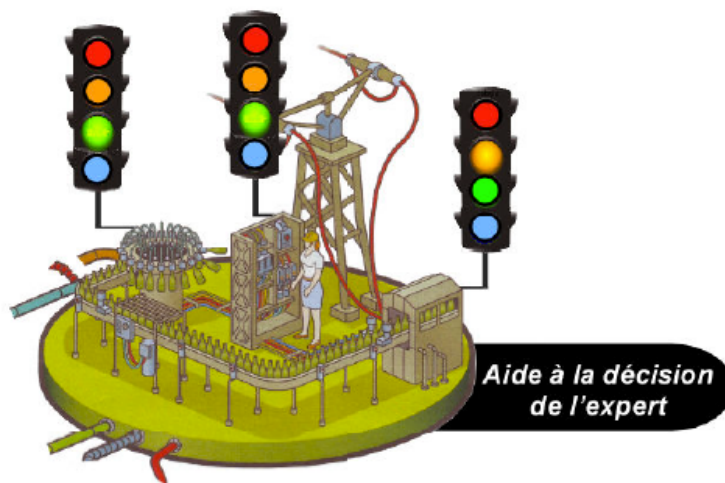


Figure 3-36 : Aide à la décision pour la planification.

En disposant de ces informations sur la plupart des composants d'un système de production industriel, l'expert, chargé de planifier la maintenance, pourra réorganiser le planning de son équipe de maintenance en fonction des différents niveaux de dégradation observés sur le parc de machines (Figure 3-36).

### 3.3.2 Par rapport à une modélisation fondée sur les résidus

Les résultats issus des travaux de thèse de T. Aggab (Aggab, 2016) ont fait l'objet de plusieurs travaux dans ces conférences [C1], [C3-C6] et [C30-C31]. Ces travaux ont pu montrer l'intérêt d'une approche fondée sur les résidus suivie d'un modèle de Markov notamment pour l'estimation du niveau de dégradation d'un système bouclé.

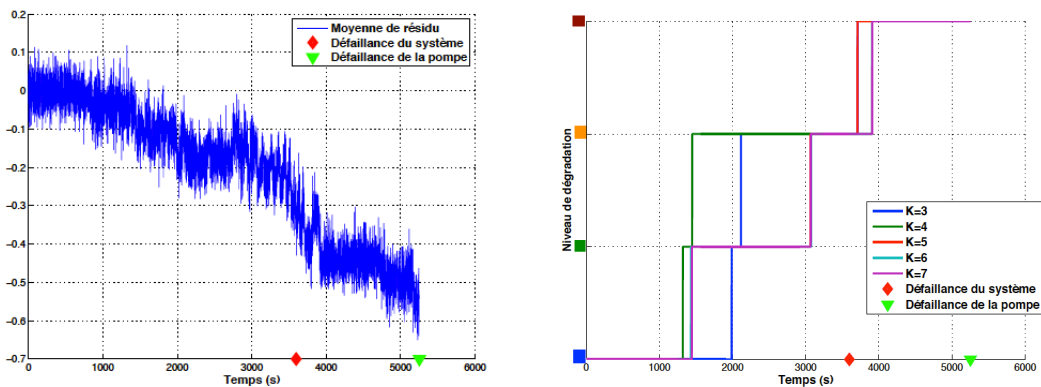


Figure 3-37 : Comparaison Résidus et MMC (niveau d'eau).

De part sa conception, un système bouclé est prévu pour compenser les variations dues aux conditions de fonctionnement (charge, perturbation, changement de consignes...). Cela rend difficile la détection d'une variation liée à un changement de conditions ou liée à une altération d'un composant du système.

Avec cette approche, nous avons montré qu'il était possible d'assimiler le niveau de dégradation du système à condition d'avoir choisi correctement la production des observations (nombre de classes) et la structure du modèle (MMC ou MMC flow).

### 3.3.3 Du diagnostic au pronostic par MMC

Le pronostic par MMC est une extension de l'usage de ces modèles. Dans le cadre des travaux de T. Aggab (Aggab, 2016) et dans le prolongement de ceux de P. Vrignat (Vrignat, 2010), nous avons implémenté les méthodes de diagnostic et de pronostic à base de MMC et nous les avons comparé à des lois de survie classiques [A1].

Le pronostic doit permettre d'aider l'expert à mobiliser les ressources dont il dispose pour effectuer les actions de maintenance nécessaire pour éviter ou au moins repousser l'arrivée de la

panne (Figure 3-38). Les tests des méthodes ayant été faits sur des processus simulés, il n'est pas possible, pour le moment, d'évaluer la pertinence de l'outil de pronostic qui a été développé.

Ce travail de validation fait partie des perspectives pour nos travaux.

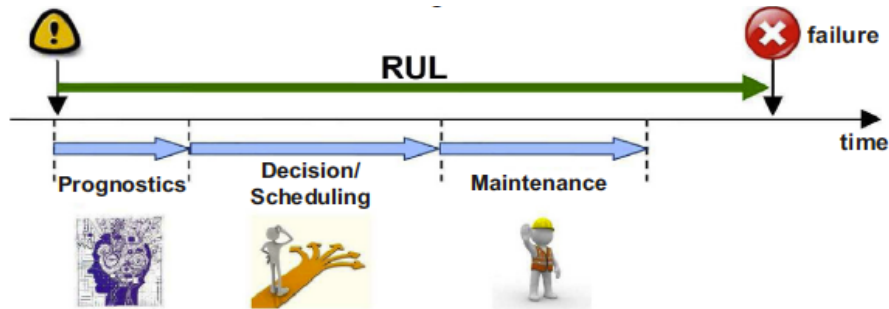


Figure 3-38 : Pronostic utile permettant de planifier la maintenance.

### 3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons montré la polyvalence des modèles de Markov pour résoudre des problèmes variés allant de la reconnaissance de l'écrit à la détection ou la prévision de pannes sur des systèmes industriels. L'idée générale, dans les différents cas étudiés, est d'assimiler la « signature » particulière d'un signal. Dans le cas de l'écrit (Figure 3-39 et Figure 3-40), nous considérons différents niveaux d'information allant du graphème à la phrase.

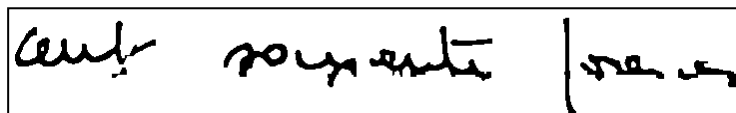


Figure 3-39 : Image du montant « Cent soixante francs ».

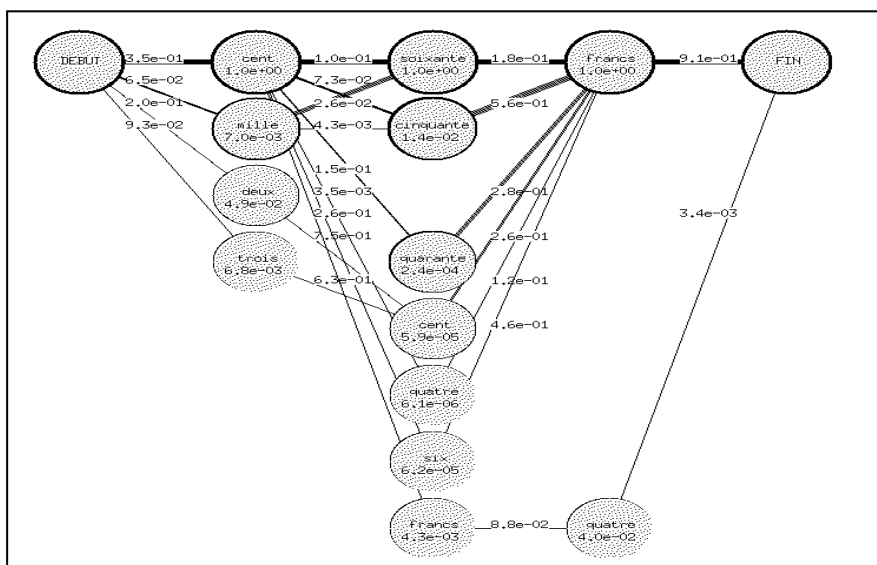


Figure 3-40 : Résultat de lecture du montant.

Pour le cas des systèmes industriels (Figure 3-41), Les modèles de Markov permettent d'affiner l'évaluation de l'état de santé d'un système. Ils permettent de passer d'un modèle fondé sur le taux de défaillance  $\lambda$  (Figure 3-41 (a)) à une représentation à plusieurs niveaux (Figure 3-41 (b)). En supposant que le MMC ait correctement assimilé la signature de la panne, le niveau de dégradation S2 sera donc annonciateur de la panne, laissant ainsi la possibilité d'engager des actions préventives pour éviter ou repousser cette dernière.

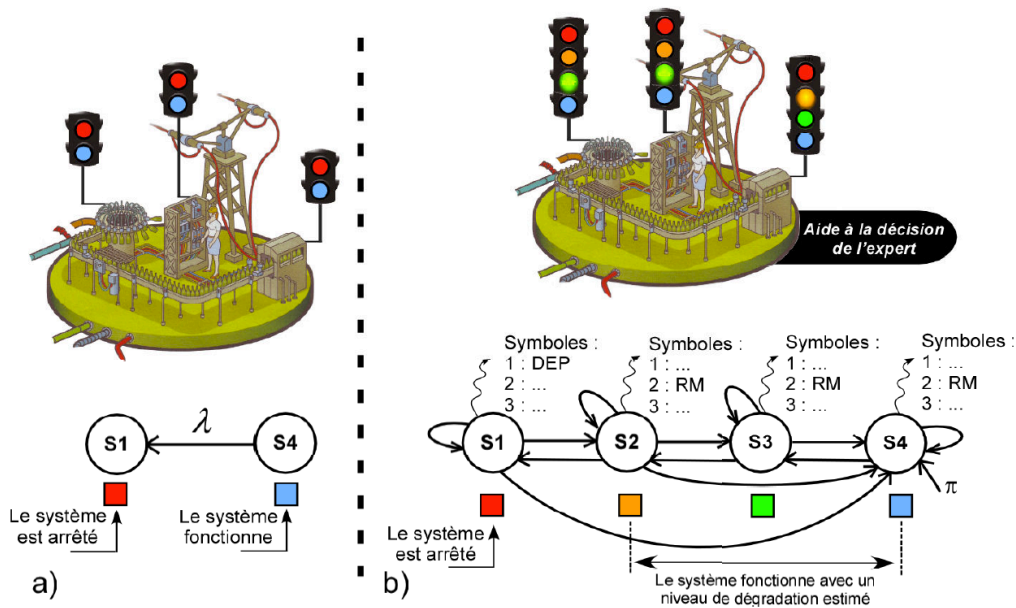


Figure 3-41 : Apport des MMC comme indicateur de niveau de service.

Dans le dernier cas étudié, les MMC sont utilisés après une étape de modélisation fondée sur les résidus. Le principe consiste à modéliser le fonctionnement du système dans une situation sans panne à l'aide d'un estimateur. La différence entre cet estimateur et le fonctionnement réel permet alors de produire des symboles qui vont alimenter le modèle de Markov. La particularité de la sortie du système étudié est qu'elle est asservie. Cette sortie peut donc évoluer selon les conditions d'utilisation du système (charge...). Bien que les observations soient bruitées, les MMC ont montré de bonnes capacités à détecter l'arrivée de la panne (Figure 3-37).

Dans la Figure 3-42, une action de maintenance a été simulée. Le résultat montre que cette action a été prise en compte par le modèle et que le niveau de dégradation est repassé au minimum.

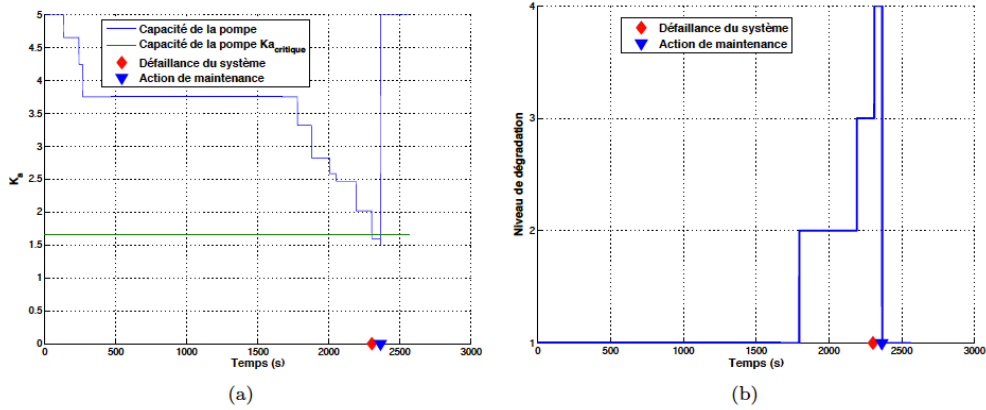


Figure 3-42 : Prise en compte d'une action de maintenance par les MMC.

Lorsque les modèles de Markov ont bien assimilé le niveau de dégradation d'un système, il est possible, en utilisant leur comportement asymptotique, d'estimer la durée de vie résiduelle (RUL) de ces systèmes. Toutes ces informations combinées offrent de nombreuses possibilités à l'expert chargé de planifier les actions de maintenance.

Ces différents exemples montrent la capacité des modèles de Markov à apporter des solutions à des situations très variées. Ces modèles sont capables d'assimiler différents niveaux de connaissance :

- Phrase, mot, lettre pour l'écrit,
- Actions de maintenance archivées ou mesures collectées pour des systèmes industriels.

Il est nécessaire pour la mise en œuvre de ces modèles de fixer quelques contraintes. Par exemple, il faut :

- Choisir la topologie du modèle,
- Définir Début et Fin du modèle (lien état-observation),

L'information est ensuite assimilée par la structure du modèle à l'aide des outils adéquats.

Cependant, comme l'ont montré certains résultats, il est nécessaire de se placer dans de bonnes conditions pour obtenir un résultat optimal. Ce point sera évoqué plus en détails dans le chapitre suivant.





# Chapitre 4 - Evaluation et Optimisation des Modèles de Markov

Le comportement et la réponse d'un modèle de Markov seront d'autant plus efficaces que les grandeurs d'entrées utilisées sont bien choisies et que la structure du modèle (topologie, nombre d'états...) est adaptée au problème à traiter. La littérature est riche en travaux sur l'évaluation de modèles en général. L'ensemble des approches permettant l'évaluation et l'optimisation de modèles de Markov est résumé sur la Figure 4-1. Ces approches peuvent se regrouper par familles :

*"Pluralitas non est ponenda sine necessitate"*  
G. Ockham<sup>1</sup>

- Analyse de sensibilité : les méthodes évaluent la réaction d'un modèle à un ensemble d'excitations externes ou internes.
- Incertitudes : de conception, sur les données, probabilistes, d'apprentissage, ...
- Mesures de pertinence : quelle valeur peut-on donner aux grandeurs d'entrée utilisées par les modèles ?
- Choix de modèles : quelle métrique utiliser pour comparer objectivement le comportement de différents modèles ?



Figure 4-1 : Études de pertinences de modèles de Markov cachés.

<sup>1</sup> : Rasoir d'Ockham : « Les multiples ne doivent pas être utilisés sans nécessité »

Dans cette partie, après avoir présenté un extrait des outils de mesures de sensibilité ou de pertinence et de comparaison de modèles que nous avons utilisé dans la thèse de B. Roblès (Roblès, 2013), nous illustrons leur utilisation sur quelques exemples fondés sur les MMC.

## 4.1 Outils d'optimisation

### 4.1.1 Sensibilité et incertitudes

Selon Rosen (Rosen, 1991), l'analyse de sensibilité est l'étude des relations des flux d'information entre les sorties et les entrées d'un modèle. Cette analyse est quantifiée par des indices de sensibilité qui traduisent l'importance de la variable considérée.

Dans l'ouvrage de Saltelli et al. (Saltelli et al., 2007), on trouve un bon aperçu des méthodes de calculs des indices de sensibilité. L'analyse de sensibilité peut se décomposer en cinq étapes comme le montre la Figure 4-2.

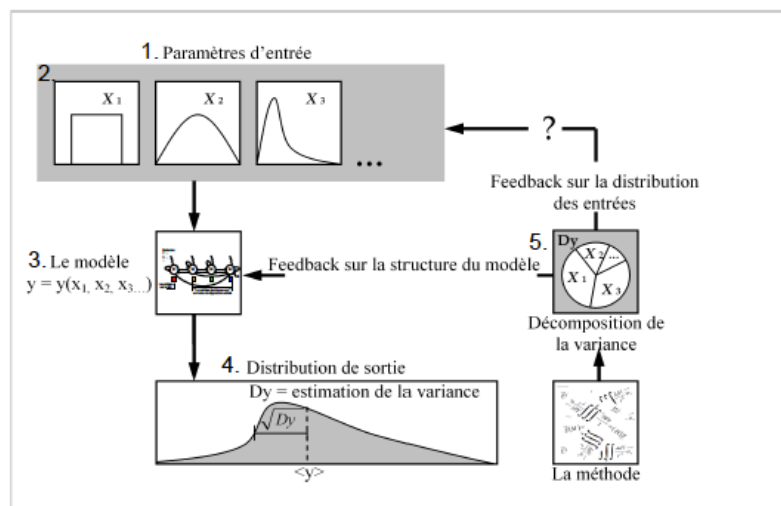


Figure 4-2 : Principe d'analyse de sensibilité d'un modèle (Saltelli et al., 2007).

La méthodologie GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation) (Beven and Binley, 1992) est fondée sur le concept « d'équifinalité » de modèles (i.e. permettant d'atteindre le même objectif à partir de modélisations différentes). En analysant les paramètres et les variables, cette méthode permet de sélectionner les meilleurs modèles en définissant un degré d'appartenance. Ce degré d'appartenance est lui-même estimé à l'aide du maximum de vraisemblance (Neuman, 2003).

L'analyse de sensibilité a été créée à l'origine pour traiter les problèmes d'incertitude des entrées d'un modèle (Neuman, 2003). « L'analyse d'incertitude consiste à propager les incertitudes des paramètres pris en compte dans la démarche sur le résultat final afin de lui affecter un intervalle d'incertitude ou de confiance » (source : AFSSET).

Le problème majeur lié aux différentes sources d'incertitude concerne la fiabilité dans la prédiction du modèle. Cette prise en compte dans un processus industriel permet selon Iooss (Iooss, 2011) :

- L'optimisation de la sûreté, en délimitant qualitativement les défaillances du système,
- L'optimisation conceptuelle, pour améliorer le système et le modèle.

## 4.1.2 Mesures de pertinences de modèles

### 4.1.2.1 Entropie de Shannon

L'entropie de Shannon (Shannon, 1948) est une fonction mathématique qui permet de mesurer la quantité d'informations contenue dans une source d'informations. Cette source peut être un texte écrit dans une langue donnée, un signal électrique ou encore un fichier informatique quelconque...

#### Définition de l'entropie

L'entropie de Shannon est définie dans (Shannon, 1948) comme suit :

$$H(S) = - \sum_{i=1}^n P_i \log P_i \quad (4.1)$$

$P_i$  est la probabilité moyenne de voir apparaître le symbole  $i$  dans  $S$ .

#### Propriétés formelles de l'entropie de Shannon

Deux propriétés nous intéressent dans la théorie de l'entropie :

- La minimalité : une distribution « pure » (un seul symbole) a une entropie nulle : si un seul symbole est représenté, l'impureté est nulle. On a donc une première condition de minimalité : l'entropie d'une distribution est nulle si cette distribution est pure.

$$\begin{aligned} H([, , 1, ]) &= - \sum_{i=1}^5 P_i \log P_i \\ &= -(0.\log 0 + 0.\log 0 + 0.\log 0 + 1.\log 1 + 0.\log 0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

- La maximalité : une distribution mélangée est « impure », la valeur de l'entropie, lorsque plusieurs symboles sont représentés, doit donc être élevée. C'est la condition de maximalité : l'entropie d'une distribution est maximale lorsque tous les symboles sont représentés dans les mêmes proportions.

## Principes de l'entropie maximale

Les deux principes de maximisation d'entropie de Jaynes (Jaynes, 1957) sont les suivants :

- Principe d'assignation des probabilités à une distribution lorsque nous ne disposons pas d'informations complètes sur elle ;
- De toutes les distributions de probabilité qui satisfont les contraintes, choisir celle qui présente l'entropie maximale au sens de Shannon (Shannon, 1948).

Chandrasekaran (Chandrasekaran et al., 2007) utilise ce 2<sup>ème</sup> principe pour la sélection de modèles, ainsi que (Arminjon and Imbault, 2000) pour construire des modèles de plus en plus précis simplement en rajoutant de l'information.

## Notion de filtre entropique

Les valeurs extrêmes de l'entropie peuvent perturber le calcul de l'entropie moyenne d'un modèle. Il est donc préférable d'éliminer ces valeurs pour ce calcul (Quinlan, 1979). Afin d'évaluer au plus juste les modèles, nous proposons donc d'éliminer les symboles totalement discriminés d'entropie nulle et les symboles à large spectre où l'entropie est maximale.

## Information mutuelle

En considérant deux variables aléatoires  $X$  et  $Y$  (ou une deuxième source), on peut définir la notion d'information mutuelle. Dans le cas discret :

$$I_M(X, Y) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M P(x_i, y_j) \log_2 \left( \frac{P(x_i, y_j)}{P(x_i)P(y_j)} \right) \quad (4.2)$$

$I_M(X, Y) = 0$  si  $X$  et  $Y$  sont des variables aléatoires indépendantes.

### 4.1.2.2 Critères d'Akaike et de Bayes

#### Maximum de vraisemblance

Pour un modèle statistique  $P_\mu$  donné, et étant donné la séquence d'observations  $X$ , la probabilité de son apparition suivant  $P$  peut être mesurée par  $f(X, \mu)$  qui représente la densité de  $X$  où  $\mu$  apparaît. Puisque  $\mu$  est inconnue, il semble alors naturel de favoriser les valeurs de  $\mu$  pour lesquelles  $f(X, \mu)$  est élevée : c'est la notion de la *vraisemblance* de  $\mu$  pour l'observation  $X$ , sous la condition d'indépendance des observations.

- Expression de la vraisemblance  $V$  :

$$V(x_1, \dots, x_n; \mu) = \prod_{i=1}^n f(x_i; \mu) \quad (4.3)$$

$\mu$  est l'espérance mathématique des  $x_i$ .

- Le maximum de vraisemblance :

$$\hat{V}(x_1, \dots, x_n; \mu) \quad (4.4)$$

Une transformation strictement croissante ne change pas l'abscisse d'un maximum. Le maximum de  $\mu$  peut donc aussi s'écrire :

$$\max_{\mu} (\log(V(x_1, \dots, x_n; \mu))) \quad (4.5)$$

$$\max_{\mu} (\log(V(x_1, \dots, x_n; \mu))) = \max_{\mu} (\sum_{i=1}^n \log(f(x_i; \mu))) \quad (4.6)$$

- Pour un échantillon discret :

$$f(x_i; \mu) = P_{\mu}(X = x_i) \quad (4.7)$$

$P_{\mu}(X = x_i)$  représente la probabilité discrète où  $\mu$  apparaît.

Maximum de vraisemblance pour un échantillon discret :

$$\log(V(x_1, \dots, x_n; \mu)) = \sum_{i=1}^n \log(P_{\mu}(x_i)) \quad (4.8)$$

Dans le cas des modèles de Markov cachés, nous utiliserons la variable forward (Rabiner, 1989).

$$\alpha_t(i) = P(O_1, O_2, \dots, O_t, q_t = S_i | \lambda) \quad (4.9)$$

Cette variable exprime la probabilité d'une séquence partielle  $O_1, O_2, \dots, O_t$  jusqu'à l'instant  $t$  avec l'état  $S_i$  à l'instant  $t$ , sachant le modèle  $\lambda$ .

La probabilité ou la vraisemblance  $P(O|\lambda)$  s'obtient en sommant les  $\alpha_T(i)$

$$P(O|\lambda) = \sum_{i=1}^N \alpha_T(i) \quad (4.10)$$

Les critères que nous utilisons consistent à mesurer l'écart entre la vraisemblance et un terme de pénalité, image des degrés de liberté de la modélisation considérée.

### Akaike Information Criterion (AIC)

$$AIC = -2 \cdot \ln V + 2k \quad (4.11)$$

où  $k$  est le nombre de paramètres,  $2k$  représente la pénalité,  $V$  est la vraisemblance.

Plus la valeur du critère d'Akaïke est faible, plus le modèle est pertinent. Le critère AIC pénalise les modèles comportant trop de variables et évite le sur-apprentissage. Hurvich et Tsai (Hurvich and Tsai, 1989) préconisent d'utiliser le critère AIC corrigé lorsque le nombre de paramètres  $k$  est grand par rapport au nombre d'observations  $n$ . Si  $\frac{n}{k} < 40$ .

$$AIC_c = AIC + \frac{2.k.(k+1)}{n-k-1} \quad (4.12)$$

Ce critère est souvent présenté avec celui de Schwarz : le BIC, qui pénalise davantage le sur-paramétrage. Le BIC a été introduit par Schwarz (Schwarz, 1978).

### **Bayesian Information Criterion (BIC)**

$$BIC = -2. \ln V + k. \ln n \quad (4.13)$$

où  $k$  est le nombre de paramètres libres du modèle de Markov,  $n$  le nombre de données,  $k. \ln n$  est le terme de pénalité.

Selon (Lebarbier and Mary-Huard, 2004), choisir entre le critère AIC et le critère BIC revient à choisir entre un modèle prédictif et un modèle explicatif. En pratique, la pénalité de BIC en  $\log(n)$  favorise le choix de modèles sous-ajustés. Le comportement des deux critères est fortement lié à la taille des échantillons.

## **4.2 Optimisation de jeux de symboles**

### **4.2.1 Choix de graphèmes par l'entropie de Shannon**

Comme nous l'avons évoqué au §3.1.2, la notion de graphèmes est directement liée à la façon dont sont extraits les tracés (Figure 3-3). Ce sont les points d'ancrage entre la ligne médiane et le tracé du mot (Figure 3-2) qui vont définir de manière implicite la segmentation du mot en graphèmes.

Les graphèmes « bruts » sont l'ensemble de toutes les combinaisons observées de tracés sur une base de données réelles (Avila, 1996). Le nombre de ces combinaisons est trop important pour utiliser, directement, les graphèmes « bruts » comme partie visible d'une modélisation markovienne. L'objectif est de coder les graphèmes « bruts » afin de réduire le nombre de codes permettant de représenter les mots. Ces codes doivent permettre d'avoir des descriptions similaires pour les différentes écritures d'un mot. De plus, plus le nombre de codes sera réduit, plus les modèles seront de taille réduite et capables de se généraliser.

Ce que nous voulons c'est :

- Stabiliser la description du mot sous forme de séquences de graphèmes,
- Réduire le nombre de graphèmes.

La méthode présentée permet la construction d'un alphabet de graphèmes utilisant seulement des critères entropiques pour valider les choix de fusion entre graphèmes.

Les graphèmes sont représentés par un vecteur de 12 éléments binaires où chaque élément représente la présence ou l'absence du tracé correspondant (Figure 4-3). La signification des tracés est donnée dans le Tableau 4-1. Les traits ou tracés identiques multiples issus d'un même point d'ancrage sont filtrés pour n'en retenir qu'un.

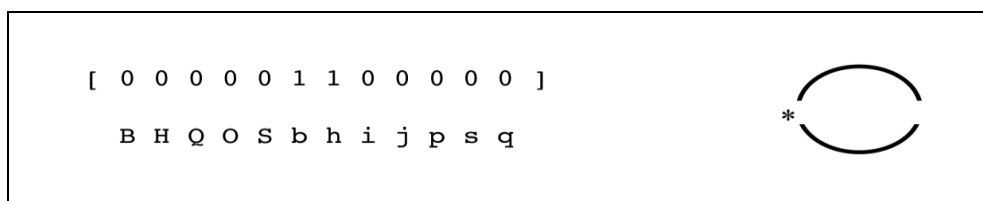


Figure 4-3 : Exemple de codage d'un graphème.

code	signification
<b>b</b>	liaison basse
<b>B</b>	jambage avec liaison basse
<b>h</b>	liaison haute
<b>H</b>	hampe avec liaison haute
<b>Q</b>	jambage avec occlusion inférieure
<b>s</b>	trait supérieur
<b>q</b>	hampe avec occlusion supérieure
<b>j</b>	jambage
<b>p</b>	hampe
<b>O</b>	occlusion inférieure
<b>S</b>	occlusion supérieure
<b>i</b>	trait inférieur

Tableau 4-1 : Codage des tracés.

Sur l'exemple de la Figure 4-3, nous montrons le codage associé au graphème constitué d'une liaison haute ( h ) et d'une liaison basse ( b ). Les bits correspondants dans le vecteur sont mis à 1 tandis que tous les autres sont à 0.

Cette description permet de coder  $2^{12} = 4096$  graphèmes différents. En réalité, dans les données considérées, moins de 600 configurations différentes ont été observées sur la base d'apprentissage constituée de 39000 graphèmes environ.

Il faut répondre à un objectif de stabilité pour améliorer la robustesse face à la forte variabilité de l'écriture manuscrite et réduire la taille des modèles. Cette stabilité passe par une réduction du nombre des graphèmes. Cela consiste à supprimer toutes les configurations « exotiques » (1 seule apparition) mais pas seulement.

## Statistiques sur les graphèmes

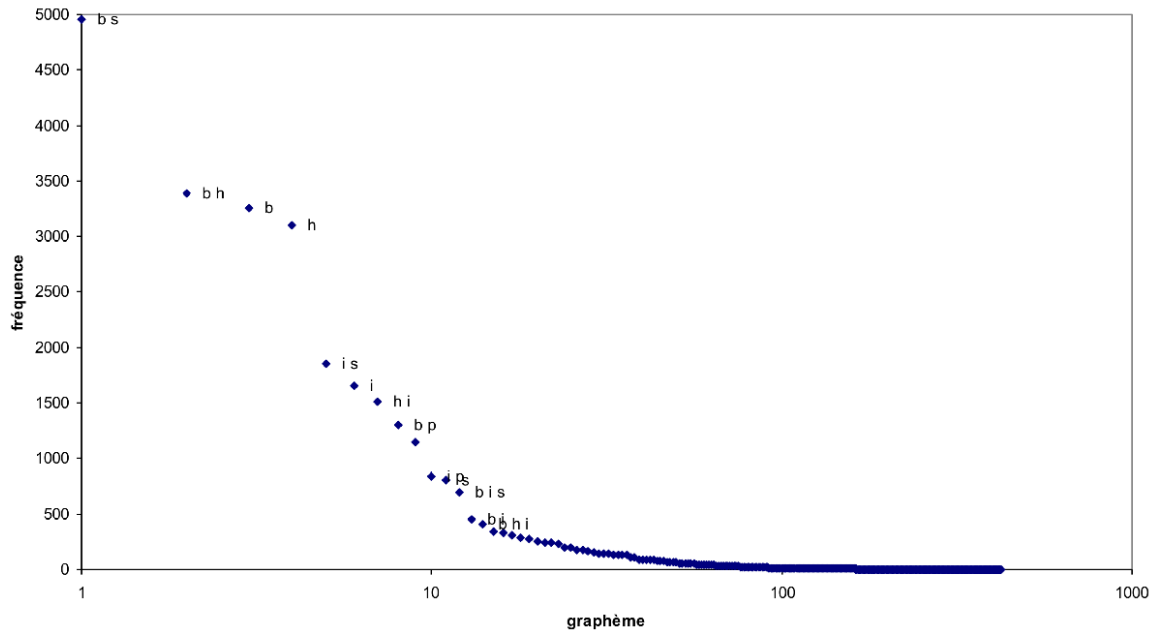




Figure 4-4 : Fréquence d'apparition des graphèmes bruts sur la base d'apprentissage.

Comme le montre la Figure 4-4, certains graphèmes sont très fréquents tandis que d'autres n'apparaissent qu'une fois. Par exemple, le graphème brut « bs » :  est le plus fréquent avec pratiquement 5000 apparitions. Le graphème brut « bis » :  ne possède qu'un trait supplémentaire et il est 10 fois moins présent dans la base d'apprentissage. Les graphèmes bruts qui n'apparaissent qu'une fois dans la base d'apprentissage ont en fait très peu de chance d'être rencontrés sur une autre base. Aussi, paraît-il judicieux de les associer à des graphèmes bruts plus fréquents, éventuellement en définissant un code (un graphème) qui représente les deux graphèmes bruts et en supposant que les graphèmes bruts peu fréquents sont des représentations bruitées de graphèmes bruts plus fréquents. Toutefois, ce codage ne doit pas réduire les qualités de l'alphabet.

Dans (Avila, 1996), plusieurs méthodes sont proposées pour obtenir un alphabet de graphèmes. La première méthode utilise la fréquence d'apparition des graphèmes bruts pour en retenir un nombre fixé puis une mesure de distance pour associer les moins fréquents à l'un de ceux retenus. Une deuxième méthode consiste à hiérarchiser les tracés pour générer des codes selon la présence ou non de certains tracés considérés arbitrairement plus importants. Dans cette partie, nous présentons plus particulièrement les alphabets qui ont été obtenus en utilisant l'entropie ou l'information mutuelle.

Dans ce cas, nous voulons évaluer la quantité d'information apportée par chacun des graphèmes sur les mots du vocabulaire des montants de chèques. En définissant la variable aléatoire



$G_k, G_k(\ll le\_mot \gg) = y$ , où  $y \in [0,1,2,3,4,5,6]$  représente le nombre d'apparitions du graphème  $k$  dans une épreuve du mot « le\_mot ». L'information apportée par le graphème  $k$  sur les mots sera donc :

$$I_M(M, G_k) = \sum_{i=0}^{26} \sum_{j=0}^6 P(M = M_i, G_k = j) \log_2 \left( \frac{P(M = M_i, G_k = j)}{P(M = M_i)P(G_k = j)} \right) \quad (4.14)$$

où  $M$  est la variable aléatoire mot.

Cette expression permet d'évaluer l'information apportée individuellement par chacun des graphèmes sur le problème d'identification des mots. Le Tableau 4-2 nous donne un aperçu des quantités d'information apportées par les 20 graphèmes « bruts » les plus informatifs. Ces informations ont été évaluées sur une base de mots d'apprentissage (Avila, 1996).

Graphème [ B H O Q S b h i j p q s ]	Information Mutuelle
[ 0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 0 ]	1.08084202e-01
[ 0 0 0 0 0 1 0 0 0 1 0 0 ]	6.87751770e-02
[ 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 1 ]	6.30500317e-02
[ 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 ]	6.10187054e-02
[ 0 0 0 0 0 1 0 0 1 0 0 0 ]	4.32631969e-02
[ 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1 0 1 ]	4.31199074e-02
[ 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1 0 0 ]	4.07855511e-02
[ 0 0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 ]	4.00629044e-02
[ 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 ]	3.96564007e-02
[ 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 ]	3.93006802e-02
[ 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 ]	3.79424095e-02
[ 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 1 ]	3.76176834e-02
[ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ]	3.39534283e-02
[ 0 0 0 0 0 1 1 1 0 0 0 0 ]	2.50160694e-02
[ 0 1 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 ]	2.44641304e-02
[ 0 0 0 0 0 1 0 0 1 1 0 0 ]	2.39899158e-02
[ 0 0 0 1 0 0 1 0 0 0 0 0 ]	2.22470760e-02
[ 0 0 0 0 0 1 0 0 1 0 0 1 ]	2.15289593e-02
[ 0 0 0 0 0 1 0 1 0 0 0 1 ]	2.03619003e-02
[ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 ]	1.98445320e-02

Tableau 4-2 : Information mutuelle  $I_M(M, G_k)$ , apportée par les 20 meilleurs graphèmes, évaluée sur la base de mots d'apprentissage (Avila, 1996).

#### 4.2.1.1 Alphabet hiérarchisé par entropie

A partir d'un premier alphabet hiérarchique (Avila, 1996), obtenu avec certains critères arbitraires, nous avons obtenu celui de la Figure 4-5.

<b>si</b> (p ou q ou H) et ( j ou q ou B )	<b>alors</b> 1	Dépassement haut et bas.
<b>sinon si</b> (p ou q ) et h	<b>alors</b> 2	Dépassement haut et liaison haute.
<b>sinon si</b> (p ou q ou H) et b	<b>alors</b> 3	Dépassement haut et liaison basse.
<b>sinon si</b> p ou q ou h	<b>alors</b> 4	Dépassement haut.
<b>sinon si</b> (j ou Q) et h et b	<b>alors</b> 5	Dépassement bas et liaisons haute et basse.
<b>sinon si</b> (j ou Q ou B) et h	<b>alors</b> 6	Dépassement bas et liaison haute.
<b>sinon si</b> (j ou Q ) et b	<b>alors</b> 7	Dépassement bas et liaison basse.
<b>sinon si</b> (j ou Q ou B)	<b>alors</b> 8	Dépassement bas.
<b>sinon si</b> h et b	<b>alors</b> 9	Liaisons haute et basse.
<b>sinon si</b> h et i	<b>alors</b> 10	Liaison haute et trait supérieur.
<b>sinon si</b> b et s	<b>alors</b> 11	Liaison basse et trait inférieur.
<b>sinon si</b> (O ou S) et i	<b>alors</b> 12	Petite occlusion et trait inférieur.
<b>sinon si</b> s et i	<b>alors</b> 13	Trait supérieur et inférieur.
<b>sinon</b>	<b>alors</b> 14	Autres cas.

Figure 4-5 : Alphabet hiérarchisé.

Des modifications ont été apportées, par rapport au premier alphabet, notamment en changeant l'ordre des lignes de l'algorithme. Certaines lignes ont été permutées dans l'algorithme en utilisant la mesure d'information mutuelle. Des tracés ont été ajoutés à certains graphèmes afin de mieux correspondre à une entité graphique. Les graphèmes 12 et 13 ont été modifiés pour ressembler à des formes proches du e (petite boucle et trait inférieur).

L'observation des quantités d'information apportées par les graphèmes de la première version a montré un déséquilibre entre ces quantités d'un graphème à l'autre. De manière générale, nous avons tenté de mieux répartir l'information sur les graphèmes en pensant qu'une meilleure répartition de l'information améliorerait la stabilité de l'alphabet.

Le Tableau 4-3 montre le changement dans les quantités d'information apportées par les graphèmes des deux versions de l'alphabet hiérarchisé lorsque l'information est évaluée sur les mots. Les valeurs en gras montrent les graphèmes qui ont gagné de l'information. Les valeurs en italique montrent ceux qui en ont perdu. Toutes les pertes d'information sont faibles devant l'apport et la répartition de l'information.

Graphème $G_k$	$I_M$ sur première version	$I_M$ sur deuxième version
1	2.20919e-01	2.20919e-01
2	1.40026e-01	<i>1.29571e-01</i>
3	2.57003e-02	<b>4.15857e-02</b>
4	1.24004e-01	<i>1.22958e-01</i>
5	2.01955e-02	<i>1.96650e-02</i>
6	6.54895e-02	<i>6.50225e-02</i>
7	5.63190e-02	<b>5.68495e-02</b>
8	1.10687e-01	<b>1.11048e-01</b>
9	2.04410e-01	2.04410e-01
10	1.04700e-01	<i>6.28016e-02</i>
11	2.53918e-01	<i>1.79609e-01</i>
12	1.78013e-02	<b>2.95074e-02</b>
13	9.51881e-02	<i>5.03845e-02</i>
14	4.86307e-02	<b>2.00506e-01</b>

 Tableau 4-3 : Quantités d'information  $I_M(M, G_k)$  évaluées sur la base de mots d'apprentissage.

Une analyse détaillée des mesures d'information évaluées sur les mots (Tableau 4-3), montre que les pertes d'information sont de l'ordre de -7% pour les graphèmes 2, 4, 5 et 6, de l'ordre de 30 à 50 % pour les graphèmes 10, 11 et 13. Ces pertes sont faibles devant l'apport d'information qui va jusqu'à 416% pour le graphème 14. L'apport d'information est de l'ordre de 50% pour les graphèmes 3 et 12 et de l'ordre de quelques % pour les graphèmes 7 et 8.

#### 4.2.1.2 *Alphabet « entropique »*

##### 4.2.1.2.1 *Problématique*

Dans cette partie, nous proposons une méthode fondée sur l'évaluation des quantités d'information apportées par les graphèmes sur les mots.

Le problème qu'il faut résoudre est le suivant : en partant de l'ensemble des graphèmes observés sur la base d'apprentissage, comment réduire ce nombre tout en gardant les qualités informatives des graphèmes ?

Le principe de réduction de l'alphabet de graphèmes par entropie est fondé sur l'émission/validation d'hypothèses à partir des mesures d'information mutuelle définies au paragraphe 4.1.2.1. L'algorithme suivant décrit les différentes étapes de la méthode de réduction que nous avons utilisées :

**Evaluer** l'information globale apportée par l'alphabet et par chaque graphème.

- 1- **Réduire** la taille de l'alphabet en réalisant N fusions.
- 2- **Evaluer** l'information globale apportée par l'alphabet réduit et par chaque graphème de l'alphabet réduit.
- 3- **Valider** les fusions correctes parmi les N fusions réalisées.
- 4- **Réduire** l'alphabet initial avec les fusions correctes.
- 5- **Evaluer** l'information globale apportée par l'alphabet réduit de l'étape 4 et par chaque graphème de l'alphabet réduit de l'étape 4.
- 6- **Si** la perte d'information globale est nulle ou faible **remplacer** l'alphabet initial.
- 7- **Retourner** en 1 tant que le nombre de graphèmes est trop important.

*Algorithme 4-1 : Réduction de l'alphabet de graphèmes par entropie.*

Les différents points de l'Algorithme 4-1 se décomposent ainsi :

4.2.1.2.2 La réduction

La phase de réduction se fait de la façon suivante :

**Faire** N fois :

1. **Choisir** deux graphèmes aléatoirement tels qu'ils soient différents de ceux déjà sélectionnés.
2. **Réduire** l'alphabet en tenant compte de la fusion des deux graphèmes.

Algorithme 4-2 : Phase de réduction.

La phase de réduction de l'Algorithme 4-2 peut réduire la taille de l'alphabet de plus de 1 graphème car la fusion des deux graphèmes peut correspondre à plusieurs graphèmes comme nous allons le montrer en présentant la méthode de fusion.

4.2.1.2.3 Fusion de 2 graphèmes

Les règles de fusion que nous avons adoptées sont les suivantes. Les fusions sont possibles si :

- Les deux graphèmes sont similaires au niveau des grands dépassements haut et bas. Cette règle est issue des résultats de la méthode hiérarchique. Elle traduit le fait que l'on donne plus d'importance aux grands dépassements pour utiliser un a priori sur la morphologie des caractères.
- Le nombre de traits différents n'est pas trop important.

La première règle se traduit par un opérateur OU entre certains traits composant le graphème. Nous avons utilisé 2 opérateurs OU différents. Le premier représenté par la lettre V correspond à l'opérateur OU sur les grands dépassements hauts ( p, H, q ). Le second représenté par la lettre W correspond à l'opérateur OU sur les grands dépassements bas ( B, Q, j ).

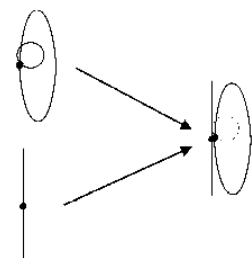
Par exemple, la fusion entre les deux graphèmes G<sub>1</sub> et G<sub>2</sub> :

$$G_1 = [ \mathbf{1} \ \mathbf{1} \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 ]$$

$$G_2 = [ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \mathbf{1} \ \mathbf{1} \ 0 \ 0 ]$$

donnera le graphème G'<sub>1</sub> :

$$G'_1 = [ \mathbf{W} \ \mathbf{V} \ 0 \ 0 \ \mathbf{X} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \mathbf{W} \ \mathbf{V} \ 0 \ 0 ]$$



Nous rappelons la position des différents traits dans le vecteur représentant le graphème :

$$G_k = [ \mathbf{B} \mathbf{H} \mathbf{O} \mathbf{Q} \mathbf{S} \mathbf{b} \mathbf{h} \mathbf{i} \mathbf{j} \mathbf{p} \mathbf{q} \mathbf{s} ]$$

Les caractères en gras correspondent aux grands dépassements. Le  $\mathbf{X}$  correspond à un degré de liberté. En effet, pour les traits autres que les grands dépassements, la fusion se traduit par la possibilité d'avoir un degré de liberté à la place des traits différents.

#### 4.2.1.2.4 Validation des fusions correctes

Les fusions de graphèmes sont validées si :

$$\frac{I(M, G'_1)}{\max(I(M, G_1), I(M, G_2))} > \alpha \quad (4.15)$$

Autrement dit, si le rapport entre l'information du graphème fusionné et l'information du meilleur des 2 graphèmes avant fusion est supérieur au seuil fixé  $\alpha$ . La valeur de ce rapport est supérieure à 1 si la fusion apporte plus d'information que le meilleur des graphèmes avant fusion. Cette valeur est inférieure et proche de 1 lorsque la fusion apporte un peu moins d'information. Nous avons choisi  $\alpha = 1$ , ce qui interdit la perte d'information à la précision près des calculateurs.



#### 4.2.1.2.5 L'alphabet obtenu sur la base de mots

Le processus de réduction est itératif. Nous n'avons pas évalué le nombre de boucles réalisées pour parvenir à l'alphabet que nous présentons. Plusieurs processus de réduction ont été effectués, ceci afin de vérifier que les alphabets obtenus étaient cohérents. Tous ces processus ont été initialisés avec les graphèmes « bruts ». Les résultats montrent que l'algorithme converge vers une même solution.

Le Tableau 4-4 montre l'alphabet entropique final que nous avons retenu parmi ceux obtenus après différentes phases de réduction. Ce tableau donne également les quantités d'information évaluées sur la base de mots d'apprentissage déjà citée.

Indice	Graphème	I <sub>M</sub> évaluées sur les mots
	[ B H O Q S b h i j p q s ]	
0	[ O O X O X X X X O O O X ]	3.22351217e-01
1	[ W V X W O X X X W V V X ]	2.19865322e-01
2	[ O V X O X X X X O V V X ]	2.10161924e-01
3	[ W O X W X X X X W O O X ]	1.96439743e-01
4	[ W O O O 1 O X X W 1 O O ]	1.37424469e-03
5	[ 1 O O 1 1 1 1 O O 1 O O ]	5.57422638e-04
6	[ O O O O 1 O O O 1 1 O 1 ]	5.57422638e-04

Tableau 4-4 : Alphabet entropique obtenu sur la base de mots.

Sur le Tableau 4-4, nous voyons que les traits « H » :  et « q » :  sont confondus sur l'ensemble des 7 graphèmes. Ce qui correspond assez bien à une réalité sur l'écrit.

La méthode présentée permet de passer d'un jeu d'environ 600 graphèmes à un codage réduit à 6 graphèmes en ayant conservé une quantité d'information similaire. Ce nombre peut également être comparé à ceux des autres alphabets : 59 pour les plus fréquents et 15 pour les graphèmes hiérarchiques.

#### 4.2.2 Comparaison des résultats obtenus

Les résultats fournis dans cette partie ont été extraits de (Avila, 1996). Nous utiliserons, en guise de référence, les résultats obtenus avec l'alphabet « des k plus fréquents » évoqué au paragraphe 4.2.1. Nous avons calculé les différents critères d'information évoqués au paragraphe 4.1.2.2 en considérant des modèles de Markov pour des ordres allant de 1 à 3 (prise en compte de 1 à 3 états précédents).

Les Tableau 4-5 et Tableau 4-6 donnent respectivement les résultats des critères et les taux obtenus pour des ordres allant de 1 à 3. TOP n signifie que la réponse se trouve dans les n premières solutions.

ordre	AIC	BIC
<b>1</b>	<b>116732.73</b>	<b>126069.38</b>
2	488298.94	2219161.73
3	23882718.21	126003622.98

Tableau 4-5 : Résultats des critères d'information pour « les k plus fréquents ».

TOP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Taux ordre 1</b>	42.95	56.11	64.58	71.30	76.34	79.74	82.40	84.15	86.12	87.71
<b>Taux ordre 2</b>	48.32	<b>62.74</b>	<b>70.25</b>	<b>75.16</b>	<b>79.43</b>	<b>82.13</b>	<b>84.52</b>	<b>86.28</b>	<b>88.03</b>	<b>89.25</b>
<b>Taux ordre 3</b>	<b>48.37</b>	61.06	68.94	74.32	77.67	80.39	82.60	84.29	85.83	86.92

Tableau 4-6 : Taux de reconnaissance de l'ordre 1 à 3 pour « les k plus fréquents ».

Dans le Tableau 4-5, nous voyons (en gras) que tous les critères donnent l'ordre 1 comme étant l'ordre optimal. Dans le Tableau 4-6, nous voyons que l'ordre qui donne les meilleurs résultats est l'ordre 2. L'ordre 3 fournit de meilleurs résultats en premier choix mais avec un écart très faible par rapport à l'ordre 2.

#### 4.2.2.1 Résultats des graphèmes hiérarchisés entropiques

Les résultats présentés dans ce paragraphe ont été obtenus en utilisant l'alphabet hiérarchisé entropique décrit au paragraphe 4.2.1.1. Cet alphabet comporte 14 graphèmes.

Les Tableau 4-7 et Tableau 4-8 donnent respectivement les résultats des critères et les taux obtenus pour des ordres allant de 1 à 3.

<b>ordre</b>	<b>AIC</b>	<b>BIC</b>
<b>1</b>	104472.26	<b>106272.58</b>
<b>2</b>	<b>93386.41</b>	120391.23
<b>3</b>	162631.21	567703.41

Tableau 4-7 : Résultats des critères d'information.

<b>TOP</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b>Taux ordre 1</b>	<b>50.22</b>	<b>62.49</b>	<b>69.38</b>	<b>74.14</b>	<b>77.68</b>	<b>80.49</b>	<b>82.69</b>	<b>85.10</b>	<b>87.04</b>	<b>88.70</b>
<b>Taux ordre 2</b>	48.28	61.27	68.78	73.23	76.54	79.03	81.36	83.13	84.39	85.68
<b>Taux ordre 3</b>	43.92	55.61	60.90	63.91	65.72	66.73	67.74	68.47	69.11	69.42

Tableau 4-8 : Taux de reconnaissance de l'ordre 1 à 3.

Dans le Tableau 4-7, nous voyons (en gras) que le critère AIC donne 2 alors que le BIC donne 1. AIC, comme évoqué précédemment, est connu pour surparamétriser.

Dans le Tableau 4-8 nous voyons que l'ordre qui donne les meilleurs résultats est l'ordre 1. L'écart est faible entre l'ordre 1 et 2 mais les résultats montrent que l'ordre 3 est nettement moins bon.

La comparaison des résultats obtenus sur la détermination de l'ordre optimal et des résultats de reconnaissance montre une bonne adéquation. Par rapport à l'alphabet des plus fréquents, les termes de pénalisation sont d'un ordre raisonnable devant les termes de log-vraisemblance.

La comparaison avec les résultats de l'alphabet « des k plus fréquents » révèle une augmentation des résultats en TOP 1 puis une légère diminution à partir du TOP 2 (moins de 1%) mais pour un alphabet réduit d'un rapport 4 (15 graphèmes contre 59). De plus, ces très légères pertes sont largement compensées par la plus grande simplicité des modèles à l'ordre 1 contre des modèles à l'ordre 2 pour l'alphabet des plus fréquents.

#### 4.2.2.2 Résultats des graphèmes entropiques

Les résultats présentés dans ce paragraphe ont été obtenus en utilisant l'alphabet entropique décrit au paragraphe 4.2.1.2. Cet alphabet comporte 6 graphèmes. L'analyse des Tableau 4-9 et Tableau 4-10 donne des résultats contradictoires puisque l'ordre optimal déterminé par les critères d'information n'est pas celui observé par les tests de reconnaissance. En effet, le critère AIC donne l'ordre 2 et le BIC l'ordre 1 alors que les tests donnent un ordre 3 au moins. Des tests aux ordres supérieurs à 3 n'ont pas été effectués.

ordre	AIC	BIC
1	40757.93	<b>41529.49</b>
2	<b>37988.70</b>	45704.36
3	50345.86	127502.47

Tableau 4-9 : Résultats des critères d'information.

TOP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Taux ordre 1</b>	42.85	54.11	62.41	69.44	74.29	78.71	82.54	85.20	87.43	88.84
<b>Taux ordre 2</b>	48.19	61.38	70.17	75.58	79.67	82.74	85.05	86.93	88.52	90.12
<b>Taux ordre 3</b>	<b>49.48</b>	<b>64.01</b>	<b>71.83</b>	<b>76.89</b>	<b>80.67</b>	<b>84.12</b>	<b>86.20</b>	<b>87.87</b>	<b>89.12</b>	<b>90.44</b>

Tableau 4-10 : Taux de reconnaissance de l'ordre 1 à 3.

Avant de discuter d'une justification et d'une amélioration de ces résultats, remarquons la bonne tenue des taux de reconnaissance du Tableau 4-10 par rapport aux 2 alphabets précédents alors que nous avons réduit d'un facteur 5 ou 1,5 le nombre de graphèmes de l'alphabet : 6 graphèmes contre 59 ou 15. Le Tableau 4-11 montre la comparaison des taux obtenus par les 3 alphabets.

TOP	1	2	5
<b>Alphabet « k plus fréquents » à l'ordre 2</b>	48.32	62.74	79.43
<b>Alphabet hiérarchisé entropique à l'ordre 1</b>	<b>50.22</b>	62.49	77.68
<b>Alphabet entropique à l'ordre 3</b>	49.48	<b>64.01</b>	<b>80.67</b>

Tableau 4-11 : Comparaison des taux de reconnaissance.

Une réponse que nous pouvons donner à la différence entre l'ordre optimal estimé par les critères et les taux de reconnaissance pour les ordres correspondants est la suivante : le nombre d'observations à notre disposition est trop faible. En effet, sur la base d'apprentissage, nous observons environ 39000 graphèmes. Ce nombre peut être trop faible quand il s'agit d'apprendre des processus markoviens d'ordre 3 où le nombre de 4-uples est nécessairement plus réduit que dans le cas des 2-uples (bi-gramme) par exemple comme c'est le cas de l'alphabet hiérarchisé entropique.



## 4.3 Pertinence des symboles et comparaison de modèles

### 4.3.1 Modèle de synthèse

Afin de disposer de données fiables, dans le cadre de la thèse de B. Roblès (Roblès, 2013), nous avons créé un modèle de synthèse afin d'obtenir des données se rapprochant le plus possible d'un cas réel. En effet, ces données simulées vont nous permettre d'éprouver les architectures des modèles étudiés.

Nous présentons ici les différentes étapes de construction du modèle de synthèse :

- Une topologie,
- Une matrice de transition  $A$ ,
- Une matrice de distribution des observations  $B$  et une matrice d'initialisation  $\pi$ .

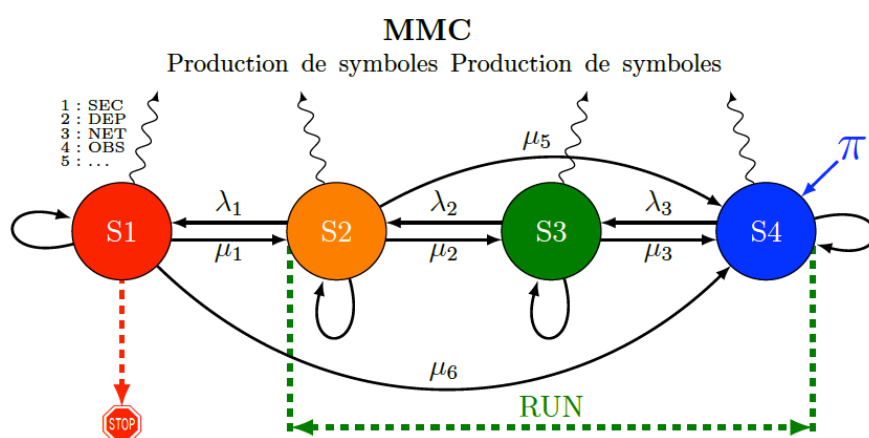


Figure 4-6 : Modèle de Markov caché à 4 états, référence du modèle de synthèse.

Pour la construction de ce modèle de synthèse, nous avons utilisé la structure du modèle décrit au paragraphe 3.2. Dans l'étude (Vrignat, 2010) plusieurs topologies avaient été mises en concurrence et l'une d'elles, celle de la Figure 4-6, avait été choisie car fournissant les « meilleurs » résultats. Nous avons opté pour cette topologie pour le modèle de synthèse qui constituera notre « vérité terrain » pour les essais.

La matrice  $A$  a été choisie en s'inspirant du cas évoqué au paragraphe 3.2. Les émissions de symboles suivent une distribution normale (Laplace – Gauss). Cette loi peut être une bonne représentation d'un système réel, car les symboles ont des poids différents.

Nous avons lancé des simulations afin de produire des séquences de 1000 observations. Ces 1000 données simulées correspondent aux observations que l'on trouve couramment dans une base de données de GMAO industrielle. Nous avons généré 11 séquences de symboles. A chaque séquence (enchaînement de symboles émis) correspond une signature qui reflète l'occurrence de chaque symbole dans la-dite séquence. Ceci est illustré par la Figure 4-7 qui montre la distribution

de chaque symbole pour chaque séquence. Remarque : chaque séquence est ponctuée par le symbole DEP (situation de dépannage). Le processus est arrêté dans une telle situation.

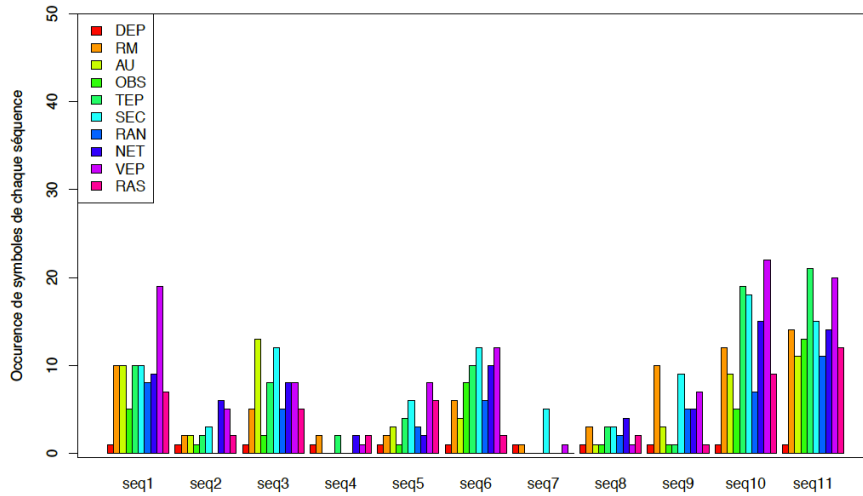


Figure 4-7 : Distribution des symboles pour chaque séquence.

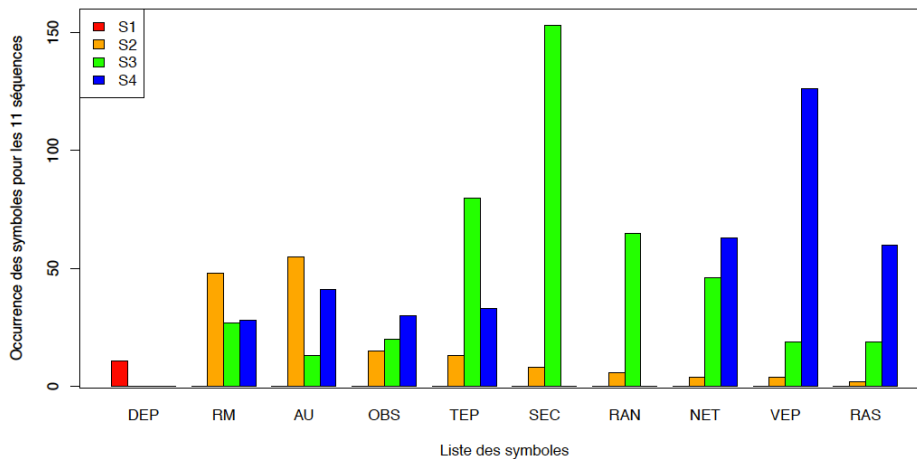


Figure 4-8 : Distribution des symboles par état du modèle de synthèse.

La Figure 4-8, représente la distribution des 10 symboles pour chaque état. Nous remarquons que le premier symbole n'est émis que par l'état S1 (symbole d'arrêt pour l'état de non fonctionnement). Nous remarquons aussi que l'état S1 n'émet aucun des 9 autres symboles. Cela correspond à la situation du cas réel qui a inspiré ce modèle (paragraphe 3.2).

Le modèle de synthèse permet de produire des séquences de symboles (Tableau 4-12) à partir de la topologie de la Figure 4-6. Ce modèle de synthèse produit également les couples (Etats, Observations : Figure 4-9) complètement définis qui serviront de référence (vérités terrains) pour les différents tests effectués par la suite.

TEP	TEP	SEC	TEP	TEP	RAS	RAS	DEP	AU	...
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	----	-----

Tableau 4-12 : Séquence d'un message issue des données de maintenance.

Avec ces symboles, nous allons pouvoir refaire l'étude de l'état de santé d'un système industriel (paragraphe 3.2). Cependant, ce modèle de synthèse nous permet de connaître avec précision les paramètres du modèle, notamment la topologie ayant servi à générer les symboles. A partir de ces séquences, nous allons pouvoir évaluer la pertinence et l'incertitude de chaque topologie candidate à la représentation du système simulé.

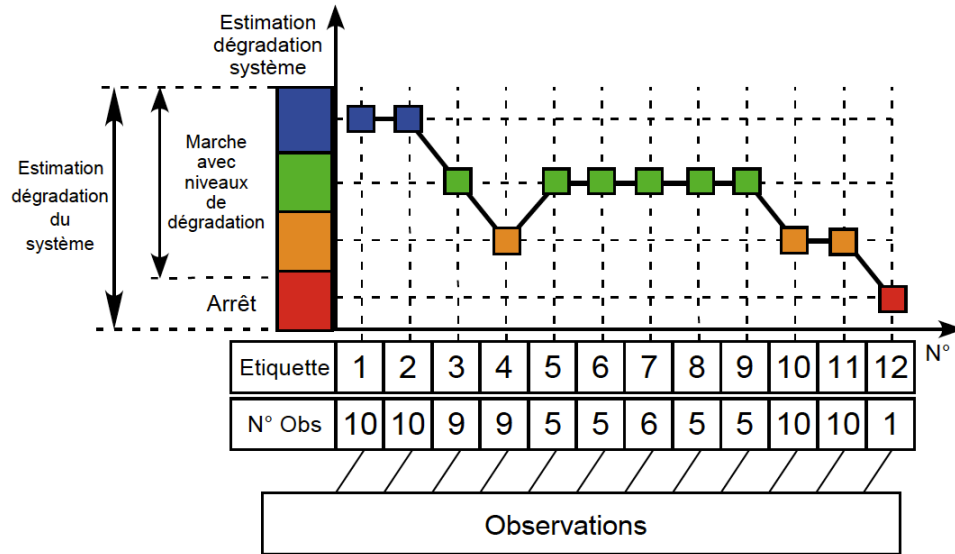


Figure 4-9 : Dégradation d'un processus ou d'un système.

### 4.3.2 Pertinence des symboles

Dans cette section, nous voulons déterminer les symboles ou les séquences de symboles les plus pertinents à partir de séquences d'observations issues du modèle de synthèse. Nous utilisons pour cela les principes de l'entropie de Shannon (4.1.2.1).

Les entropies de chaque symbole (chaîne de Markov d'ordre 1) sont calculées par rapport aux états S1, S2, S3 et S4 pour les séquences du modèle de synthèse. Nous établissons ainsi les entropies pour chaque symbole, en fonction des états du modèle.

Nous illustrons, dans le Tableau 4-13, les mesures d'entropie pour le modèle de synthèse.

Le Tableau 4-13 montre que le symbole « TEP » obtient une entropie maximale de 1,129. Ceci indique que ce symbole est le mieux réparti parmi les états du système. Nous remarquons aussi que l'entropie du symbole « DEP » est nulle. Ce symbole est donc totalement discriminé i.e. l'état S1 correspond toujours à l'émission de ce symbole (« DEP ») et uniquement de ce symbole.

Symboles	S1	S2	S3	S4	Total	Entropie
AU		18	49	38	105	1,0277
DEP	19				19	<b>0,000</b>
NET		23	46	41	110	1,077
OBS		19	43	43	105	1,036
RAN		24	48	35	107	1,064
RAS		22	43	47	112	1,082
RM		11	37	53	101	0,952
SEC		19	47	37	103	1,025
TEP		22	56	46	124	<b>1,129</b>
VEP		18	45	51	114	1,068

Tableau 4-13 : Mesure de l'entropie, données issues du modèle de synthèse.

Nous utilisons par la suite la notion de filtre entropique vue au §4.1.2.1 pour éliminer les symboles ayant une entropie nulle et ceux ayant une entropie maximale. Nous éliminons ainsi les deux symboles « DEP » et « TEP ».

Une fois les symboles précédents éliminés du processus d'évaluation, nous établissons un classement des symboles les plus pertinents par ordre d'entropie décroissante. Ainsi, si nous classons les symboles du plus pertinent au moins pertinent, nous obtenons la séquence suivante :

- RAS, NET, VEP, RAN, OBS, AU, SEC, RM

### 4.3.3 Pertinence du corpus d'apprentissage

Sans connaissance a priori, nous avons évalué les différentes séquences ou signatures par mesures de l'entropie de Shannon. Cette signature est considérée comme une chaîne de Markov cachée du 1<sup>er</sup> ordre. L'étude a consisté à calculer l'entropie moyenne des symboles en fonction de la longueur considérée de la séquence. Nous avons trouvé un maximum pour l'entropie à partir de séquences de 152 symboles (Figure 4-10) ainsi qu'une valeur asymptotique de l'entropie (la courbe est asymptotique au-delà de 200 symboles). Cela laisse supposer qu'à partir d'un certain nombre d'échantillons observés, l'apport d'information par les symboles suivants devient très faible voire nulle.

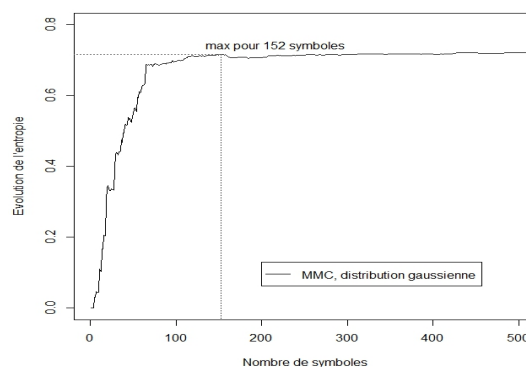


Figure 4-10 : Evolution de l'entropie suivant la longueur de la séquence.

### 4.3.3.1 Analyse sur une fenêtre glissante

Afin de valider l'hypothèse évoquée au paragraphe précédent, nous avons calculé l'entropie moyenne en utilisant une fenêtre d'échantillons. Nous avons opté pour une taille de fenêtre légèrement supérieure au nombre de symboles ayant permis d'atteindre le maximum d'entropie. Nous avons choisi une taille de fenêtre de 200 symboles. La Figure 4-11 montre l'évolution de l'entropie pour une fenêtre glissante de 200 symboles. Après la phase de démarrage de la séquence, on peut observer que la valeur de l'entropie se maintient à un niveau constant.

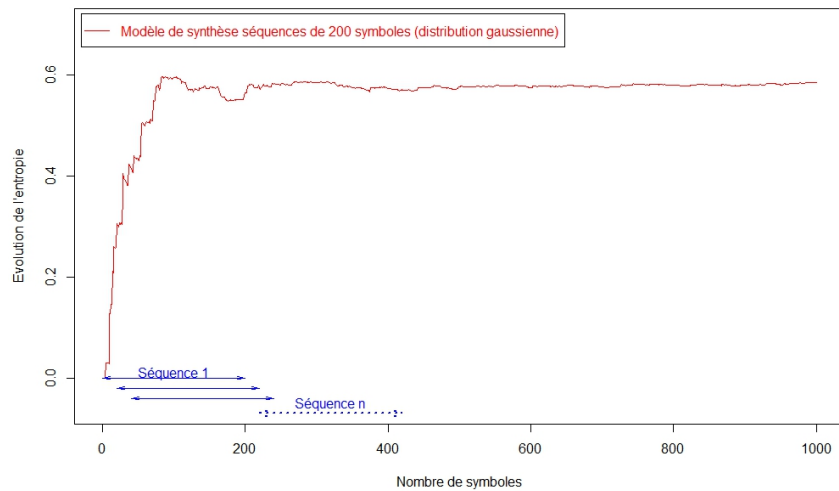


Figure 4-11 : Evolution de l'entropie suivant la position de la fenêtre glissante dans la séquence.

### 4.3.3.2 Discussion

La fenêtre glissante (Figure 4-11) contient le nombre minimal de symboles trouvés à partir de la Figure 4-10, où l'entropie est maximale. Tous les symboles à l'intérieur de cette fenêtre permettraient de réaliser régulièrement une estimation des modèles.

Si l'on considère la phase d'exploitation de l'indicateur de niveaux de dégradation, cela se traduira par la mise en place d'actions préventives de maintenance et ainsi, l'amélioration de l'état de santé du système. Les actions engagées vont modifier le comportement du système (le but étant de « retarder » la panne). Les événements qui ont permis d'apprendre les modèles ne seront donc plus à l'image du nouveau comportement. Les résultats avec la fenêtre glissante permettront de limiter l'historique nécessaire pour réapprendre le nouveau comportement (Figure 4-12).

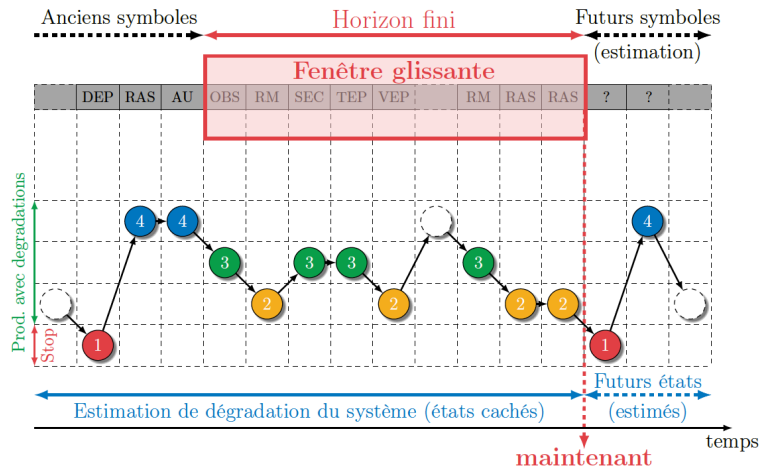


Figure 4-12 : Principe de la fenêtre glissante pour ré-estimer les modèles.

### 4.3.4 Comparaison de modèles

Le modèle de synthèse produit des 2-uplets (Symboles, Etats) de manière aléatoire avec la topologie considérée (Figure 4-6). La distribution des symboles est donnée par une loi normale. Des séquences sont donc produites. Ces séquences alimentent deux algorithmes d'apprentissage : l'algorithme Baum-Welch, décodage par Variables Forward et l'algorithme Segmental K-means, décodage par Viterbi. Trois topologies différentes sont considérées. Elles comportent plus ou moins de liaisons autorisées entre états. La stratégie de tests des différentes configurations est résumée sur la Figure 4-13. L'objectif est de comparer les capacités d'apprentissage de 3 topologies différentes avec 2 jeux d'algorithmes.

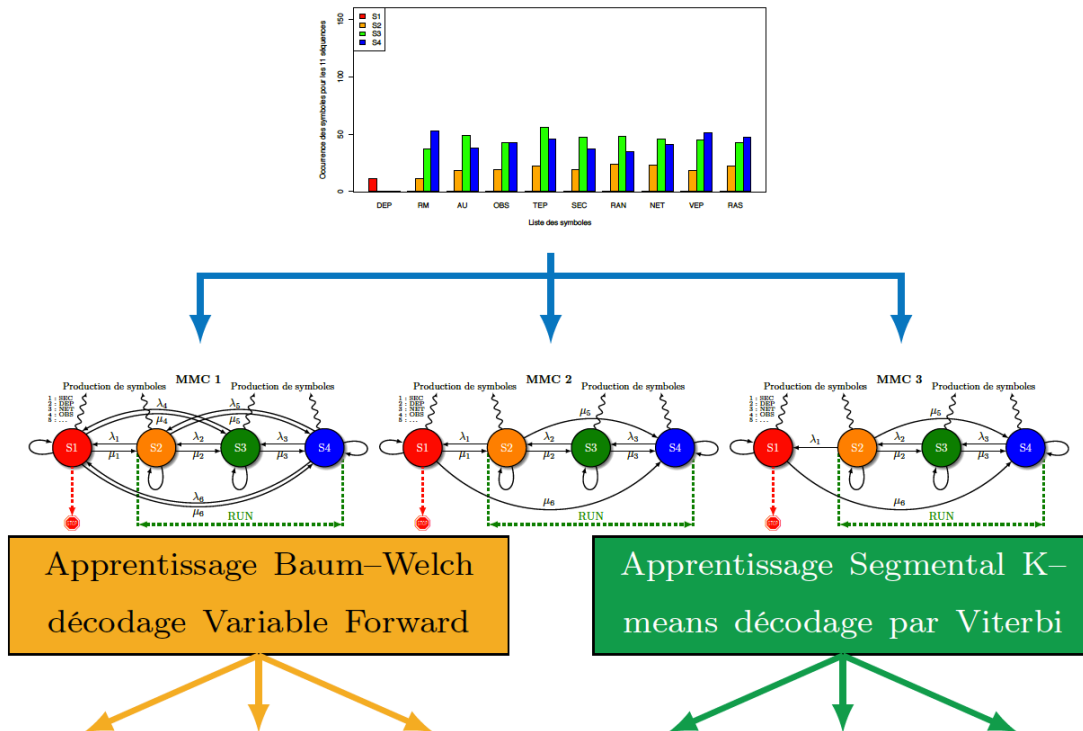


Figure 4-13 : Stratégie utilisée pour la comparaison de modèles et d'algorithmes d'apprentissage.

Nous allons donc évaluer la pertinence de la modélisation pour chaque architecture. Le terme architecture désigne l'ensemble des éléments qui composent le modèle i.e. la topologie et l'algorithme d'apprentissage.

#### 4.3.4.1 Entropie de Shannon

Sans connaissance a priori, nous calculons les entropies des différentes architectures étudiées. L'entropie de la Topologie 2, MMC 2, est significativement plus élevée que celles des autres topologies notamment avec l'algorithme d'apprentissage Baum-Welch décodage Variables Forward. Les résultats sont donnés dans le Tableau 4-14.

Topologie	Estimations	Entropie	Avec filtre entropique
1	Baum-Welch / Variables Forward	0,484	0,510
1	Segmental K-means / Viterbi	0,480	0,486
2	<b>Baum-Welch / Variables Forward</b>	1,215	<b>1,326</b>
2	Segmental K-means / Viterbi	1,216	1,225
3	Baum-Welch / Variables Forward	0,923	0,990
3	Segmental K-means / Viterbi	0,934	0,939

Tableau 4-14 : Entropie moyenne pour chaque topologie et chaque algorithme d'apprentissage.

#### 4.3.4.2 Maximum de vraisemblance

Le graphe de la Figure 4-14 montre que la topologie 2 est la plus pertinente en termes de vraisemblance, pour les 2 algorithmes d'apprentissage. Malheureusement, les valeurs de la vraisemblance sont trop proches pour déterminer le meilleur algorithme d'apprentissage.

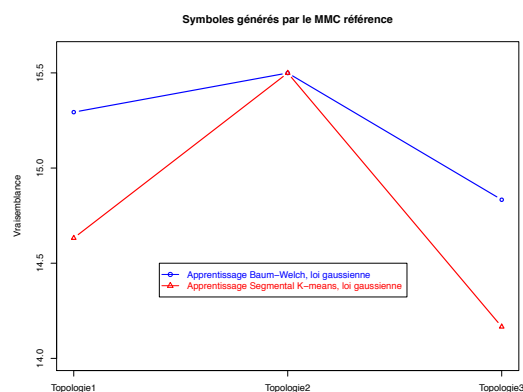


Figure 4-14 : Critère du maximum de vraisemblance.

### 4.3.4.3 Critères d'AIC et de BIC

Les résultats des critères d'AIC et de BIC sont donnés Figure 4-15. Nous arrivons à la même conclusion que celle du critère de vraisemblance. Les valeurs des critères sont au minimum pour la topologie 2. De même, il est difficile de départager les algorithmes utilisés.

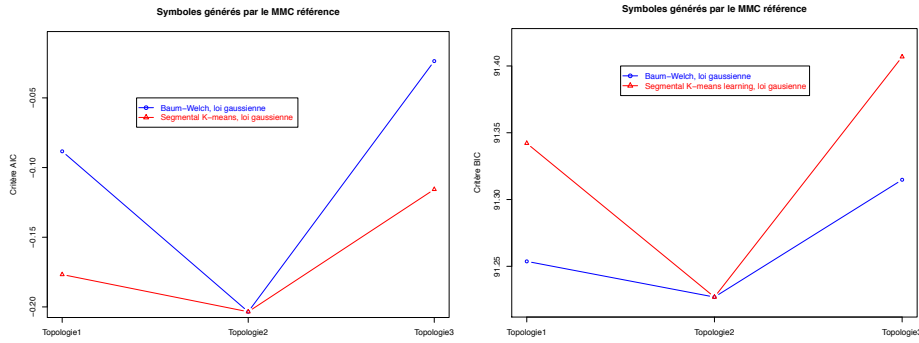


Figure 4-15 : Critères de AIC et de BIC.

### 4.3.4.4 Vérification avec d'autres modèles de synthèse

Afin de valider la concordance entre la topologie de référence utilisée par le processus de synthèse et la topologie la plus pertinente, nous avons vérifié le comportement des indicateurs avec d'autres modèles de synthèse. Nous avons suivi la même stratégie (Figure 4-13) que pour la topologie 2 en remplaçant celle-ci par respectivement la topologie 1 et 3.

Les résultats sont donnés Figure 4-16. Pour toutes les topologies étudiées, la topologie de référence se retrouve bien être la plus pertinente au sens des critères.

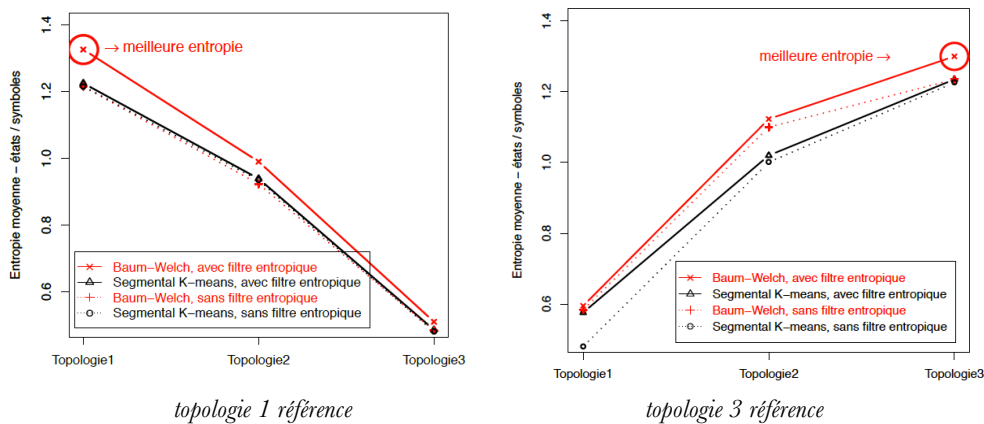


Figure 4-16 : Entropies de Shannon obtenues avec les topologies 1 et 3 comme référence respective.



### 4.3.5 Application sur des données réelles

#### 4.3.5.1 Systèmes industriels étudiés

Les données utilisées dans cette partie sont celles qui ont été utilisées dans (Vrignat, 2010). Le premier système est une peseuse volumétrique intégrée dans une ligne de production dans l'agroalimentaire. Le deuxième système est une presse basse pression d'un process industriel pour l'automobile. Ces différents processus de production sont maintenus par des politiques de maintenance préventive. Les agents de maintenance doivent consigner leurs actions ou observations dans une base de données centralisée (GMAO). Ces événements forment les séquences d'observations qui sont utilisées pour estimer les MMC. Les données récoltées sur 2 ans comprennent environ 2000 événements. Les symboles observés ont été codés et correspondent aux symboles générés par le modèle de synthèse.

Plusieurs topologies de MMC ont été utilisées pour apprendre les séquences de symboles récoltées sur les processus de production (Figure 4-17).

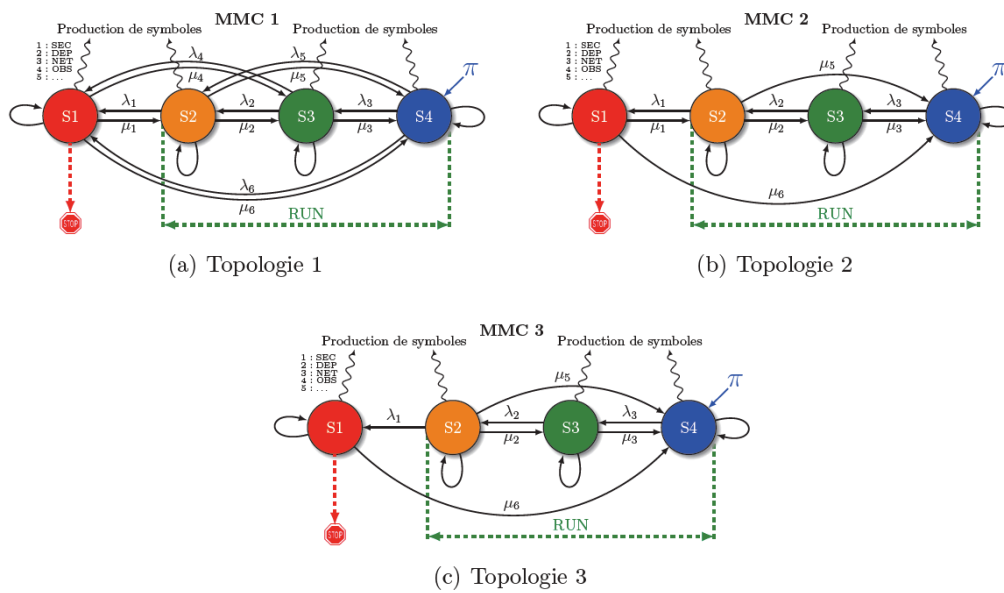


Figure 4-17 : Modèles de Markov Cachés, topologies à 4 états.

#### 4.3.5.2 Evolution de l'entropie

Les résultats de l'évolution de l'entropie de Shannon sont donnés Figure 4-18. Les valeurs maximales sont atteintes pour 160 et 180 symboles respectivement pour la presse et pour la peseuse. De plus, la figure montre que ces valeurs atteignent des valeurs asymptotiques comme nous avons pu l'observer pour le modèle de synthèse.

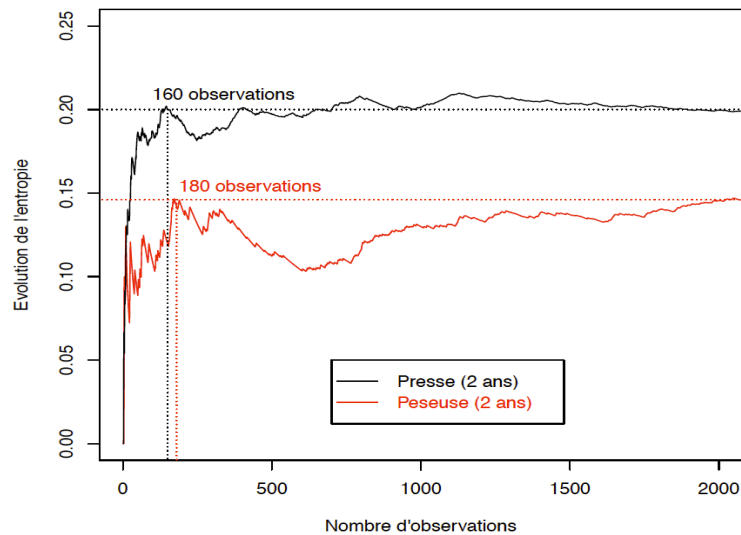


Figure 4-18 : Evolution de l'entropie suivant la longueur de la séquence.

#### 4.3.5.3 Ajustement du modèle de synthèse

Nous avons comparé le modèle de synthèse avec les données de maintenance issues de la peseuse du processus agroalimentaire (Tableau 4-15). Afin de n'utiliser que les symboles les plus pertinents, nous avons utilisé l'algorithme du filtre entropique (défini au §4.1.2.1). Les résultats d'adéquation avec un test de Kolmogorov-Smirnov (Robles, 2013) donnent 93,75% entre le modèle de synthèse et la peseuse. En réajustant quelques symboles sur le modèle de synthèse, le coefficient de corrélation entre les deux atteint 0,96.

Symboles	Peseuse	Densités des symboles	
		Modèle Gauss	Modèle Ajusté
AU	0,0769	0,0590	0,0590
OBS	0,0288	0,0150	0,0150
RAN	0,0288	0,0210	0,0210
RM	0,0385	0,0530	0,0530
SEC	0,0673	0,0760	0,1110
TEP	0,0922	0,0990	0,0760
VEP	0,1395	0,1110	0,0990
<b>Coef. Corrélation : Peseuse VS modèles</b>		0,7554	<b>0,9611</b>
<b>Kolmogorov-S : Peseuse VS modèles</b>		<b>93.75%</b>	<b>93.75%</b>

Tableau 4-15 : Comparaison du modèle de synthèse avec les données de la peseuse.

La production de symboles du modèle de synthèse ayant été réalisée de façon aléatoire, le rôle affecté à chaque symbole l'était également. A partir de l'observation de la répartition des densités de symboles (Figure 4-19), nous avons permuté les symboles suivants :

- TEP remplacé par SEC
- SEC remplacé par VEP
- VEP remplacé par TEP

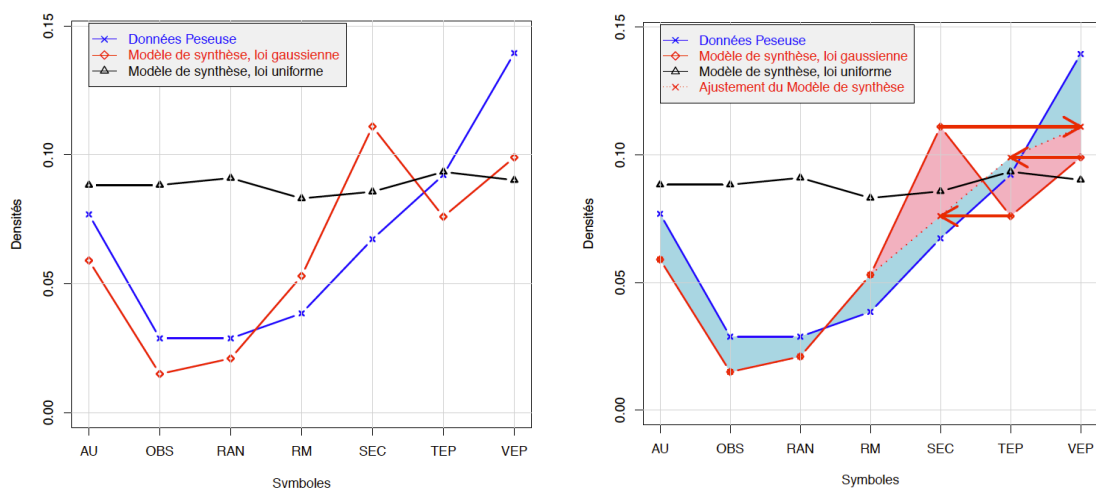


Figure 4-19 : Réajustement du modèle de synthèse par permutation de symboles.

Après cette réaffectation des symboles, nous disposons d'un modèle de synthèse plus proche de la réalité de terrain de la peseuse.

#### 4.3.5.4 Comparaison des différentes topologies sur la peseuse

Après réajustement des symboles du modèle de synthèse, nous comparons les données de la peseuse avec celles issues des trois topologies du nouveau modèle de synthèse (Tableau 4-16 et Figure 4-20). En comparant les densités des symboles des trois topologies avec celle de la peseuse, nous trouvons la topologie 2 comme celle étant la plus proche. De même, le coefficient de corrélation le plus élevé est pour la topologie 2. Nous pouvons donc en conclure que c'est la topologie 2 qui représente le mieux le système réel.

Symboles	Densités des symboles			
	Peseuse	Topologie 1	Topologie 2	Topologie 3
AU	0,0769	0,1137	0,0862	0,1027
OBS	0,0288	0,0339	0,0301	0,0341
RAN	0,0288	0,01756	0,0156	0,0244
RM	0,0385	0,0436	0,0489	0,0317
SEC	0,0673	0,0735	0,0604	0,0747
TEP	0,0922	0,0719	0,0843	0,0813
VEP	0,1395	0,0652	0,0907	0,0779
<b>Coef. Corrélation : Peseuse VS topologies</b>		<b>0,5631</b>	<b>0,8793</b>	0,7370

Tableau 4-16 : Comparaison des topologies après réajustement des symboles.

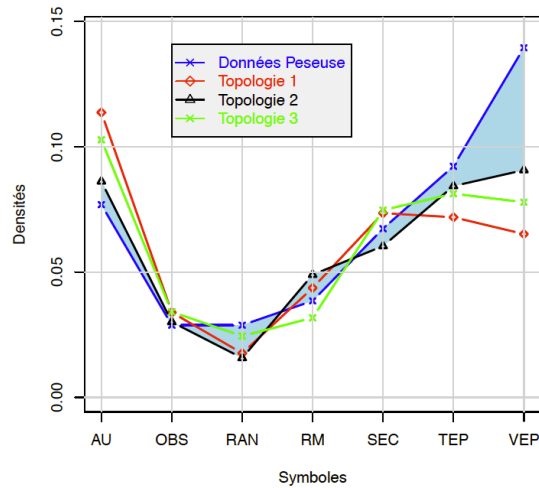


Figure 4-20 : Comparaison des topologies après réajustement des symboles.

## 4.4 Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons montré l'intérêt d'évaluer l'entropie des symboles (ou observations) utilisés par les MMC. Nous avons pu observer qu'il est possible de choisir et de réduire le nombre de symboles tout en conservant de bonnes performances pour les modèles. Nous avons également proposé une méthode de construction de jeux de symboles à partir de critères entropiques. Le jeu ainsi obtenu a permis de conserver de bonnes performances avec un nombre de symboles très réduits (6 symboles contre 15 ou 60).

Cette mesure d'entropie a permis également d'estimer la taille minimale de l'historique nécessaire pour permettre l'apprentissage des modèles. Nous avons obtenu également des résultats similaires sur le processus de presse basse pression présenté.

Dans la dernière partie de ce chapitre, les résultats obtenus montrent que l'entropie et les critères d'information sont capables de comparer différentes architectures de façon objective. Sur la base d'un modèle de synthèse parfaitement connu, sans connaissance a priori sur les modèles, les différents tests ont donné comme topologie la plus pertinente, la topologie du modèle de synthèse. Finalement sur une application réelle, pour laquelle la topologie n'est pas connue, les méthodes présentées permettent de déterminer la topologie la plus proche du comportement du système réel.

Ces résultats ont été obtenus dans le cadre de la thèse de B. Roblès (Roblès, 2013). Ils ont donné lieu à plusieurs présentations dans des conférences [C11-C14], [C16], [C32-C36], [C39-C40] ainsi qu'à un article [A3].

## Chapitre 5 - Projet de recherche

Les chapitres précédents présentent un résumé de nos activités de recherche essentiellement autour des modèles de Markov. Nous avons travaillé, également à Châteauroux, sur d'autres thèmes comme l'aide à l'expertise des chaussées ou l'aide à la conception de la commande de sièges d'avion.

La synthèse de ces activités de recherche a permis de mettre en valeur notre capacité à mettre en œuvre des modèles de Markov pour résoudre différents types de problèmes concrets. Cependant, cela suppose que dans le problème à résoudre il soit possible de collecter ou d'extraire des mesures (ou observations) qui contiennent une « signature » que les MMC soient capables d'assimiler. Dans la démarche de résolution de ces problèmes, nous avons tenté de nous placer dans de bonnes conditions pour que ces modèles produisent de bons résultats :

- Recherche de symboles optimaux pour alimenter les MMC,
- Tests et comparaisons de différentes topologies,
- Etude de l'influence des algorithmes d'apprentissage,
- Tests de modèles étendus aux MMC (flou, multi-flux, ...).

Ces travaux ont pu être réalisés grâce au soutien de professeurs du laboratoire PRISME, comme Y. Touré ou F. Kratz qui ont assuré la direction des thèses qui ont été soutenues à Châteauroux.

Cette Habilitation à Diriger des Recherches devrait me permettre de développer des sujets en lien avec l'expérience accumulée : l'utilisation de modèles de Markov et notamment l'optimisation des conditions d'usage de ces modèles.

Dans le cadre de mon doctorat, nous avons montré l'intérêt de mesurer la quantité d'information contenue dans les symboles utilisés pour alimenter les modèles de Markov. L'alphabet « entropique » que nous avons utilisé permettait d'améliorer l'efficacité de ces modèles. L'utilisation de critères d'information comme celui d'Akaike et de mesures d'information permet de qualifier de façon objective la qualité des modèles.

Dans le travail de B. Roblès, nous avons confirmé, à l'aide des critères d'information, que les modèles proposés dans les travaux de P. Vrignat n'avaient pas tous la même pertinence. Notamment grâce à un modèle de synthèse, parfaitement connu et maîtrisé, nous avons pu retrouver la « vraie » topologie du modèle ayant généré les séquences observées.

Le projet de recherche, présenté dans ce chapitre, est dans la continuité de ces activités.

## 5.1 Contribution au choix de modèles de Markov

Comme cela a été évoqué à plusieurs reprises dans ce document, les modèles de Markov ont la capacité de répondre à différentes situations. Cependant, la réponse apportée sera d'autant plus performante que les observations fournies aux modèles ont été correctement choisies. De plus, le choix de la structure du modèle influe également, de façon conséquente, sur le comportement des modèles.

Les pistes envisagées pour la suite de ces travaux sont les suivantes :

- **Améliorer les jeux de symboles** produits pour alimenter les MMC.

L'objectif est de pouvoir quantifier de façon objective, indépendamment du choix des MMC, la pertinence des symboles produits. Dans les travaux de T. Aggab, nous avons utilisé l'algorithme LBG (similaire au K plus proches voisins) pour passer du résidu au jeu de symboles permettant d'alimenter le MMC. Le choix retenu a simplement consisté à fixer le nombre de symboles souhaités.

Des mesures ont montré que la quantité d'information contenue par chaque symbole n'est pas la même. Une réflexion est en cours sur ce sujet. La suite de ce travail pourrait se formaliser en sujet d'étude pour un nouveau doctorant. Celui pourrait contribuer à développer une méthode générale permettant de :

- Découper de façon optimale une grandeur pour produire un jeu de symboles plus efficient (nombre de symboles, seuils utilisés...),
- Comparer des jeux de symboles, choisir les mesures les plus pertinentes sur un processus,
- Fusionner des symboles s'ils ne sont pas suffisamment complémentaires,
- « Découper » un symbole en plusieurs symboles si ce dernier ne semble pas suffisamment discriminant.

Ce travail pourra s'inspirer de l'algorithme de construction de l'alphabet de graphèmes par entropie. Le principe consisterait à fusionner des symboles si l'information apportée par la fusion est au moins égale à l'information apportée avant fusion. Une règle qui n'a pas été testée sur les graphèmes pourrait consister à « découper » un symbole en deux symboles en utilisant le même type de critère d'information.

- **Optimiser le choix des modèles.**

Tout comme il est primordial de disposer de symboles pertinents pour mettre en œuvre les MMC, le choix de la topologie du modèle et le nombre d'états choisi doivent être adaptés à la situation ou au système modélisé. Dans les travaux de B. Roblès, nous avons pu comparer plusieurs types de topologie pour modéliser le même système. Les critères AIC (Akaike) et BIC (Bayésien) ont été utilisés pour comparer de façon objective les comportements de ces topologies. La difficulté, pour la mise en œuvre de ces critères, réside dans l'estimation du terme de pénalité qui diffère pour chaque critère.

Un travail complémentaire semble nécessaire pour déterminer les bonnes conditions pour appliquer ces différents critères et pouvoir généraliser leur usage en fonction du système à modéliser.

## 5.2 Apprentissage de modèles de Markov

- **Améliorer la phase d'apprentissage** notamment dans le cas de problèmes à plusieurs classes.

Il existe plusieurs solutions algorithmiques pour la phase d'apprentissage des modèles de Markov. Classiquement, c'est l'algorithme de Baum-Welch qui est utilisé. L'algorithme de Viterbi, utilisé en général pour la recherche de la séquence d'états la plus probable, peut également être utilisé en phase d'apprentissage. Cela revient à incrémenter uniquement les transitions de la séquence la plus probable alors que l'algorithme de Baum-Welch considère l'ensemble des possibilités avec un coût en calcul bien supérieur. On trouve également des variantes qui utilisent les algorithmes génétiques ou bien l'algorithme des colonies de fourmis pour faire converger l'apprentissage vers un modèle optimal.

Cependant, dans le cas de problèmes à plusieurs classes (avec un modèle par classe), toutes ces méthodes n'utilisent, dans leur corpus d'apprentissage, que les séquences d'observations liées à leur classe. Le principe de ces méthodes d'apprentissage consiste à optimiser les paramètres de chaque MMC en ne considérant que les séquences de la classe considérée (Figure 5-1). Pour cet

exemple, l'apprentissage du modèle d'une classe ne prendra pas en compte les échantillons des autres classes.

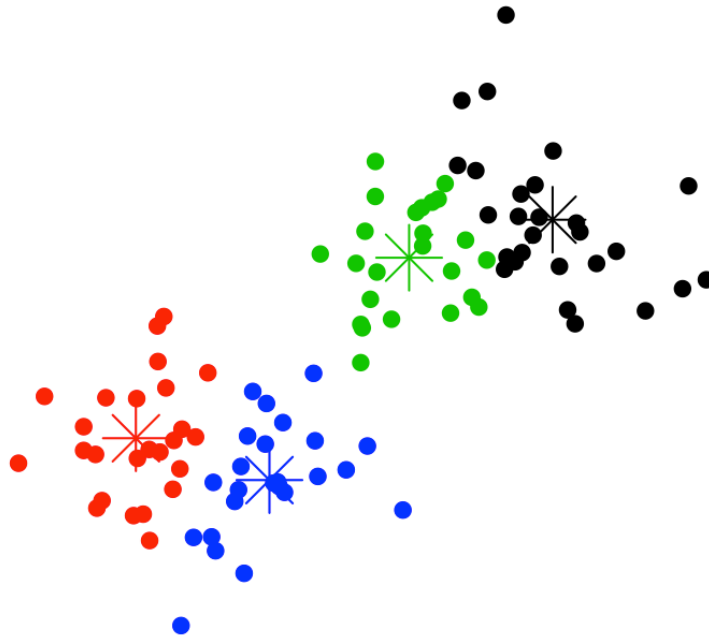


Figure 5-1 : Illustration d'un problème multi-classe.

L'objectif dans un problème à plusieurs classes est de déterminer à quelle classe appartient une nouvelle séquence d'observations. On cherche donc le modèle de la classe qui se rapproche le plus de cette séquence. On pourrait également chercher les classes qui « s'éloignent » le plus de cette séquence.

C'est cette idée que j'envisage d'approfondir pour améliorer la phase d'apprentissage pour les MMC multi-classes. Après quelques essais, j'ai obtenu des résultats intéressants en apprenant les « non-classes ». Les « non-modèles » sont appris en considérant uniquement les échantillons des autres classes. Les essais effectués ont montré qu'il était possible de classer les différents échantillons en utilisant les non-modèles.

Cette étude pourra faire l'objet d'un travail de thèse. Après avoir formalisé l'apprentissage des « non-classes », il faudra trouver une méthode permettant de fusionner ou de combiner, pour chaque classe, les deux modèles : le modèle et le « non-modèle ».



## 5.3 Financement des projets

En parallèle à ces futurs projets, nous travaillons sur le montage de projets (Région, ANR, FUI). Des échanges sont en cours avec différents partenaires sur des problématiques liées à l'Industrie du Futur.

Avec l'arrivée de l'Internet de Objets (IoT), un système, dans le futur (et déjà aujourd'hui), sera composé d'un ensemble de fonctions communiquant à l'aide d'Internet. La plupart de ces objets connectés, essentiellement pour des raisons économiques, ne peuvent intégrer de grandes capacités de calcul leur permettant d'intégrer des algorithmes avancés de sécurisation.

Notre contribution portera sur le développement de superviseurs capables de détecter les intrusions dites « intelligentes » ou les défauts en utilisant comme référence le comportement nominal du système. Cette étude a été initiée avec le projet SDF-IO, dans le cadre d'un APP de la Région Centre et nous continuerons dans cette voie.



## Conclusions et Perspectives

J'exerce depuis plus de vingt ans le métier d'enseignant-chercheur. J'ai effectué mes premiers pas universitaires en pédagogie et en recherche à l'Université de Rouen. Je n'étais qu'en DEA lorsque j'ai encadré mes premiers travaux pratiques avec des étudiants de DEUG. Les expériences pédagogiques ont été nombreuses et riches depuis ces premières séances où nous observions la diffraction de la lumière avec un goniomètre...

Le métier d'enseignant-chercheur mêle le métier de chercheur qui vise à répondre aux enjeux de la société de demain par l'accroissement du savoir avec le métier d'enseignant qui doit permettre aux jeunes générations de s'épanouir dans cette future société. Ce subtil mélange nous permet d'avoir des activités en constante évolution, qui doivent être validées par nos pairs notamment à travers la rédaction et la présentation de nos travaux. Les activités d'enseignement permettent d'être plus performant pour faire ces présentations. Ces deux activités sont pleinement complémentaires.

Depuis 1997, je suis chercheur au laboratoire PRISME et enseignant à l'IUT de l'Indre dans le département GEII, une structure à taille humaine. J'ai eu l'opportunité d'arriver dans les premières années de l'Institut. J'ai été rapidement impliqué dans la gestion des tâches administratives, le troisième métier de l'enseignant-chercheur. Nous avons travaillé, avec l'équipe en place, en considérant les intérêts pour notre structure. C'est dans ce cadre de travail que sont nées plusieurs vocations comme les engagements en thèse de Pascal Vrignat et de Bernard Roblès.

J'ai enseigné essentiellement au niveau licence (DUT et licence professionnelle) mais également en école d'ingénieurs. L'innovation pédagogique est très présente dans mon travail pour essayer de s'adapter aux évolutions des générations Y et Z, en attendant la suivante. Avec des collègues, nous sommes attachés au partage de ces expériences et nous proposons régulièrement nos travaux pédagogiques dans des conférences ou des revues. Nos expériences en pédagogie par projet ont été présentées au chapitre 2. Cette démarche, également qualifiée de pédagogie inversée, vise à placer les étudiants dans une phase active d'acquisition du savoir et des compétences. Nous tentons, dans l'équipe, de mettre en place ce type de pédagogie dans nos formations quand cela est possible.

Cette année, le cours de Supervision est en phase de réforme en s'appuyant sur ce type d'approche en considérant les scénarii nécessaires pour la mise en œuvre de l'industrie du futur.

Dans le chapitre 3, nous avons évoqué deux problématiques différentes. La première application consistait à lire de manière automatique du texte manuscrit. L'application visée, la lecture des montants littéraux de chèques, est un peu particulière puisque le lexique utilisé est réduit à quelques dizaines de mots. La deuxième application se situe dans le contexte de l'industrie du futur et notamment la possibilité d'améliorer la gestion de la maintenance de systèmes industriels. Pour ce faire, nous proposons des outils de diagnostic et de pronostic de systèmes complexes. Dans ce chapitre, nous avons montré que les modèles de Markov sont capables d'apporter des réponses pertinentes à des problèmes assez différents.

Dans une première partie de ce chapitre, nous avons montré que les modèles de Markov permettent de représenter différents niveaux de connaissance disponibles. Il est possible de prendre en compte les statistiques d'enchaînement des mots, des lettres ou des graphèmes à l'aide de différentes modélisations markoviennes. Plusieurs stratégies de classification ont été envisagées. Par exemple, un modèle unique peut produire des mots ou des phrases. Dans ce cas, les solutions proposées par le modèle sont les états traversés le long du chemin parcouru, comme pour le modèle de la phrase. Mais il est possible également de mettre en concurrence plusieurs modèles et de comparer la vraisemblance de chacun de ces modèles, comme c'est le cas pour les modèles de mots que nous essayons d'associer à une séquence de graphèmes.

Dans une seconde partie, nous avons montré qu'il était possible de mesurer le niveau de dégradation de systèmes industriels à l'aide des historiques disponibles sur le processus ou à l'aide de mesures. La démarche s'appuie sur une topologie particulière de modèle de Markov cachés à 4 états représentant le niveau de dégradation. Cette structure de modèle a permis d'estimer l'évolution de l'état de santé d'une machine sur une ligne agroalimentaire en utilisant l'historique des actions de maintenance de la machine. Pour le deuxième exemple, nous avons simulé un processus de pompage avec écoulements dans deux cuves. L'avantage de la simulation est de permettre de disposer des informations précises sur la dégradation. Sur la base d'une modélisation fondée sur les résidus, les modèles de Markov ont également permis de suivre l'évolution du niveau de dégradation du système.

Dans une dernière partie, le comportement asymptotique des modèles de Markov a été utilisé afin d'estimer la durée de vie résiduelle des systèmes. Cette dernière partie est le complément indispensable pour permettre à un expert chargé de planifier les actions de maintenance de programmer celles-ci de façon optimale.

Ce chapitre 3 montre la capacité des modèles de Markov à s'adapter à différentes situations pour répondre efficacement aux problèmes posés dans la mesure où le système peut être caractérisé par une signature particulière. De même, les résultats seront d'autant plus pertinents que les observations utilisées sont correctement choisies ainsi que l'architecture du modèle.

L'optimisation de la structure des modèles et le choix des observations fontt l'objet du chapitre 4. Dans ce chapitre, nous avons présenté différents critères qui permettent de mesurer objectivement la qualité des observations ou la pertinence des modèles. Dans une première partie, nous avons montré qu'il est possible d'améliorer les observations utilisées à l'aide de mesures d'entropie. Sur le problème de l'écrit, l'alphabet de graphèmes, construit à l'aide de critères entropiques et ne comportant que 6 graphèmes, permet d'obtenir des résultats comparables à des alphabets composés de 15 ou 60 graphèmes.

L'étude de l'évolution de la mesure d'entropie, suivant la taille de la séquence disponible pour la phase d'apprentissage, a montré que cette quantité d'information converge vers un maximum. Cela laisse supposer qu'à partir d'une certaine taille de séquence, l'information supplémentaire apportée n'est plus significative. Il est donc possible d'estimer la taille minimale des séquences utilisées pour la phase d'apprentissage.

La dernière partie du chapitre est consacrée à la comparaison de structures de modèles. A l'aide des différentes mesures proposées, il est possible de retrouver le modèle le plus proche du système modélisé. Pour valider la méthode, nous avons construit un modèle de synthèse pour produire des séquences de symboles. Nous avons caractérisé ces séquences de symboles avec différentes architectures de modèles de Markov ainsi qu'avec différents outils algorithmiques. Les critères utilisés ont permis de retrouver la structure originelle. La démarche est finalement utilisée pour trouver le modèle de comportement se rapprochant le plus d'un système réel.

La suite de nos travaux est présentée au dernier chapitre. Ce projet de recherche peut se scinder en deux sujets complémentaires. Le premier sujet concerne l'amélioration du codage des observations disponibles sur le système ou le processus. Nous avons pu montrer l'intérêt d'utiliser l'entropie pour comparer les différents symboles. De même, nous avons présenté un algorithme de construction de l'alphabet de graphèmes utilisant quelques règles simples comme la fusion de symboles et la validation de cette fusion par un critère entropique. La voie de recherche envisagée consistera à s'appuyer sur les résultats de cet algorithme mais en généralisant son usage à d'autres types de grandeurs utilisées pour produire des symboles. De nouvelles règles pourront être ajoutées comme par exemple la possibilité de scinder un symbole en deux ou plus.

Le second sujet porte sur une problématique liée aux méthodes d'apprentissage. Dans le cas de problèmes où plusieurs modèles de Markov sont mis en concurrence, les algorithmes classiques ne prennent pas en compte la totalité des données disponibles. En effet, l'apprentissage des modèles pour chaque classe s'effectue en ne considérant que les échantillons de la classe d'appartenance. Notre idée consiste à prendre en compte également la « non-classe », i.e., apprendre les caractéristiques des autres classes pour tenter de s'en éloigner.

Pour arriver à mener à bien ces projets, nous continuerons à proposer des actions de transfert de technologies auprès du tissu industriel local. C'est notamment à travers l'industrie du futur que vont se poursuivre ces actions.

## Références Bibliographiques

- Aggab, T. (2016). *Pronostic des systèmes complexes par l'utilisation conjointe de modèle de Markov caché et d'observateur*, Thèse de doctorat, Université d'Orléans.
- Arminjon, M., and Imbault, D. (2000). *Maximum entropy principle and texture formation*. *Z. Für Angew. Math. Mech.* 80, Suppl. N°1, pp. 13–16.
- Avila, M. (1996). *Optimisation de modeles markoviens pour la reconnaissance de l'écrit*, Thèse de doctorat, Université de Rouen
- Avila, M., Olivier, C., Paquet, T., and Lecourtier, Y. (1993). *Procédure de reconnaissance de l'écriture manuscrite, basée sur des chaînes de Markov cachées, et appliquée à un vocabulaire limité*. 14<sup>ème</sup> colloque GRETSI, (Juan les Pins), pp. 803–806.
- Baruah, P., and Chinnam, R.B. (2005). *HMMs for diagnostics and prognostics in machining processes*. *Int. J. Prod. Res.* 43, 1275–1293.
- Bary, M.N.A. (2016). *New frame for financial risk management by using hidden Markov models*. *Int. J. Contemp. Math. Sci.* 11, 437–454.
- Belaïd, A., and Saon, G. (1997). *Use of Markov processes in writing recognition*.
- Beven, K., and Binley, A. (1992). *The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction*. *Hydrol. Process.* 6, 279–298.
- Bewersdorff, J. (2004). *Luck, Logic, and White Lies: The Mathematics of Games* (Wellesley, Mass: A K Peters/CRC Press).
- Bideault, G., Mioulet, L., Chatelain, C., and Paquet, T. (2014). *A Hybrid CRF/HMM Approach for Handwriting Recognition*, ICIAR, pp. 403–410.
- Bunks, C., Mccarthy, D., and Al-Ani, T. (2000). *Condition-Based Maintenance of Machines using Hidden Markov Models*. *Mech. Syst. Signal Process.* 14, 597–612.
- Camci, F., and Chinnam, R.B. (2010). *Health-State Estimation and Prognostics in Machining Processes*. *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.* 7, 581–597.
- Casey, R.G., and Lecolinet, E. (1996). *A survey of methods and strategies in character segmentation*. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 18, 690–706.
- Chandrasekaran, V., Johnson, J.K., and Willsky, A.S. (2007). *Maximum Entropy Relaxation for Graphical Model Selection Given Inconsistent Statistics*. In 2007 IEEE/SP 14th Workshop on Statistical Signal Processing, pp. 625–629.
- Chen, M.-Y., Kundu, A., and Zhou, J. (1994). *Off-line handwritten word recognition using a hidden Markov model type stochastic network*. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 16, 481–496.
- Chinnam, R.B., and Baruah, P. (2003). *Autonomous diagnostics and prognostics through competitive learning driven HMM-based clustering*. In Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks, 2003., pp. 2466–2471 vol.4.
- Chouaid, C. (2004). *Utilisation de modèles de Markov en médecine*. *Rev. Mal. Respir.* 21, 1007–1009.
- Ding, S.X. (2008). *Model-based fault diagnosis techniques: design schemes, algorithms, and tools*, (Berlin: Springer).

- Ertunc, H.M., Loparo, K.A., and Ocak, H. (2001). *Tool wear condition monitoring in drilling operations using hidden Markov models (HMMs)*. Int. J. Mach. Tools Manuf. 41, 1363–1384.
- Frishkop, L.S., and Harmon, L.D. (1961). *Machine Reading of Cursive Script*. Inf. Theory Symp. 316–360.
- Gay, P. (2014). *Markov et la Belle au bois dormant*. Images Mathématiques CNRS.
- Giantomassi, A., Ferracuti, F., Benini, A., Ippoliti, G., Longhi, S., and Petrucci, A. (2011). *Hidden Markov Model for Health Estimation and Prognosis of Turbofan Engines*, Int Conf ASME/IEEE, 2011, 681–689.
- Gilloux, M., Leroux, M., and Bertille, J.-M. (1995). *Strategies for cursive script recognition using hidden Markov models*. Mach. Vis. Appl. 8, 197–205.
- Gimelec (2014). *Industrie 4.0 - Les leviers de la transformation*.
- Gouriveau, R., and Zerhouni, N. (2012). *Connexionist-Systems-Based Long Term Prediction Approaches for Prognostics*. IEEE Trans. Reliab. 61, 909–920.
- Hammouri, H., Kinnaert, M., and Yaagoubi, E.H.E. (1999). *Observer-based approach to fault detection and isolation for nonlinear systems*. IEEE Trans. Autom. Control 44, 1879–1884.
- Heutte, L. (1994). *Reconnaissance de caractères manuscrits : application à la lecture automatique des chèques et des enveloppes postales*. Thèse de doctorat. Université de Rouen.
- Hurvich, C.M., and Tsai, C.-L. (1989). *Regression and Time Series Model Selection in Small Samples*. Biometrika 76, 297.
- Iooss, B. (2011). *Revue sur l'analyse de sensibilité globale de modèles numériques*. J. Soc. Fr. Stat. 152, 1–23.
- Isermann, R. (1984). *Process fault detection based on modeling and estimation methods—A survey*. Automatica 20, 387–404.
- Javed, K., Gouriveau, R., and Zerhouni, N. (2017). *State of the art and taxonomy of prognostics approaches, trends of prognostics applications and open issues towards maturity at different technology readiness levels*. Mech. Syst. Signal Process. 94, 214–236.
- Jaynes, E.T. (1957). *Information Theory and Statistical Mechanics*. Phys. Rev. 106, 620–630.
- Kessentini, Y. (2009). *Modèles de Markov multi-flux pour la reconnaissance de l'écriture manuscrite multi-scripts*. Thèse de doctorat. Université de Rouen.
- Kwon, K.-C., and Kim, J.-H. (1999). *Accident identification in nuclear power plants using hidden Markov models*. Eng. Appl. Artif. Intell. 12, 491–501.
- Lebarbier, E., and Mary-Huard, T. (2004). *Le critère BIC : fondements théoriques et interprétation*, rapport de recherche, (INRIA).
- Lecolinet, E. (1990). *Segmentation d'images de mots manuscrits : application à la lecture de chaînes de caractères majuscules alphanumériques et à la lecture de l'écriture cursive*, Thèse de doctorat, Paris 6.
- Lethelier, E. (1996). *Combinaison des concepts de segmentation et de reconnaissance pour l'écriture manuscrite hors-ligne : application au traitement des montants numériques des chèques*, Thèse de doctorat, Université de Rouen.
- Li, Z., Wu, Z., He, Y., and Fulei, C. (2005). *Hidden Markov model-based fault diagnostics method in speed-up and speed-down process for rotating machinery*. Mech. Syst. Signal Process. 19, 329–339.
- Linde, Y., Buzo, A., and Gray, R. (1980). *An Algorithm for Vector Quantizer Design*. IEEE Trans. Commun. 28, 84–95.
- Lolas, S., Olatunbosun, O.A., Steward, D., and Buckingham, J. (2007). *Fuzzy Logic Knowledge Base Construction for a Reliability Improvement Expert System*. WCE 2007, July 2 - 4, 2007, London



- Lorette, G., Bercu, S., Menier, G., and Anquetil, E. (1994). *On-line cursive handwriting analysis and recognition: paradigm and systems*. In IEE European Workshop on Handwriting Analysis and Recognition: A European Perspective, pp. 15/1-15/8.
- Ministère de l'Écologie (2006). *Le renforcement de la politique de prévention des risques liés aux inondations*, Bretagne Environnement.
- Ministère de l'intérieur (2003). Plan vigipirates.
- Neuman, S.P. (2003). *Maximum likelihood Bayesian averaging of uncertain model predictions*. Stoch. Environ. Res. Risk Assess. 17, 291–305.
- Nguyen, D.N. (2015). *Contribution aux approches probabilistes pour le pronostic et la maintenance des systèmes contrôlés*. Thèse de doctorat. Troyes.
- Oommen, B.J., and Loke, R.K.S. (1997). *Pattern recognition of strings with substitutions, insertions, deletions and generalized transpositions*. Pattern Recognition 30, 789–800.
- Paquet, T., and Lecourtier, Y. (1993). *Recognition of handwritten sentences using a restricted lexicon*. Pattern Recognition 26, 391–407.
- Plötz, T., and Fink, G.A. (2009). *Markov models for offline handwriting recognition: a survey*. Int. J. Doc. Anal. Recognit. IJDAR 12, 269–298.
- Quinlan, J.R. (1979). *Discovering Rules by Induction from Large Collections of Examples*. Expert Syst. Micro Electron. Age.
- Rabi, M., Amrouch, M., and Mahani, Z. (2017). *A Survey of Contextual Handwritten Recognition Systems based HMMs for Cursive Arabic and Latin Script*. Int. J. Comput. Appl. 160, 31–37.
- Rabiner, L.R. (1989). *A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition*. Proc. IEEE 77, 257–286.
- Ribot, P. (2009). *Vers l'intégration diagnostic/pronostic pour la maintenance des systèmes complexes*. Thèse doctorat, Université de Toulouse Paul Sabatier.
- Robles, B. (2013). *Etude de la pertinence des paramètres stochastiques sur des modèles de Markov cachés*. Thèse doctorat, Université d'Orléans.
- Rosen, R. (1991). *Life Itself: A Comprehensive Inquiry Into the Nature, Origin, and Fabrication of Life* Columbia University Press.
- Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M., and Tarantola, S. (2007). *Global Sensitivity Analysis. The Primer*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd.
- Schwarz, G. (1978). *Estimating the Dimension of a Model*. Ann. Stat. 6, 461–464.
- Shannon, C.E. (1948). *A mathematical theory of communication*. Bell Syst. Tech. J. 27, 379–423.
- Soualhi, A., Clerc, G., Razik, H., and Ondel, O. (2011). *Detection of Induction Motor Faults by an Improved Artificial Ant Clustering*. In IECON, (Melbourne, Australia), pp. 3325–3330.
- Stidham, S., and Weber, R. (1993). *A survey of Markov decision models for control of networks of queues*. Queueing Syst. 13, 291–314.
- Thurston, M., and Lebold, M. (2001). *Open Standards for Condition-Based Maintenance and Prognostic Systems*. In 5th Annual Maintenance and Reliability Conference.
- Tobon-Mejia, D.A., Medjaher, K., Zerhouni, N., and Tripot, G. (2012). *A Data-Driven Failure Prognostics Method Based on Mixture of Gaussians Hidden Markov Models*. IEEE Trans. Reliab. 61, 491–503.

- Trupin, E. (1993). *Segmentation de documents : Application à un système de lecture pour non-voyants*, Thèse de doctorat, Université de Rouen.
- Verron, S. (2007). *Diagnostic et surveillance des processus complexes par réseaux bayésiens*. Thèse de doctorat. Institut des Sciences et Techniques de l'Ingénieur d'Angers.
- Vrignat, P. (2010). *Génération d'indicateurs de maintenance par une approche semi-paramétrique et par une approche markovienne*. Thèse de doctorat, Université d'Orléans.
- Vrignat, P., Avila, M., Duculty, F., Robles, B., Begot, S., and Kratz, F. (2012). *Generation d'indicateurs dans le cadre d'une politique de maintenance préventive conditionnelle*. In 18ème Congrès de Maîtrise Des Risques et de Sécurité de Fonctionnement, I. de la M. des R. et S. de Fonctionnement, ed. (Tours, France), pp. 177–196.
- Welte, T. (2008). *Deterioration and Maintenance Models for Components in Hydropower Plants* (Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi).
- Wise, B.M., and Gallagher, N.B. (1996). *The process chemometrics approach to process monitoring and fault detection*. *J. Process Control* 6, 329–348.
- Yang, Q. (2004). *Model-based and data driven fault diagnosis methods with applications to process monitoring*. Thèse de doctorat, Case Western Reserve University.
- Zhang, X., Xu, R., Kwan, C., Liang, S.Y., Xie, Q., and Haynes, L. (2005). *An integrated approach to bearing fault diagnostics and prognostics*. In *Proceedings of the 2005, American Control Conference, 2005.*, pp. 2750–2755 vol. 4.