

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DE M'SILA
FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
D'INGENIEUR D'ETAT EN GENIE ELECTROTECHNIQUE

OPTION: COMMANDE ELECTRIQUE

THEME

**MODELISATION DU FONCTIONNEMENT DES FILTRES
ELECTROSTATIQUES PAR UNE IDENTIFICATION HYBRIDE**

Proposé et dirigé par :

Monsieur: NOURI Hamou

Présenté par :

ALIOUI Ouahid
BOUTI Abderrazak
BOUDJELLAL Djamel Eddine

Année Universitaire : 2010 / 2011

Sommaire

Sommaire

Introduction générale	01
Chapitre I	
Modélisation et identification des systèmes électriques	
I.1 Introduction	03
I.2 Notion de système	03
I.3 Définition du modèle	04
I.4 Les différentes étapes d'une modélisation	06
I.4.1 Définition du procédé	06
I.4.2 Hypothèses	06
I.4.3 Lois physiques	07
I.4.4 Identification	07
I.4.5 Validation	07
I.4.6 Utilisation	07
I.5 Généralités sur l'identification	08
I.5.1 Etapes d'une «bonne» identification	09
I.5.2 Les signaux de test	11
I.5.3 Espace paramétrique : « type de distance Objet – Modèle »	11
I.5.3.1 Distance d'état	12
I.5.3.2 Distance de prédiction (ou modèle série- parallèle)	12
I.5.3.3 Distance de structure	13
I.5.4 Techniques d'identification	13
I.5.4.1 Estimation linéaire	13
I.5.4.2 Méthode du modèle	14
I.5.4.2.a Méthode du premier ordre	14
I.5.4.2.b Méthode du deuxième ordre	15
I.5.4.2.c Méthodes globales	16

I.5.4.3 Méthodes itératives linéaires	16
I.5.5 Identification des systèmes continus d'ordre élevé	17
I.5.5.1 Méthode de Strejć	17
I.5.5.2 Méthode de Broida	19
I.5.5.3 Méthode de Schwarze	19
I.5.5.4 Méthode de Hudzovic	20
I.6 Conclusion	24

Chapitre II

Généralités sur le fonctionnement des électrofiltres

II.1 Introduction	25
II.2 Architecture des précipitateurs électrostatiques	25
II.2.1 Electrofiltre à un seul étage	26
II.2.2 Electrofiltres à deux étages	28
II.2.3 Electrofiltres à sec et à liquide	29
II.3 Description du fonctionnement d'un électrofiltre	29
II.4 Efficacité d'un électrofiltre	32
II.5 Modèles numériques des électrofiltres	35
II.6 Application de précipitateurs industriels	38
II.7 Avantages des précipitateurs électrostatiques	39
II.8 Inconvénients des précipitateurs électrostatiques	39
II.9 Conditions du choix d'un précipitateur électrostatique	40
II.10 Conclusion	41

Chapitre III

Etude expérimentale de la précipitation électrostatique

III.1 Introduction	42
III.2 Moyens expérimentaux et techniques de mesures	42
III.2.1 L'installation expérimentale et les outils de caractérisation	42
III.2.2 - Principe de fonctionnement dispositif de comptage de particules	43

III.2.3 Distribution granulométrique	45
III.3 La validation de la mesure	47
III.4 Analyse des performances des électrofiltres	48
III.4.1 Approche par efficacité globale	48
III.4.2 Approche par efficacité par classe	48
III.5 Détermination de la vitesse des particules	49
III.5.1 Méthode d'estimation de w_E	50
III.5.1.1 Démarche expérimentale	50
III.5.1.2 Principe de mesure de l'efficacité fractionnaire de collection ..	52
III.6 Les classes granulométriques de particules	56
III.6.1 Calcul de la vitesse de migration: Théorie de Leonard	57
III.7 Résultats	59
III.7.1 Mesure du rendement	59
III.7.2 Calcul de la vitesse de particules	59
III.7.3 Calcul de la charge de particules	60
III.8 Conclusion	62

Chapitre IV

Analyse des performances d'un électrofiltre

IV.1 Introduction	63
IV.2 La transformée de Laplace	63
IV.3 La fonction de transfert	64
IV.3.1 Définition	64
IV.3.2 Les différents types de fonction de transfert	66
IV.3.3 Propriétés de la fonction de transfert	67
IV.3.4. Les différentes techniques de calcul de la fonction de transfert	67
IV.3.5 Les différentes techniques de l'analyse et de synthèse des performances	68
IV.3.5.1. Diagramme de Bode	68

IV.3.5.2 Lieu des racines	69
IV.3.5.3 Diagramme de Black	70
IV.3.5.4 Diagramme de Nyquist	70
IV.4 Résultats et interpretation	71
IV.4.1 Détermination de la fonction de transfert du filtre	
Electrostatique	72
IV.4.2 Analyse des performances du système	73
IV.4.3 Design de correcteurs sous MATLAB	75
IV.5 Conclusion	78
Conclusion générale	79
Bibliographie	81

Introduction générale

Au cours des dernières décennies, les exigences en matière d'efficacité des mesures de protection de l'environnement ont évolué considérablement, ce qui imposé la mise au point de technologies innovatrices susceptibles d'être à la hauteur des dispositions légales de plus en plus strictes. Dans tous les pays industrialisés et les pays à développement industriel, il existe une réglementation plus ou moins sévère qui impose le dépoussiérage des fumées industrielles et fixe le taux maximum admissible des poussières pouvant être émises dans l'atmosphère.

La filtration des particules et des fumées qui constituent la pollution visible a été le premier objet du traitement de l'aire sur le plan technologique, il est acquis que l'utilisation des électrofiltres permet d'obtenir des résultats très satisfaisants en matière de filtration des poussières et des suies. Mais les équipements nécessaires demeurent volumineux et d'un coût élevé tout en investissement qu'en exploitation. L'électrofiltre est un dépoussiéreur qui utilise les forces électriques pour séparer les vésicules du courant gazeux. La charge des particules résulte d'un phénomène appelé «l'effet couronne» qui apparaît lorsque l'on applique une différence de potentiel entre deux conducteurs aux configurations géométriques appropriées.

L'Automatique est une discipline scientifique qui vise à conférer à un dispositif donné, appelé système, des propriétés souhaitées et ce, sans nécessité d'une intervention humaine. Une telle discipline requiert d'attribuer un modèle au comportement dit système (phase de modélisation) et de l'utiliser afin, d'une part, de mieux comprendre ce comportement (phase d'analyse) et d'autre part, d'agir sur le système dans le but d'améliorer ses propriétés (phase de commande). Le processus de modélisation va donc être de mobiliser les connaissances dont on dispose (relations fonctionnelles, informations) pour atteindre les objectifs fixés. Ce processus, couvre alors plusieurs phases qui ne seront pas toujours nécessaires, en fonction des types d'information et des objectifs du modèle. Á priori cet ensemble de procédures décrit aussi bien le processus de modélisation mécaniste que la modélisation statistique. Le processus ne parcourt pas linéairement les phases, mais est fait de multiples allers-retours.

Ces différentes phases achevées, se posent alors les questions de l'action : prédire, commander, diagnostiquer, décider etc. qui font l'objet de méthodologies spécifiques. Par exemple, dans le domaine de la commande, le développement de méthodes de commande robuste est un enjeu important. L'identification d'un système c'est la détermination de son modèle mathématique sur la base des observations expérimentables entrée-sortie. Le traitement mathématique des réponses graphiques du système est appelé identification. Le modèle obtenu est dit de conduite ou de représentation.

La validation des modèles élaborés est faite par rapport au critère d'identification, aux connaissances que l'on peut avoir sur le système à identifier, en l'occurrence sa réponse

fréquentielle, et à la finalité du modèle. L'interaction entre la commande et l'identification est étudiée pour mieux appréhender les problèmes d'identification en boucle fermée et la motivation du filtrage des données d'entrée-sortie.

Notre travail est présenté en quatre chapitres, le premier chapitre est consacré au problème d'identification des systèmes qui d'abord présenté à partir d'un ensemble de modèles d'identification. Un retour sur les fonctions l'analyse permet de mieux appréhender les concepts des techniques et des structures des modèles d'identification

Le deuxième chapitre est consacré à la pollution atmosphérique avec une présentation d'une façon générale sur la description, la réalisation et le fonctionnement des électrofiltres. Il comporte une étude théorique qui regroupe les travaux et les modèles existant jusqu'à nos jours.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude expérimentale des filtres électrostatiques. Nous allons procéder à l'évaluation des performances des filtres électrostatique. Nous allons calculés la vitesse des particules dans l'espace interélectrode et la charge maximale en fonction de la tension appliquée et du diamètre des particules.

Le quatrième chapitre est réservé à la modélisation et à la simulation numérique du rendement des électrofiltres. Cette partie consiste à partir des valeurs expérimentales du chapitre trois, de trouver un modèle fiable en utilisant les propriétés de la fonction de transfert en première étape. La deuxième étape consiste à améliorer les performances de système en étudiant à chaque étape le gain statique, le dépassement et la stabilité.

CHAPITRE I

Modélisation et identification des systèmes électriques

I.1 Introduction

L'objet de la science a toujours été de faire des modèles. La modélisation fait appel à toute connaissance théorique, pratique et à l'habileté de l'opérateur. On dit que l'on a modélisé un processus physique, processus que l'on dénommera par la suite objet, si l'on est capable de prédire quel sera son comportement (sortie) lorsqu'on le soumettra à des sollicitations (entrées) connues.

Depuis longtemps déjà, la modélisation-simulation ne se limite plus au calcul numérique avec l'avènement du calcul symbolique [1]. La fonction de transfert réelle d'un procédé industriel est pratiquement impossible à déterminer. Il est alors nécessaire d'utiliser un modèle qui soit le plus représentatif possible de ce procédé. Identifier un procédé, c'est rechercher à partir d'enregistrements, les paramètres qui caractérisent son modèle.

Parmi les nombreuses méthodes d'identification existantes, nous utilisons des méthodes simples applicables sans matériel spécial avec des connaissances théoriques particulières.

On utilise des méthodes d'identification qui permettent de trouver un modèle de comportement traduisant le plus fidèlement le procédé autour d'un point de fonctionnement.

La connaissance des paramètres caractéristiques d'un procédé peut-être utile en particulier dans les domaines suivants:

- Réglage des actions dans les boucles de régulation.
- Choix des modes de régulation.
- Modélisation des procédés pour des correcteurs numériques, afin de réaliser des régulations par modèle interne de référence.

I.2 Notion de système

Un système est une combinaison de composants interconnectés pour atteindre un objectif, rendre un service à un ou plusieurs opérateurs humains. Le "composant" est un organe fonctionnel qui ne se limite pas à un objet physique mais peut correspondre à un objet plus abstrait de telle sorte qu'un système peut être économique, financier, démographique même si, dans le cadre de cet enseignement, seront plutôt rencontrés des systèmes physiques, c'est-à-dire mécaniques, électriques, électroniques, hydrauliques, pneumatiques, chimiques, mécatroniques etc.

Parmi les grandeurs, éventuellement physiques, mises en jeu dans le fonctionnement d'un système, l'on peut distinguer celles qui, générées par l'environnement extérieur au système, agissent sur ce dernier. Ce sont les entrées parmi lesquelles figurent celles dont l'homme a la maîtrise (les entrées de commande ou simplement entrées) et celles qui échappent à son contrôle (les perturbations). L'on distingue aussi les grandeurs par lesquelles le système agit sur l'environnement extérieur, à savoir les sorties. L'on note souvent par les lettres u , d et y , respectivement les entrées, les perturbations et les sorties, de sorte qu'un système peut être représenté par le schéma de la figure 1.1.

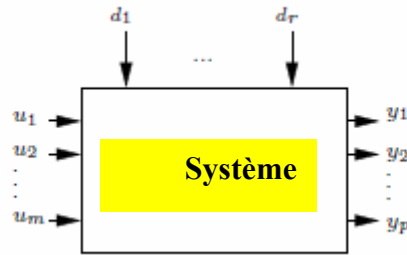


Figure 1.1 Système comportant m entrées, p sorties et r perturbations

I.3 Définition du modèle

Un modèle, au sens de la simulation, a pour but d'établir une relation entre des variables d'entrées (e_i) et des variables de sorties (s_i). Pour cela, il est caractérisé par des variables internes (v_i), qui évoluent au cours du temps, et des paramètres fixes (p_i). Des équations mathématiques font le lien entre les variables internes, les paramètres, les entrées et les sorties du modèle.

Pour des raisons de commodité pratique, le modèle sera mathématique afin d'être simulé sur ordinateur numérique. On recherche donc une relation mathématique F qui lie les variables mesurées d'entrées « e » et de sorties « s ». Cette relation mathématique revêt un caractère forme qui définit la structure du système modèle (figure 1.2).

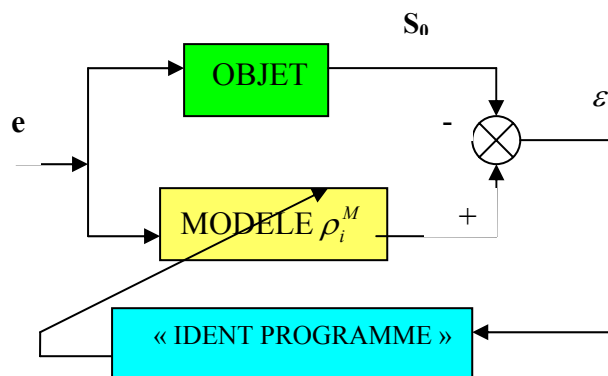


Figure 1.2 : Modélisation des systèmes.

Dans le domaine de génie électrique, les modèles de composants donnent une relation entre les courants et les tensions aux bornes du dispositif à modéliser. C'est ce type de relation que nous cherchons à établir entre la tension dans une décharge et le courant circulant dans celle-ci.

Les variables internes (v_i) peuvent être des intermédiaires de calcul mais elles représentent souvent un état interne, généralement énergétique, du modèle. Dans le cas des circuits électriques,

les courants dans des inductances ou les tensions dans les capacités sont des variables d'états du système. Les paramètres des modèles sont des constantes qui les caractérisent.

Un modèle liant les entrées e_1, \dots, e_i aux sorties s_1, \dots, s_i peut être décrit par un système d'équations souvent différentiel, comme suit [2]:

$$\begin{cases} v_1 = f_1(p_1, \dots, p_i, v_2, \dots, v_i, e_1, \dots, e_i) \\ \vdots \\ v_i = f_i(p_1, \dots, p_i, v_1, \dots, v_{i-1}, e_1, \dots, e_i) \end{cases} \quad (1.1)$$

Ou sous forme de système d'équations (1.2) suivant :

$$\begin{cases} s_1 = g_1(p_1, \dots, p_i, v_1, \dots, v_i, e_1, \dots, e_i) \\ \vdots \\ s_i = g_i(p_1, \dots, p_i, v_1, \dots, v_i, e_1, \dots, e_i) \end{cases} \quad (1.2)$$

Les équations d'un modèle représentent le plus souvent des équations de la physique mais elles peuvent également provenir d'observations empiriques du dispositif à modéliser. Les modèles électriques que nous utilisons ont des équations qui sont généralement directement issues de lois de la physique (loi d'Ohm), mais dans certains cas ce sont des simplifications qui sont utilisées (issues par exemple d'un moyennage).

Afin d'illustrer notre propos, nous étudions un exemple simple en électrotechnique: la modélisation par un schéma équivalent d'un transformateur haute tension (Figure 1.3), haute fréquence, tenant compte des éléments parasites. Ce modèle sera utilisé lors de l'étude d'un montage à résonance pour les décharges à barrière diélectrique.

Le choix d'un modèle circuit pour l'illustration des méthodes d'identifications a pour but de simplifier la lecture.

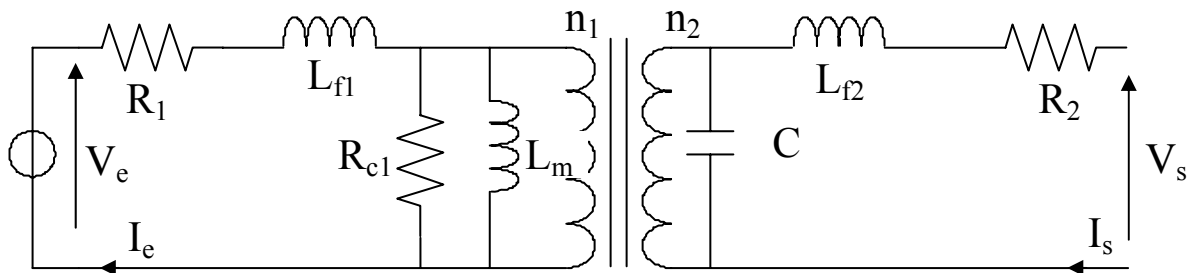


Figure 1.3 Circuit équivalent d'un transformateur haute tension et haute fréquence

On impose l'entrée du modèle comme étant la tension V_e , la sortie étant le courant I_e . Nous utilisons comme variables internes la tension aux bornes de la capacité et les courants dans les inductances. Les paramètres de ce modèle sont les valeurs des composants. Dans l'étude de ce transformateur, R_1 et R_2 modélisent les pertes Joule au primaire et au secondaire ; L_{f1} et L_{f2} sont les inductances de fuites primaire et secondaire, L_m l'inductance magnétisante; R_{c1} modélise les pertes fer et C est la capacité parasite des enroulements.

L'objectif de la méthode que nous cherchons à mettre au point est la détermination de la valeur de chacun de ces paramètres à partir de chronogrammes expérimentaux de grandeurs électriques significatives.

On considère les cas où la sortie du transformateur est en circuit ouvert ou court-circuité, en fonction des conditions expérimentales.

Pour ce modèle, lorsque le secondaire est en circuit ouvert, nous avons les équations suivantes:

$$\begin{cases} \frac{dI_{L_m}}{dt} = \frac{n_1}{n_2} \frac{V_c}{L_m} \\ \frac{dV_c}{dt} = \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \frac{1}{C} \left(I_{L_{f1}} - I_{L_m} - \frac{V_c}{R_{c1}} \right) \\ \frac{dI_{L_{f1}}}{dt} = \frac{V_e - R_1 I_{L_{f1}} - V_c}{L_{f1}} \end{cases} \quad (1,3)$$

On cherche à obtenir la valeur des paramètres R_1 , L_{f1} , R_{c1} , L_m et C de ce modèle. L_{f2} et R_2 seront évaluées à partir de mesures où l'enroulement secondaire est en circuit fermé.

I.4 Les différentes étapes d'une modélisation

Les étapes essentielles sont regroupées dans l'organisme suivant (figure 1.4):

I.4.1 Définition du procédé

Il s'agit ici de préciser les frontières du système, les contraintes du milieu extérieur (entrées) et les paramètres du système présentant un intérêt (sorties).

I.4.2 Hypothèses

Ce sont des hypothèses sur le fonctionnement du système conduisant à une description de son état (ex : température uniforme).

I.4.3 Lois physiques

La construction d'un modèle de procédés repose généralement sur des bilans de masse, d'énergie ou de force. L'écriture de ces bilans fait intervenir les lois de la physique.

I.4.4 Identification

Cette étape consiste à ajuster les paramètres inconnus du modèle de manière à ce que celui-ci décrive au mieux le fonctionnement du procédé.

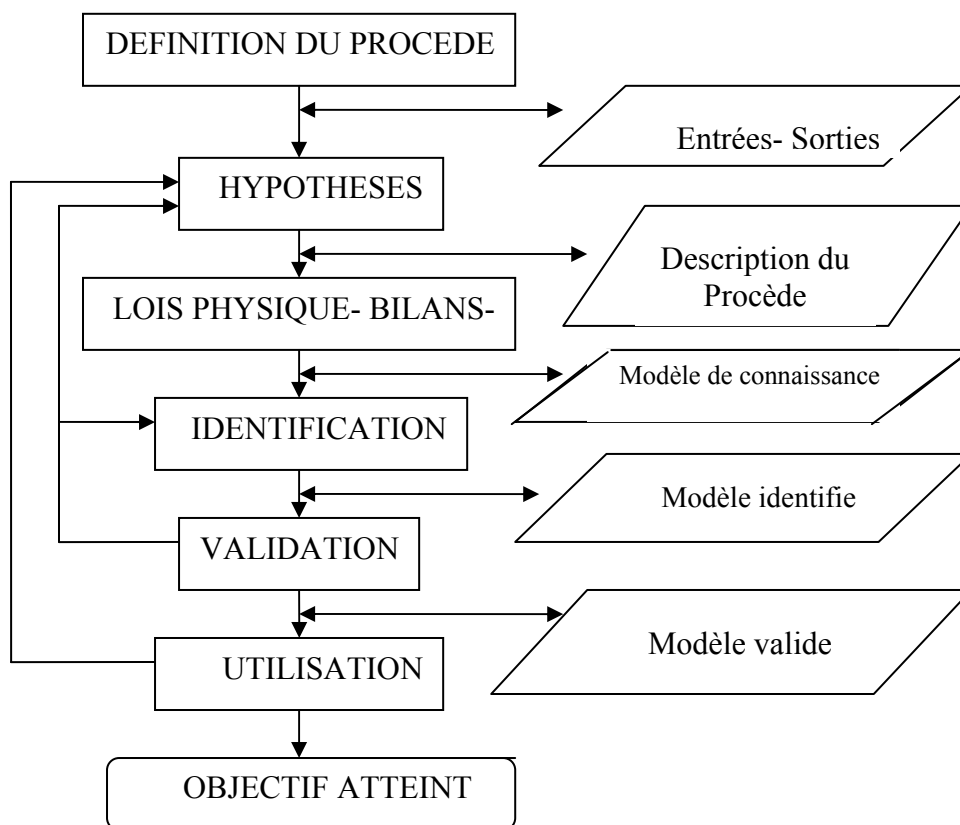


Figure 1.4 organigramme général de la modélisation des systèmes

I.4.5 Validation

Il faut déterminer si le modèle obtenu est satisfaisant, c.a. d s il permet de décrire le fonctionnement du procédé avec une précision suffisante, pour toutes les variations des entrées aux quelles le procédé peut être soumis.

I.4.6 Utilisation

Dans la perspective adoptée ici, c'est dans le cadre de l'utilisation du modèle que s'évaluent définitivement ses performances.

Supposons que le modèle serve à déterminer les paramètres de réglage d'une boucle de régulation PID. On appréciera alors la qualité de la modélisation en comparant les prédictions du modèle aux réponses du procédé muni de sa régulation. Au terme de cette dernière étape, on peut être amené à revenir sur la modélisation pour améliorer les performances d'un modèle.

1.5 Généralités sur l'identification

L'identification est l'étape où il s'agit de déterminer la valeur numérique des paramètres du modèle qui se comportera au mieux comme le processus objets. Identifier un système consiste à proposer une structure entre son entrée et sa sortie et à déterminer à partir du couple entrée-sortie, les valeurs des paramètres du modèle. Ainsi trouvé, le modèle (mathématique) doit, dans son domaine de validité, se comporter comme la réalité (physique) ou tout au moins s'en approcher « au plus près ». Le « plus près » est défini par un critère.

Deux raisons importantes motivent les électrotechniciens :

- Prédire le comportement d'un système pour différentes conditions de fonctionnement (analyse, simulation),
- Elaborer une loi de commande à appliquer au processus, pour qu'il réalise l'objectif assigné (synthèse des lois de commande).

Les commandes peuvent être établies selon deux grands types de méthodes :

- ✚ Celles ne nécessitant pas la connaissance d'un modèle mathématique ; c'est par exemple le cas du classique bouclage P.I.D. et l'ajustement expérimental de ses coefficients selon le critère de Ziegler - Nichols, c'est aussi le cas des régulateurs flous.
- ✚ Celles nécessitant un modèle mathématique. Lorsqu'on désire obtenir un *modèle paramétrique* pour un processus/système, c'est-à-dire une relation mathématique comprenant un nombre fini de termes (par exemple fonction de transfert, équation différentielle ou aux différences), on peut souhaiter en premier lieu exprimer les *lois physiques* connues régissant son fonctionnement et en déduire les relations mathématiques cherchées. On parle alors de *modèle de connaissance*.

Cependant, lorsque cette analyse interne n'est pas possible (lois internes inconnues, mesures internes impossibles ou difficiles) ou trop complexe, on est amené à considérer le système comme une « boîte noire ». À partir de l'observation de ses entrées-sorties (comportement externe) et de mesures expérimentales, on établit alors la relation mathématique qui lui correspond « au mieux » ; on parle alors de *modèle de représentation*. Ainsi, un système complexe sera représenté par un modèle

mathématique aussi simple que possible, et dont les coefficients sont ajustés de manière à représenter le mieux possible le système réel dans des conditions de fonctionnement données (et en particulier dans une zone de travail plus ou moins grande). Il est à noter que les paramètres figurant dans les modèles de représentation obtenus n'ont pas de réalité physique. Les modèles paramétriques sont les mieux adaptés à la détermination de la loi de commande des systèmes numériques. Pour l'électromécanicien, tous ces modèles sont de nature dynamique.

La réponse d'un système à des excitations standard par exemple de type pulsionnel ou de type sinusoïdal en fournit un *modèle non paramétrique* qui est la réponse pulsionnelle (domaine temporel) ou fréquentielle (domaine des fréquences).

L'informatique peut aider à exécuter la tâche d'identification par la génération de signaux de test, l'acquisition des données et mesures, leur traitement en temps différé ou en temps réel, et enfin la validation du modèle.

Pour évaluer objectivement cette identité du comportement, on introduit un critère de distance entre l'objet et le modèle : $D(O, M)$. Pour des raisons pratiques d'élimination des bruits qui affectent les mesures réelles, on prend généralement comme distance une fonctionnelle de l'écart objet – modèle :

$$D(O, M) = \sum_{n=1}^N f[S_M(n) - S_o(n)] = \sum_{n=1}^N f(\varepsilon) \quad (1.4)$$

avec : $f \geq 0; f(0) = 0;$ S_o : Sortie objet S_M : Sortie modèle

N : déterminant le nombre de points de l'horizon d'observation.

On prendra en pratique $f = \varepsilon^2$ ou $f = |\varepsilon|$.

La distance D , fonctionnelle positive de l'écart, est une fonction des paramètres structuraux ρ_i^M du modèle : $D = D(\rho_i^M)$.

Si l'hypothèse de caractérisation est correcte et si les mesures ne sont pas entachées de bruit, alors il existe $\rho_i^M = \rho_i^O$ tel que $D(O, M) = 0$. En fait, comme la caractérisation n'est pas parfaite et que les mesures sont bruitées, D ne peut être que minimisée, ne pouvant être annulée. Le problème se réduit donc à ce lui de la minimisation d'une fonction positive $D(\rho_i^M)$ des variables ρ_i^M .

I.5.1 Etapes d'une «bonne» identification :

Un processus n'admet pas un modèle unique et l'électromécanicien cherchera un bon modèle, plus ou moins compliqué et précis, adapté à son problème. On peut généralement décomposer en quatre étapes la conduite d'une « bonne » identification (voir fig.1.5). Celle-ci est facilitée par les renseignements dont on dispose au préalable sur le processus réel. Nous avons choisi de présenter

quelques méthodes d'identification, certaines plus « classiques », d'autres mettant en œuvre l'outil statistique et en particulier les moindres carrés (M.C.). Les renseignements préalables concernant le système ou processus à identifier peuvent porter sur :

- Son domaine de linéarité défini par sa caractéristique statique ;
- Son temps de réponse, résultat d'un essai indiciel et qui, dans le cas discret, aidera au choix de la période d'échantillonnage ;
- La présence ou non d'un intégrateur, d'un retard pur

On éliminera par filtrage passe-haut les composantes continues sur les mesures (excitation et sortie) lorsqu'on s'intéresse et c'est généralement le cas - à leurs seules variations ; par ailleurs, un éventuel filtrage passe-bas permettra de diminuer l'influence des bruits à spectre large [3].

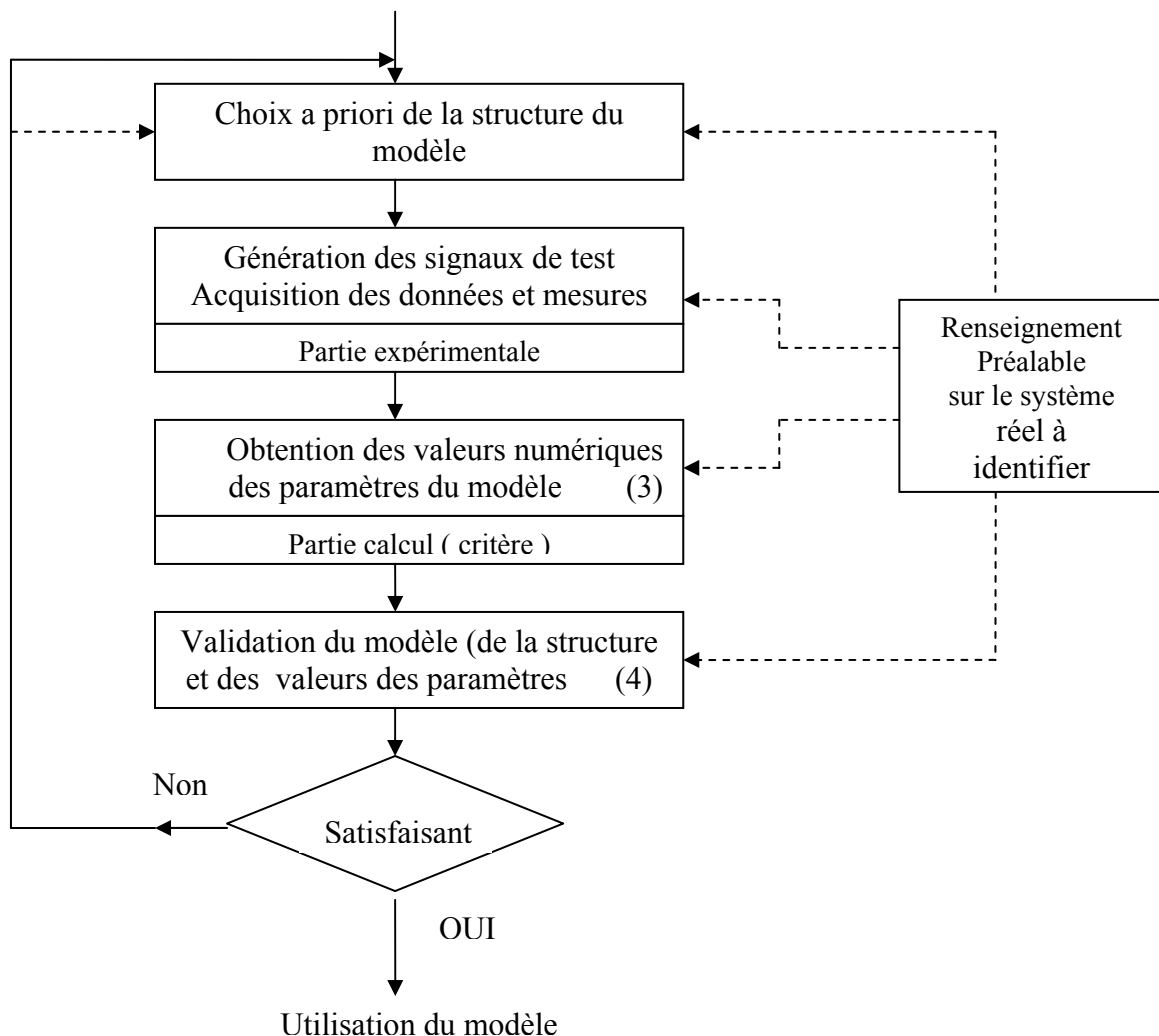


Figure 1.5 : Organigramme général de l'identification

I.5.2 Les signaux de test

En fonctionnement réel et normal, le processus, inclus dans une boucle fermée I évolue autour d'un point de fonctionnement, et généralement, les variations de la commande u et de la sortie y sont relativement faibles. Or la qualité de l'identification pour une méthode donnée, dépend de la quantité d'information contenue les couples excitation/réponse. Lorsque cela est possible, on préfère donc exciter le processus en boucle ouverte par un signal suffisamment énergétique - sans toutefois le projeter hors de sa zone de linéarité autour du point de fonctionnement - et suffisamment riche en composantes spectrales de façon à exciter les modes significatifs du processus.

En pratique, on utilise deux catégories de signaux de test (excitation) :

- Les signaux déterministes tels que l'échelon, la sinusoïde,... ces signaux sont décrits par une fonction de temps ou par leur transformée de Fourier ;
- Les signaux aléatoires, décrits par leurs propriétés statistiques. Parmi ceux-ci le bruit blanc (théorique) dont l'énergie est équirépartie sur toutes les fréquences, permettrait d'exciter le processus dans toute la bande passante. On lui préfère en pratique la séquence binaire pseudo aléatoire (S.B.P.A.).

L'identification est un exercice difficile qui, outre la maîtrise de la théorie, nécessite un bon savoir-faire. Cette partie est consacrée à l'obtention de modèles linéaires S.I.S.O. (single input - single output ou mono-entrée, mono-sortie) à constantes localisées, invariant dans le temps, supposés d'ordre fini.

I.5.3 Espace paramétrique : « type de distance Objet – Modèle » :

La fonction $D(O, M)$ qu'il s'agit de minimiser est représentable dans un espace dit paramétrique, où sont portés sur les axes de coordonnées les paramètres structuraux du modèle qu'il s'agit de choisir et ceux de l'objet qu'il s'agit de découvrir.

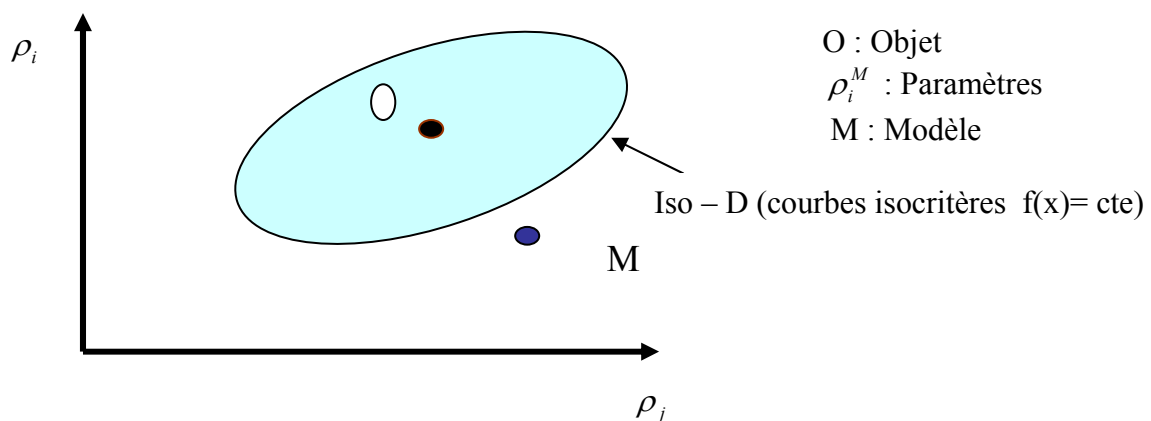


Figure 1.6 : Espace paramétrique

La présence de bruit dans les observations fait qu'il n'y a pas de sens à rechercher la plus petite distance mais l'ensemble des points, donc des modèles ; tel que : $D(0,M) \leq \delta$. δ pouvant être déterminé par tests statistique. On distingue trois types de distances :

I.5.3.1 Distance d'état

Elle est mesurable et construite uniquement sur une fonctionnelle positive de l'écart ε . Elle est basée sur la différence entre la sortie du système et celle du modèle (Fig. 1.7).

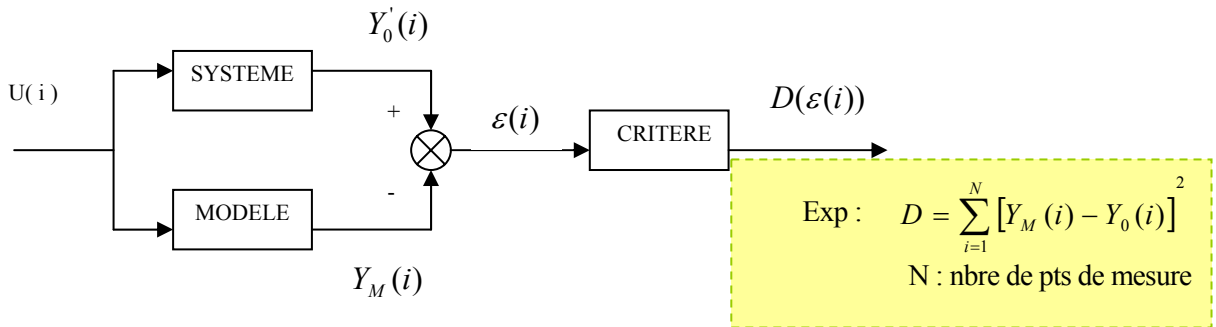


Fig. 1.7 : Distance d'état ou de sortie

I.5.3.2 Distance de prédiction (ou modèle série- parallèle)

Elle est basée sur la différence entre la sortie du système et la sortie que prédit le modèle au même instant (Fig. 1.8).

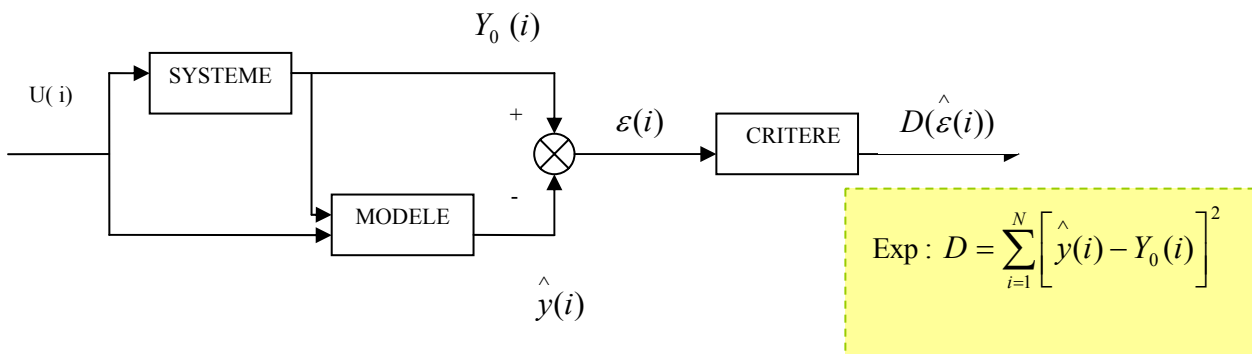


Fig. 1.8 : Distance de prédiction.

Si le modèle choisi est une équation différentielle du premier ordre, par exemple, on écrit:

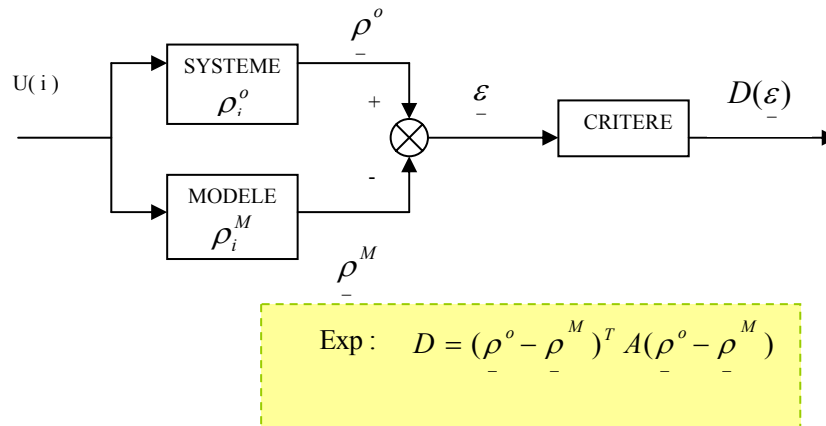
$$\hat{y}(i) = -a_1 y(i-1) + b_1 U(i-1) \tag{1.5}$$

C'est-à-dire qu'on utilise toute l'information disponible au temps (i-1) pour prédire la sortie à l'instant (i), et en particulier la valeur de la sortie du système, alors que la sortie du modèle serait :

$$Y_M(i) = -a_1 Y_M(i-1) + b_1 U(i-1) \tag{1.6}$$

I.5.3.3 Distance de structure

Elle est basée sur la différence entre les paramètres du système et ceux du modèle (Fig. 1.9).



Avec A une matrice de pondération symétrique définie positive.

Fig. 1.9 : Distance de structure

Nous remarquons que D n'est pas directement mesurable, puisqu'on ignore $\underline{\rho}^o$. On la mesure donc à travers ses effets sur la sortie.

I.5.4 Techniques d'identification

Il s'agit d'estimer les valeurs numériques des paramètres de l'objet [4].

I.5.4.1 Estimation linéaire

La technique la plus souvent utilisée est celle de l'estimation linéaire. On suppose qu'objet et modèle sont représentables linéairement à l'aide d'un vecteur de composantes $X_i(n)$ qui peuvent être soit des mesures indépendantes $U_j(n)$, soit des entrées et des sorties passés du processus :

$$S(n) = \sum_i a_i U_i(n) ; S(n) = \sum_i b_i S(n-i) + \sum_j c_j e(n-j) ; S(n) = \sum_i d_i e_i(n-i)$$

Nous les représenterons d'une façon générale par l'équation :

$$S(n) = \sum_i a_i X_i(n) \tag{1.7}$$

Où les $X_i(n)$ sont mesurés et stocker dans la mémoire d'un ordinateur.

On construit une distance $D(O, M)$ telle que :

$$D(O, M) = \sum_{n=1}^N [S_M(n) - S_O(n)]^2 = \sum_n \varepsilon^2(n) \tag{1.8}$$

Où S_o est mesuré expérimentalement : $S_o = \sum_i a_i^o x_i(n)$

S_M est calculé par le modèle : $S_M = \sum_i a_i^M x_i(n)$

$$\text{Donc : } D(O, M) = \sum_n \left[\sum_i (a_i^M - a_i^o) x_i(n) \right]^2 \text{ ou } \sum_n \left[\sum_i a_i^M x_i(n) - S_o(n) \right]^2 \quad (1.9)$$

On cherche a_i^M tel que $D(O, M)$ soit minimale : $\frac{\partial D(O, M)}{\partial a_i^M} = 0 = 2 \sum_n \left[\sum_j a_j^M x_j(n) x_i(n) - S_o(n) x_i(n) \right]$

On a donc à résoudre le système d'équations linéaires : $\sum_n S_o(n) x_i(n) = \sum_j a_j^M \sum_n x_j(n) x_i(n)$

En notation vectorielle, si l'on pose : $\Delta \underline{A} = \underline{A} - \underline{A}_o$ avec $\underline{A}_M = \underline{a}^M$; $\underline{A}_o = \underline{a}^o$, nous avons

$$D(O, M) = \Delta \underline{A}^T M \Delta \underline{A} \quad (1.10)$$

avec M matrice définie positive.

Soit $H = [h_{i,j}]$; $h_{i,j} = \sum_n x_i(n) x_j(n)$ et $Y = \sum_n S_o(n) x_i(n)$, on montre que : $\underline{A}_M = (H^T M H)^{-1} H^T M Y$

La matrice de pondération M est généralement prise diagonale $M = \{m_{ii}\}$. Les coefficients de pondération m_{ii} varient en sens inverse du bruit que l'on estime perturber la variable mesurée i . La matrice H est définie positive, symétrique et peut être inversée facilement par diverses techniques.

1.5.4.2 Méthode du modèle

On cherche, par une méthode itérative, à minimiser la distance d'état $D(O, M)$. Le problème se ramène à un problème de minimisation de fonction, généralement réalisée par des techniques de programmation non linéaire. Nous pouvons classer les méthodes en trois catégories.

1.5.4.2.a Méthode du premier ordre

C'est à la base de la méthode du gradient, qui consiste à se déplacer dans l'espace paramétrique dans le sens de la plus grande pente sur la surface $D(a_i^M)$. Autour d'un point \underline{a}^M , déplaçant de $\Delta \underline{a}$:

$$D(\underline{a}^M + \Delta \underline{a}) = D(\underline{a}^M) + \underline{g}^T \Delta \underline{a} ; \text{ Où } \underline{g} = \left[\frac{\partial D}{\partial a_i^M} \right] \quad (1.11)$$

Exemple :

Supposons que nous soyons sur une sphère de rayons ρ autour du point \underline{a}^M : $\Delta \underline{a}^T \Delta \underline{a} = \rho$

Quel est le point $\tilde{\underline{a}} = \underline{a}^M + \Delta \underline{a}$ tel que $D(\underline{a}^M + \Delta \underline{a})$ soit minimale ?

$$\text{On a : } \begin{cases} \Delta D = \underline{g}^T \Delta \underline{a} \Rightarrow d(\Delta D) = 0 ; \rho = \Delta \underline{a}^T \Delta \underline{a} \Rightarrow \underline{g}^T d(\Delta \underline{a}) = 0 \\ \rho = \Delta \underline{a}^T \Delta \underline{a} \Rightarrow d\rho = 0 \Rightarrow \Delta \underline{a}^T d(\Delta \underline{a}) = 0 \end{cases}$$

. Le système admet une solution non nulle si : $\Delta \underline{a} = k \underline{g}$. Le coefficient k, dit de relaxation, sera pris négatif pour tendre à faire décroître la fonction D . On prendra donc en pratique, suivant les itérations i :

$$\underline{a}^M(i+1) = \underline{a}^M(i) - k \underline{g}(\underline{a}^M)$$

. Le gradient \underline{g} doit être recalculé à chaque itération i : $\underline{g}(\underline{a}^M)$.

. Le choix de k pose des problèmes pratiques délicats : pris trop petit, l'identification piétine (fig.II.6.a), pris trop grand, il risque de divergence (fig.1.10.b).

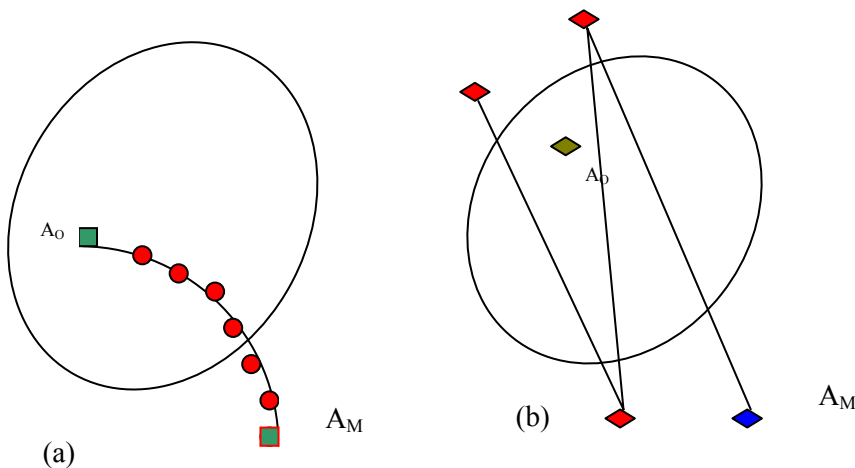


Figure 1.10 : Convergence de la méthode du Gradient.

I.5.4.2.b Méthode du deuxième ordre

Les méthodes du deuxième ordre sont fondées sur le développement de $D(\underline{a}^M)$ au deuxième ordre autour du point nominal :

$$D(\underline{a}^M + \Delta \underline{a}) = D(\underline{a}^M) + \underline{g}^T \Delta \underline{a} + \frac{1}{2} \Delta \underline{a}^T H \Delta \underline{a} \quad (1.12)$$

Supposons que nous nous plaçons autour du point minimal : $D(\underline{a}^M) = 0$, alors

$D(\underline{a}^M + \Delta \underline{a}) = \underline{g}^T \Delta \underline{a} + \frac{1}{2} \Delta \underline{a}^T H \Delta \underline{a}$. \underline{a} est optimal si :

$$d(D(\underline{a}^M + \Delta \underline{a})) = 0 = \underline{g}^T + H \Delta \underline{a} \Rightarrow \Delta \underline{a} = H^{-1} \underline{g} \quad (1.13)$$

Il convient donc de résoudre ce système d'équations.

I.5.4.2.c Méthodes globales

Les méthodes globales sont des méthodes itératives qui tendent à chaque étape à déterminer non pas un point mais un domaine **iso-D**, domaine d'incertitude des paramètres. On cherche ensuite le centre de ce domaine convexe, où à défaut un point à l'intérieur. Ce sont des méthodes qui procèdent souvent par tirage aléatoire. On tire des directions aléatoires d_i et l'on recherche sur ces directions à partir d'un point $a^M(j)$ le point $a^M(j+1)$:

$$a^M(j+1) = a^M(j) + kd_j \quad (1.14)$$

Le paramètre k est choisi tel que : $D[a^M(j+1)] = D[a^M]$.

En répétant un grand nombre de fois l'opération, on obtient une liste de points de l' **iso-D**, soit :

$$a_{\min,j}^M \prec a_j^M \prec a_{\max,j}^M \text{ En prenant : } a_j^M = \frac{1}{2} [a_{\max,j}^M + a_{\min,j}^M].$$

Et en itérant l'opération, on converge sûrement, grâce à la convexité de la fonction, vers D_{\min} . Ces techniques, lourdes en calcul de critère mais simples dans leur stratégie, sont très efficaces et donnent directement, en plus du point optimal, son intervalle de confiance.

I.5.4.3 Méthodes itératives linéaires

Ces méthodes visent à diminuer itérativement la distance de structure d'un objet et d'un modèle linéaire :

$$S(n) = a_0 e(n) + \dots + a_1 e(n-i) + \dots + a_N e(n-N) \quad (1.15)$$

On introduit : $D(O, M) = \sum_j (a_j^M - a_j^O)^2$ à chaque pas, si l'on cherche $a_j^M(n+1)$ tel que :

$D(O, M)_{(n+1)} \leq D(O, M)_{(n)}$. On montre qu'en choisissant D sous sa forme la plus simple :

$$a_j^M(n+1) = a_j^M(n) - \frac{\lambda \varepsilon(n) e(n-j)}{\sum_j e(n-j)^2} \quad (1.16)$$

avec : $0 \prec \lambda \prec 2$; $\varepsilon(n) = S_M(n) - S_O(n)$.

I.5.5 Identification des systèmes continus d'ordre élevé

Pour les systèmes continus d'ordre élevé, on observe les méthodes de Strejč, Broida, Schwarze et Hudzovic. Les deux dernières sont des extensions de la première [3, 4,5].

I.5.5.1 Méthode de Strejč

La méthode d'identification de STREJC est basée sur les propriétés géométriques de la réponse indicielle d'un système d'ordre n de fonction de transfert (figure 1.11):

$$W(p) = \frac{k}{(1 + Tp)^n} e^{-\tau p} \quad (1.17)$$

Cette méthode, nous permet d'identifier les paramètres Suivant: k , T , n et τ ?

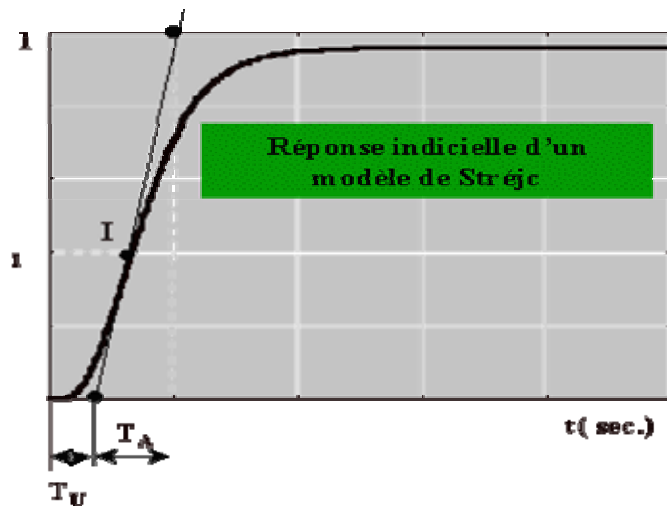


Figure 1.11 : Caractéristique de Strejč

Pour la méthodologie, en se basant sur la réponse indicielle d'un tel système, il est aisé d'établir les

relations suivantes : $\frac{T_u}{T_A} = F_1(n)$; $\frac{T_u}{T} = F_2(n)$; $\frac{T_A}{T} = F_3(n)$, $Y_I = F_3(n)$

● Détermination de K

Le coefficient de proportionnalité K est déterminé des conditions d'expériences comme le rapport

de l'amplitude du signal de sortie à celui d'entrée : $k = \frac{\Delta Y_s(\infty)}{\Delta X}$

● Détermination de n

On trace le mieux possible la tangente au point d'inflexion de la réponse indicielle;

La tangente découpe un segment T_A sur l'axe des temps au bout d'un certain temps T_u (comportant un temps de retard inconnu).

On calcule le rapport T_U / T_A et on choisira du tableau, la valeur de T_U/T_A qui correspond à une valeur de n entier, immédiatement inférieure. A titre d'exemple, si $T_U=3S$, $T_A=11$, alors $T_U / T_A = 3/11=0,27$; La valeur de n entier la plus proche inférieure sera égale à $n=3$.

● Détermination de la constante de temps T

Connaissant la valeur de n , T_A (ou T_U), on détermine la constante du temps T à l'aide de l'une des deux dernières colonnes du tableau.

Dans notre cas, pour $n=3$, $T_A / T = 3,695$ alors $T = T_A / 3,695 = 3,2\text{sec.}$ (voir tableau 1.1):

n	T_u/T_a	T_u/T	T_a/T	Y_N	T_1/T	T_m/T	T_m/T_a
1	0	0	1	0	0	1	1
2	0.404	0.282	2.718	0.264	1	2	0.736
3	0.218	0.805	3.695	0.323	2	2.5	0.677
4	0.319	1.425	4.465	0.353	3	2.888	0.674
5	0.104	2.100	5.119	0.371	4	3.219	0.629
6	0.493	2.811	5.699	0.384	5	3.510	0.616
7	0.570	3.549	6.226	0.394	6	3.775	0.606
8	0.642	4.307	6.711	0.401	7	4.018	0.599
9	0.709	5.081	7.164	0.407	8	4.245	0.593
10	0.773	5.869	7.590	0.413	9	4.458	0.587

Tableau 1.1 : Tableau donnant les paramètres du modèle de Stréjč .

● Détermination du temps de retard fictif τ

Afin de compenser l'erreur due à la détermination du point d'inflexion, on introduit un retard fictif $\tau = T_{UR} - T_{UT}$ (T_{UT} : déterminée du tableau de Stréjč). T_{UR} : Valeur réelle de la grandeur T_U fixée sur la réponse indicielle.

I.5.5.2 Méthode de Broida

Broida a proposé le calcul suivant pour approcher un système, à partir de sa réponse indicielle, par le transfert (figure 1.12):

$$\left\{ \begin{array}{l} W(p) = \frac{e^{-Rp}}{1 + \tau p} \\ \tau = 5.5 * (t_2 - t_1) \\ R = 2.8 * t_1 - 1.8 * t_2 \end{array} \right. \quad (1.18)$$

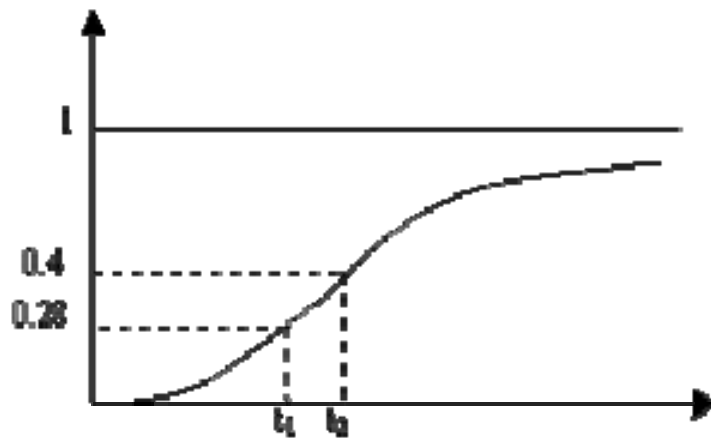


Figure 1.12 : Caractéristique de Broida

I.5.5.3 Méthode de Schwarze

Cette méthode permet de déterminer une fonction de transfert qui est une extension du modèle strejć de la forme (figure 1.13):

$$F_n(p) = \frac{1}{(1 + \tau p)(1 + b \tau p)^{n-1}} \quad (1.19)$$

Sur la courbe de la réponse indicielle normalisée, on prélève les instants $t_{0.1}$, $t_{0.5}$ et $t_{0.95}$ correspondant aux valeurs respectives 0.1, 0.5 et 0.9 de la réponse.

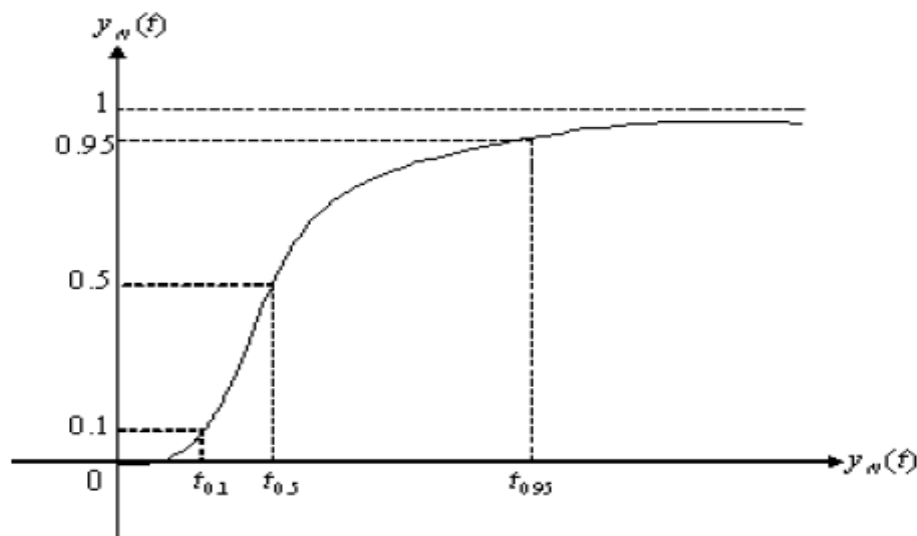


Figure 1.13 : Modèle de Schwarze

I.5.5.4 Méthode de Hudzovic

Dans les méthodes précédentes, les constantes de temps du système sont pratiquement toutes identiques. Pour pallier à cet inconvénient, [Hudzovic,1973] propose un modèle de la forme (figure 1.14) :

$$F_N(p) = \frac{1}{\prod_{k=0}^{n-1} (1 + \tau_k p)} \quad (1.20)$$

Les n constantes de temps sont de la forme : $k=0, \dots, n-1$; $\tau_k = \frac{\tau}{1 - k \frac{\rho}{n-1}}$

Où T est la constante de temps la plus petite, et ρ est le paramètre de dispersion des constantes de temps ($0 \leq \rho < 1$)

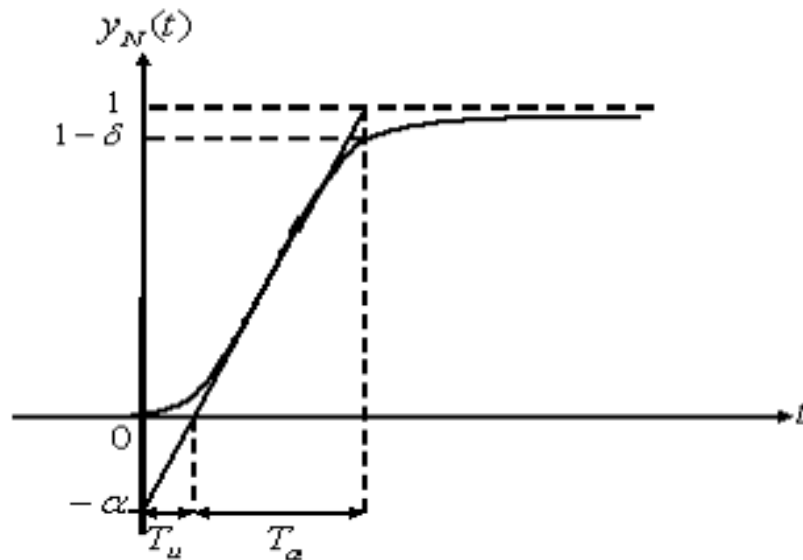


Figure 1.14 : Réponse indicielle normalisé du modèle de Hudzovic

A partir de la réponse indicielle normalisée, la tangente au point d'inflexion permet d'obtenir les paramètres

$$T_a, \alpha = T_u / T_a \text{ et } \delta = 1 - y_N(T_u + T_a).$$

I.5.6 Identification de caractéristiques dynamiques

I.5.6.1 Position du problème [6]

Considérons un modèle à une entrée, une sortie, décrit par sa transmittance échantillonnée (Fig. 1.15):

$$y(t) = Z^{-d} \frac{B(Z^{-1})}{A(Z^{-1})} u(t) \tag{1.21}$$

Avec : $A(Z^{-1}) = 1 + a_1 Z^{-1} + a_2 Z^{-2} + \dots + a_n Z^{-n}$

$$B(Z^{-1}) = b_0 + b_1 Z^{-1} + b_2 Z^{-2} + \dots + b_n Z^{-n}$$

$y(t)$: sortie ;

$u(t)$: signal de commande ;

d : le retard supposé être un multiple entier de la période d'échantillonnage.

La relation entrée-sortie du système s'écrira alors sous la forme :

$$y(k) = -a_1 y(k-1) - \dots - a_n y(k-n) + b_0 u(k-d) + \dots + b_n u(k-d-n) + e(k) \quad (1.22)$$

Dans laquelle $e(k)$ est une grandeur aléatoire représentative de l'erreur de modélisation ou de l'effet des perturbations agissant sur le processus. Cette séquence de bruit, sera supposée être indépendante, à moyenne nulle, du second ordre, c.à.d. à variance finie:

$$E\{e^2(k)\} = \sigma^2 \quad (1.23)$$

Le problème à résoudre est le suivant : compte tenu des informations (mesures entrées-sorties) que l'on peut recueillir sur le processus, déterminer ou estimer les paramètres $(\dots, a_i, \dots, b_i, \dots)$ du modèle (équation (1.22)).

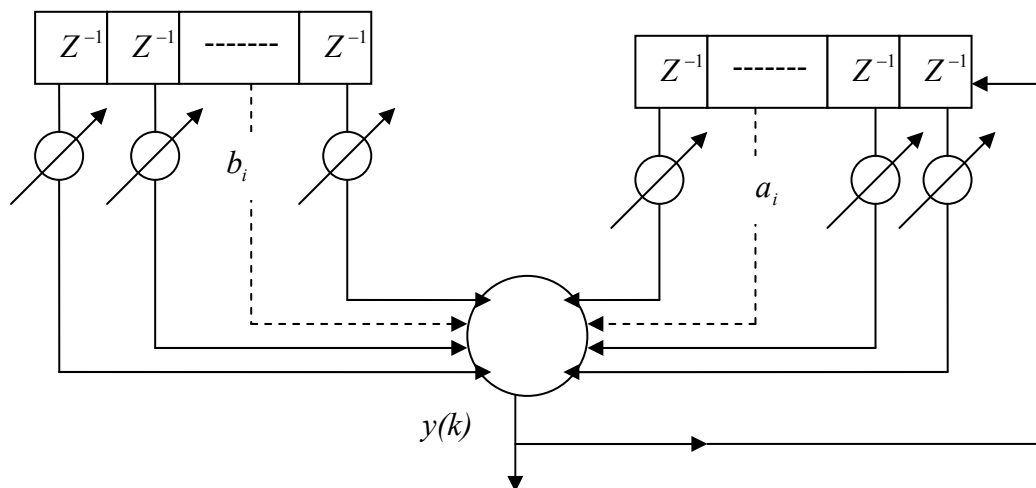


Figure 1.15 : Schéma bloc du modèle (approche).

I.5.6.1 Méthode des moindres carrés simple

Effectuons une série de N mesures de l'entrée et de la sortie du processus. On suppose que $N > (2n+1)$ (nombre de paramètres à identifier) et d un retard connu. Ces N échantillons vérifieront l'équation vectorielle suivante :

$$\begin{bmatrix} y(k+1) \\ \dots \\ y(k+N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -y(k) & -y(k-1) & \dots & -y(k-n+1) & u(k+1-d) & \dots & u(k+1-d-n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -y(k+N-1) & -y(k+N-2) & \dots & -y(k+N-n) & u(k+N-d) & \dots & u(k+N-d-n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ \dots \\ b_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e(k+1) \\ \dots \\ e(k+N) \end{bmatrix} \quad (1.24)$$

Que l'on pourra écrire sous la forme :

$$\underline{y}_N = H \underline{\theta} + \underline{e} \quad (1.25)$$

L'expression de l'estimation du vecteur $\underline{\theta}$, au sens des moindres carrés s'écrit [7, 8]:

$$\hat{\underline{\theta}}_N = (H^T H)^{-1} H^T \underline{Y}_N \quad (1.26)$$

La matrice $H^T H$ est une matrice symétrique de dimension $(2n+1)(2n+1)$ qui peut s'écrire sous la forme suivante :

$$H^T H = \begin{bmatrix} \alpha_{ij} & & \\ & \beta_{ij} & \\ & & \gamma_{ij} \end{bmatrix} \quad (1.27)$$

Avec: $\alpha_{ii} = \sum_{t=k-i+1}^{k+N-i} y^2(t) \quad i=1, \dots, N$

$$\alpha_{ij} = \sum_{t=k-i+1}^{k+N-i} y(t)y(t-j+1) \quad j>i; j=2, \dots, n$$

$$\beta_{ij} = - \sum_{t=k}^{k+N-i} y(t)u(t+i-d-j+1) \quad j=1, \dots, n+1$$

$$\gamma_{ii} = \sum_{t=k-i+2}^{k+N-i+1} u^2(t-d) \quad i=1, \dots, n+1$$

$$\gamma_{ij} = \sum_{t=k-i+2}^{k+N-i+1} u(t-d)u(t-d-j+1) \quad j>1; j=2, \dots, n+1$$

I.5.6.2 Algorithme de la méthode des moindres carrés (modèles linéaire) [7]:

Les n ensembles (x_i, y_i) étant donnés (avec leurs poids w_i)

- 1- Proposer un modèle, c'est-à-dire définir les fonctions $f_j(x)$ composant le modèle :

$$y_i^* = \sum_{j=1}^m c_j f_j(x_i)$$

- 2- Calculer les termes :

$$\begin{cases} a_{kj} = \sum_{i=1}^n f_j(x_i) f_k(x_i) w_i & k=1, m; j=1, m \\ b_k = \sum_{i=1}^n w_i y_i f_k(x_i) \end{cases} \quad (1.28)$$

- 3- Résoudre le système linéaire à matrice symétrique :

$$\sum_{j=1}^m a_{kj} c_j = b_k$$

I.6 Conclusion

La modélisation dépend de la nature physique du système mais aussi des hypothèses simplificatrices qu'il est possible de faire. Traitant plus dans ce cours des systèmes dynamiques, leur comportement sera décrit par des équations différentielles dans le cas de modèles en temps continu ou par des équations récurrentes dans le cas de modèles en temps discret. Ces équations peuvent être ordinaires dans le cas de systèmes à paramètres localisés dans l'espace ou à dérivées partielles pour les systèmes à paramètres répartis.

Un modèle mathématique d'un système est un ensemble de relations mathématiques permettant de déterminer la relation entre l'entrée et la sortie du système.

On peut dire que le système S transforme l'entrée X à la sortie Y^S , au moyen d'un opérateur f^S . On peut écrire: $Y^S = f^S(X)$.

En général, le vecteur de variables de sortie dépend des conditions extérieures de coefficient 'C'. Si on considère un système avec une seule variable de sortie : $y = f(X, C)$. Soit une suite de valeurs y_i expérimentales pour différentes t_i ($i = 1, \dots, N$).

Pour notre étude nous appliquerons comme technique d'identification, la méthode de **Strejc** pour trouver le modèle numérique décrivant la variation du rendement dans filtre électrostatique.

CHAPITRE II

Généralités sur le fonctionnement des électrofiltres

II.1 Introduction

Au cours des dernières décennies, les exigences en matière d'efficacité des mesures de protection de l'environnement ont évolué considérablement, ce qui a imposé la mise au point de technologies innovatrices susceptibles d'être à la hauteur des dispositions légales de plus en plus strictes. Ce phénomène extrêmement complexe est devenu de nos jours l'objet d'observations continues de plusieurs organisations internationales, car les conséquences de la pollution atmosphérique ignorent les frontières des pays ou des régions de la terre. Parmi les moyens de filtration utilisés, une place très importante revient aux précipitateurs électrostatiques. Ces installations de filtration sont largement utilisées depuis le début du 20^{ème} siècle pour retenir les particules présentes dans les gaz résultants, par exemple, de l'industrie métallurgie, l'industrie chimique ou celle de ciment ainsi que pour épurer les gaz produits par les centrales électriques brûlant du charbon [9].

II.2 Architecture des précipitateurs électrostatiques

Deux formes principales de filtres électrostatiques se sont imposées dans le temps : les électrofiltres appelés plaque – plaque où les électrodes de collecte sont des plaques parallèles et des électrodes cylindriques, où les électrodes de dépôt sont des cylindres. De plus, ces deux catégories d'électrofiltres peuvent être réalisées en un seul ou deux étages. La figure (2.1) montre un précipitateur électrostatique typique.

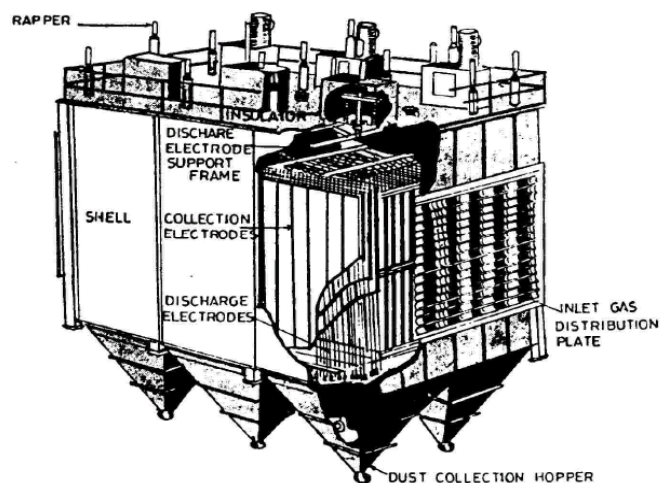


Figure 2.1 Précipitateur électrostatique typique

II.2.1 Electrofiltre à un seul étage

A cause de leur construction plus simple et de leur robustesse en fonctionnement, les électrofiltres à un seul étage sont les plus utilisés dans les applications industrielles. La charge et la collecte des particules sont réalisées simultanément tout au long du filtre.

Parmi les électrofiltres à un seul étage, ceux du type plaque – plaque sont les plus répandus. Ici, les électrodes de dépôts sont des plaques parallèles et équidistantes et le gaz est ionisé à partir d'électrodes ionisantes situées dans les plans verticaux à mi-distance entre les plaques (figure 2.2.a). En général, les électrodes de collecte sont soumises périodiquement au frappement, ce qui permet de décoller les agrégats afin de les retenir dans des bacs spéciaux placés dans la partie inférieure du filtre.

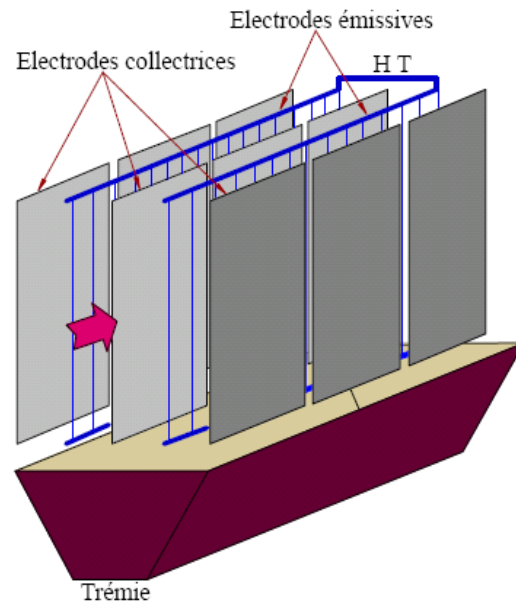
Les précipitateurs industriels ayant des longueurs de plusieurs dizaines de mètres, sont divisés en plusieurs segments nommés champs. Chaque champ a sa propre alimentation électrique, indépendante des autres parties de l'électrofiltre; cela permet l'adaptation des conditions électriques en fonction de la taille et de la concentration des particules dans chaque champ.

Dans le cas des précipitateurs fil- cylindre, l'électrode ionisante est tendue le long de l'axe du cylindre placé verticalement (figure 2.2.b). Classiquement, le dépôt de particules formé sur la face intérieure du cylindre est nettoyé par l'intermédiaire d'un film liquide. Ainsi, les agglomérats se détachent et, sous l'influence de la gravité, ils tombent dans les trémies situées dans la partie inférieure du filtre. C'est pour cette raison que ce type de filtre électrostatique est fréquemment utilisé pour enlever des particules liquides (divers acides, huiles), le goudron, etc.

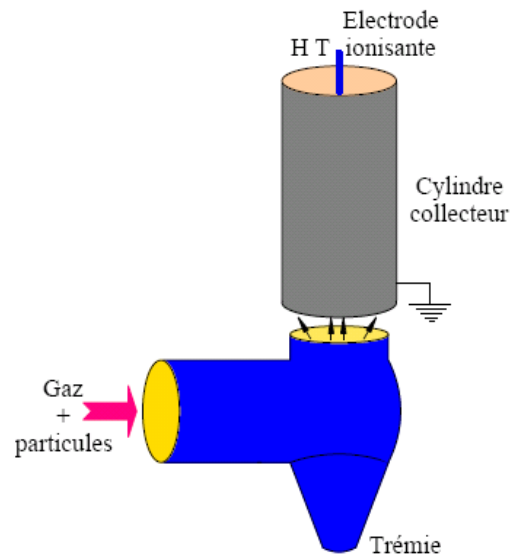
En dehors des électrodes de collecte et d'ionisation (souvent appelées électrodes émissives ou injectrices), un filtre électrostatique comporte aussi des systèmes de frappement et d'extraction des poussières, un dispositif de répartition des gaz, constitué en général par des grilles ou des chicanes placées en amont, ainsi qu'une alimentation haute tension. Lors du dimensionnement d'un précipitateur plusieurs paramètres doivent être pris en considération. Parmi ceux-ci, les plus importants sont : la concentration et la nature des poussières (granulométrie et résistivité électrique des particules), la vitesse moyenne et la température du gaz à travers le filtre, les pertes de pression acceptées par l'installation, etc. ...

Les précipitateurs électrostatiques sont alimentés par une tension positive ou négative. Cependant, pour une configuration d'électrodes donnée, la valeur du potentiel électrique à partir de laquelle se produit l'amorçage de la décharge couronne, ainsi que celle du potentiel de claquage entre les électrodes sont plus grandes en polarité négative. Afin d'obtenir un

maximum d'intensité du champ électrique et d'efficacité de collecte, les électrodes d'ionisation des filtres industriels sont portés à un potentiel négatif et les plaques collectrices sont reliées à la terre.



a)



b)

a) Type plaque – plaque

b) Type fil - cylindre

Figure 2.2 Vue schématique d'un filtre électrostatique

II .2.2 Electrofiltres à deux étages

Les filtres électrostatiques à double étage ont une construction plus compliquée ce qui conduit à des coûts de fabrication plus élevés. C'est la principale raison pour laquelle ces appareils ont des dimensions réduites et sont utilisés principalement pour la filtration de l'air ambiant dans certains bâtiments et halles de production. Les deux sections d'un tel électrofiltre sont alimentées séparément en tension ce qui nécessite en général une double source de tension ainsi que des câblages électriques séparés. Le premier étage nommé ioniseur, comporte des électrodes de décharge en forme de fil ou de tube. Les électrodes de collecte peuvent être soit des plaques parallèles et équidistantes, soit des cylindres coaxiaux.

La figure (2.3) présente une vue schématique d'un précipitateur électrostatique à deux étages ayant des électrodes de collecte sous forme de plaques. Un problème pour ce type de précipitateurs est l'impossibilité d'utiliser le système de frappe car il provoque le réenvol des poussières non chargées. Le lavage des électrodes est donc adopté. Afin d'avoir une production d'ozone la plus faible possible, les électrodes couronne sont portées à un potentiel électrique de polarité positive [10].

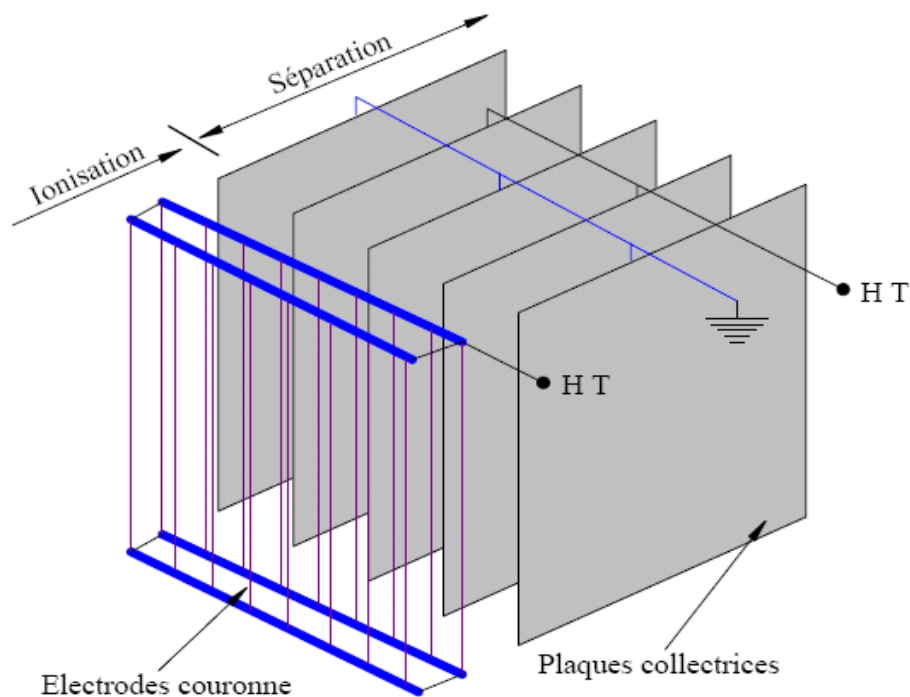


Figure 2.3 Vue schématique d'un précipitateur électrostatique à double étage avec des électrodes de collecte planes

II.2.3 Electrofiltres à sec et à liquide

Les électrofiltres peuvent être classifiés, selon le procédé qu'ils utilisent, en précipitateurs à sec et précipitateurs à liquide. Si les fines particules sont enlevées des électrodes de collecte seulement par grattage ou par vibration, on parle de précipitateur à sec. Si de l'eau ou un autre fluide est utilisé pour leur élimination, on parle de précipitateur à liquide.

Pour les précipitateurs électrostatiques usuels, il existe une valeur de la résistivité des particules au delà de laquelle les performances de séparation sont terriblement dégradées ; une possibilité consiste alors à utiliser des électrofiltres dits humides (à liquide). En comparaison avec les électrofiltres classiques (sec), ceux humides utilisent en plus un film d'eau pour enlever le dépôt sur les surfaces des électrodes de collecte. La réalisation technique est beaucoup plus compliquée car, dans ce cas, il est nécessaire d'ajouter un système de pompage et de distribution d'eau sur les électrodes de dépôt. En plus, l'effluent à traiter est au préalable saturé en vapeur d'eau ce qui demande une très bonne régulation du courant à travers l'espace inter- électrodes afin d'éviter des courts circuits. Tout ceci conduit à des coûts d'investissements et à des dépenses d'énergie très élevée par rapport aux électrofiltres secs. Malgré ces inconvénients, les électrofiltres humides sont présents dans certaines applications pratiques en raison de quelques avantages, parmi lesquels les plus importants sont :

- Les rendements de filtration sont supérieurs à ceux des électrofiltres secs ;
- Le réentraînement des particules collectées est inexistant ;
- Les performances de séparation sont indépendantes de la résistivité des poussières.

Cependant, ce sont les filtres électrostatiques de type plateaux (les électrodes de collecte sont composées de plateaux parallèles) utilisant le procédé à sec qui sont les plus utilisés.

II.3 Description du fonctionnement d'un électrofiltre

Le fonctionnement d'un électrofiltre est relativement simple, mais la description et la compréhension de tous les phénomènes entrant en jeu dans la filtration est encore un sujet d'étude largement traité. Le principe des précipitateurs électrostatiques repose sur le passage du gaz porteur de particules entre deux électrodes (fil- cylindre, fil- plan, ...), où est appliquée une forte différence de potentiel. Due à la dissymétrie des électrodes, une décharge électrique est générée, utilisée comme source d'ions qui va permettre de charger les particules en suspension dans le gaz. Les particules chargées sont ensuite déviées par le champ électrique, et migrent vers la contre-électrode où elles sont collectées (figure 2.4

L'accumulation de particules sur l'électrode de collecte nuisant à l'efficacité du procédé, le nettoyage des plaques est effectué régulièrement. Si les particules sont liquides, le liquide tombe de l'électrode par gravitation. Si les particules sont solides, la couche de poussière collectée sur l'électrode est périodiquement enlevée en frappant les électrodes.

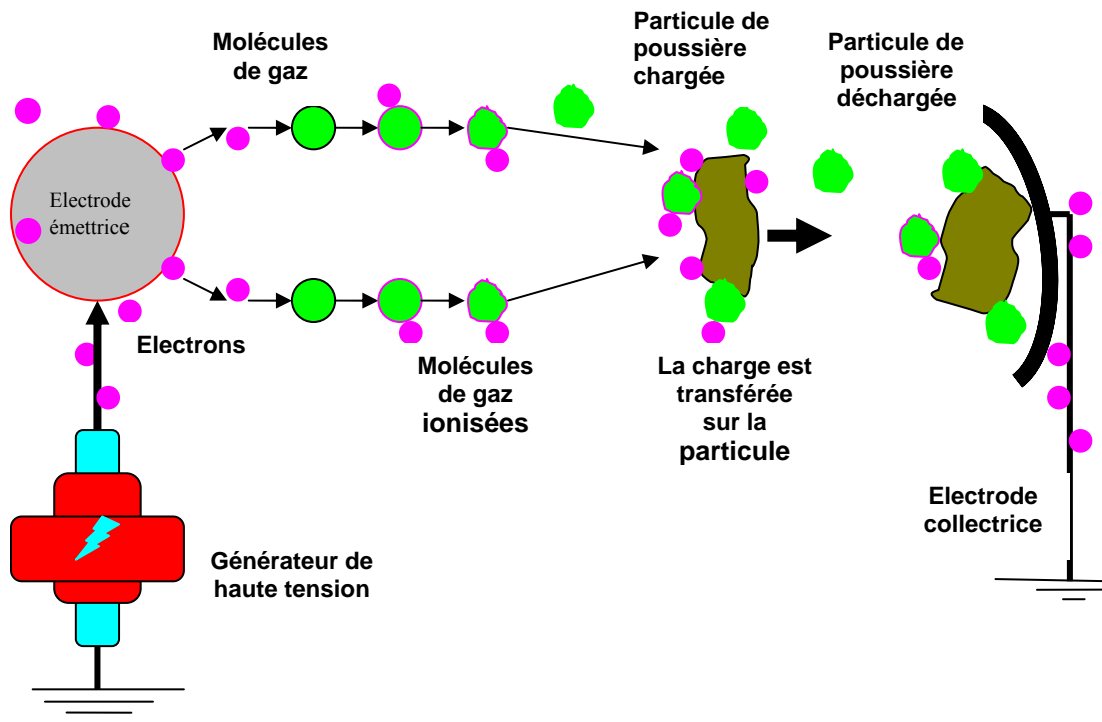


Figure 2.4 Principe général de fonctionnement d'un électrofiltre [10].

Dans les installations industrielles, la décharge électrique est souvent négative, et donc les particules sont chargées négativement. Ce choix est dû à la tension de passage à l'arc, plus grande, pour une géométrie donnée, en polarité négative qu'en polarité positive.

Les conditions de fonctionnement d'un filtre électrostatique sont :

- une tension suffisante entre électrodes pour donner naissance à l'effet de l'ionisation qui charge les particules.
- une longueur L suffisante pour qu'une particule située près de l'électrode de décharge puisse sous l'effet du champ électrique, arrive à l'électrode collectrice.

Pour calculer la longueur L minimale d'un filtre efficace, il est nécessaire de résoudre l'équation du mouvement d'une particule chargée dans un champ électrique inhomogène :

$$m_p \frac{d^2 r}{dt^2} + \sum_i F_i = qE(r, t) \quad (2.1)$$

où r est le vecteur de position de la particule ;

E : le champ électrique ;

m_p : la masse de la particule ;

q : la charge de la particule ;

$\sum F_i$: Représente la somme des forces supplémentaires sur la particule telles que la viscosité, la gravité, etc.

En principe, un précipitateur électrostatique se compose de six éléments majeurs :

- Une source de haute tension ;
- Des électrodes de décharge et des électrodes de collecte ;
- Entrée et sortie pour le gaz ;
- Un moyen pour l'élimination des substances collectées (normalement un récipient) ;
- Un système électronique de nettoyage ;
- Un boîtier extérieur pour enfermer les électrodes (carcasse du précipitateur).

Les gaz peuvent ou non être prétraités avant d'entrer dans le précipitateur. Le prétraitement pourrait consister en l'enlèvement d'une partie de la charge en fines particules, en utilisant certains collecteurs mécaniques, ou en additionnant de produits chimiques au gaz pour changer les propriétés physiques du gaz, dans le but d'améliorer l'action du précipitateur.

L'ensemble du précipitateur électrostatique est enfermé dans un boîtier. La configuration géométrique peut être rectangulaire ou cylindrique. Dans tout les cas, il y a des manches d'entrée et de sortie pour les gaz, des récipients pour la collecte des matières précipitées, ainsi que l'électrode de décharge nécessaire et les surfaces de collecte. Habituellement, il y aura un appentis sur le précipitateur. C'est une enceinte sur le précipitateur, imperméable au gaz et résistant au climat, qui loge les isolateurs de haute tension.

Les précipitateurs sont normalement construits avec un nombre de composants auxiliaires, y inclus les portes d'accès, des coulisseaux, des dispositifs de sécurité et les

systèmes de distribution de gaz. Le système de collecte comprend des surfaces de collecte où les fines particules se déposent. De plus, un dispositif de grattage ou de vibration des surfaces de collection est installé de telle manière que les particules déposées puissent être enlevées. Le système de haute tension englobe l'électrode de décharge et les isolateurs. L'isolateur électrique est nécessaire pour des raisons de sécurité. Le récipient fait partie intégrante de la carcasse du précipitateur, il est fabriqué de la même matière. Sa fonction est de collecter la matière précipitée pour l'élimination finale.

Pour leur fonctionnement, les précipitateurs électrostatiques nécessitent une source de courant continu à haute tension. Par conséquent, des transformateurs sont requis afin de transformer la tension normale de service en haute tension. Les redresseurs convertissent le courant alternatif en courant continu.

II.4 Efficacité d'un électrofiltre

Pour exprimer l'efficacité d'un filtre vis à vis d'un aérosol donné, nous considérons trois quantités :

- La quantité d'aérosol en amont du filtre (q_{am}) ;
- La quantité d'aérosol en aval du filtre (q_{av}) ;
- La quantité d'aérosol retenue par le filtre ($q_{am} - q_{av}$).

A partir de ces trois quantités, nous pouvons exprimer trois rapports :

- Le rendement R_E (ou η) qui est le rapport de la quantité d'aérosol retenue par le filtre sur la quantité d'aérosol en amont :

$$R_E (\%) = \frac{q_{am} - q_{av}}{q_{am}} \cdot 100 \quad (2.2)$$

- La perméance P_E qui est le rapport de la quantité d'aérosol en aval sur la quantité d'aérosol en amont :

$$P_E (\%) = \frac{q_{av}}{q_{am}} \cdot 100 \quad (2.3)$$

- Le coefficient d'épuration C_E qui est le rapport de la quantité d'aérosol en amont sur la quantité d'aérosol en aval :

$$C_E (\%) = \frac{q_{am}}{q_{av}} \cdot 100 \quad (2.4)$$

Il existe différentes méthodes de mesure de l'efficacité d'un filtre ; chaque méthode est caractérisée par un aérosol d'essai et par le procédé de mesure des quantités d'aérosol.

L'association européenne des constructeurs de matériel aéronautique (EUROVENT), puis l'organisation internationale de normalisation (ISO) ont normalisé quelques unes des méthodes de mesure. Nous distinguons trois grandes familles de méthodes de mesures. Les deux premières comprennent les filtres dits filtres de ventilation générale, avec une famille pour les filtres dits à moyenne efficacité et une autre pour les filtres dits à haute efficacité ; les filtres de la troisième famille dits à très haute efficacité captent les particules submicroniques.

L'efficacité globale de filtration peut être calculée à partir de l'équation de diffusion des particules (x est dans le sens de l'écoulement, sens longitudinal, y perpendiculaire à la paroi de l'électrofiltre, sens transversal, $D_{p,i}$ coefficient de dispersion dans la direction considérée)

$$D_{p,y} \frac{\partial^2 C_p}{\partial y^2} + D_{p,x} \frac{\partial^2 C_p}{\partial x^2} + v_e \frac{\partial C_p}{\partial y} - v_m \frac{\partial C_p}{\partial x} = 0 \quad (2.5)$$

où C_p est la concentration des particules (m^{-3}).

La théorie de Deutsch [11] est habituellement utilisée pour estimer l'efficacité des précipitateurs et pour déterminer les caractéristiques des nouveaux PES construits. Cette théorie suppose que l'écoulement du gaz est turbulent avec une vitesse moyenne v_0 , et que la densité de particules est uniforme dans la direction transversale. D'importants travaux ont été réalisés dans le but de mieux tenir compte des phénomènes aérodynamiques intervenant dans la précipitation et ensuite d'améliorer la théorie de Deutsch.

Les efficacités théoriques des modèles de Deutsch, Cooperman, Leonard et Zhiblin sont synthétisées par Kim [12, 13], et sont des solutions analytiques plus au moins simplifiées de l'équation de diffusion:

$$\eta_{Deutsch} = 1 - \exp\left(-\frac{v_e \cdot L}{v_m \cdot H}\right) \quad (2.6)$$

$$\eta_{Cooperman} = 1 - \frac{2 \exp\left(\frac{v_e \cdot H}{4D_{p,y}}\right)}{\pi \cdot \left(\frac{v_e \cdot H}{4D_{p,y}}\right)} \cdot \exp\left(-\frac{v_e^2 \cdot L}{4v_m \cdot D_{p,y}}\right) \quad (2.7)$$

$$\eta_{Leonard} = 1 - \int_0^1 P \left[\frac{\xi - \left(\frac{v_e \cdot L}{v_m \cdot H} \right)}{\sqrt{2 \left(\frac{v_e \cdot L}{v_m \cdot H} \right) \left(\frac{v_e \cdot H}{D_p} \right)}} \right] d\xi \quad (2.8)$$

$$\eta_{Zhibin} = 1 - \sqrt{\frac{v_e \cdot H / D_p}{4\pi \left(\frac{v_e \cdot L}{v_m \cdot H} \right)}} \int_0^1 \exp \left[-\frac{\left(\frac{v_e \cdot H}{D_p} \right)}{4 \left(\frac{v_e \cdot L}{v_m \cdot H} \right)} \left(\xi - \left(\frac{v_e \cdot L}{v_m \cdot H} \right) \right)^2 \right] d\xi \quad (2.9)$$

avec : D_p : le coefficient de distorsion ;

v_e : la vitesse effective de migration de la poussière chargée vers la surface de précipitation (valeur empirique) ;

v_m : la vitesse moyenne du gaz ;

H : la distance fil- plaque ;

L : la longueur du précipitateur électrostatique ;

P : la pression absolue.

Xiangrong [14] propose une solution analytique de l'équation de diffusion turbulente des particules chargées en géométrie fil- plaque, en prenant pour hypothèse un flux nul au niveau des fils haute tension (condition de symétrie). L'efficacité est donnée par la relation suivante :

$$\eta_{Xiangrong} = 1 - \exp \left(-F \frac{v_e \cdot L}{v_m \cdot H} \right) \quad (2.10)$$

$$\text{Avec } F = \frac{v}{v_e} \cdot \frac{P_{e_x}}{2} \left\{ \left[1 + \frac{v_e}{v_m} \cdot \frac{P_{e_y}}{P_{e_x}} \left[1 + \left(\frac{2\theta}{P_{e_y}} \right)^2 \right] \right]^{\frac{1}{2}} - 1 \right\} \quad (2.11)$$

$$\tan \theta = \frac{4 \left(\frac{\theta}{P_{e_y}} \right) (F-1)}{\left(\frac{2\theta}{P_{e_y}} \right)^2 + 2F - 1} \quad (2.12)$$

$$P_{e_i} = \frac{v_e \cdot H}{D_{p,i}} \quad (2.13)$$

Les valeurs de F et de θ sont trouvées itérativement par approches successives. La différence par rapport à l'équation de Deutsch est la prise en compte d'une diffusion longitudinale et radiale.

Généralement, le rendement de collecte d'un précipitateur électrostatique est élevé, approchant les 100%. Plusieurs installations ont des rendements de 98% et de 99%. Quelques matières s'ionisent plus facilement que d'autres et sont ainsi plus appropriés pour l'élimination par précipitation électrostatique. Pour les brumes d'acide et les unités de récupération catalytiques, les rendements dépassent souvent 99% ; pour le carbone noir, le rendement normal de collecte est inférieur à 35%, à cause de sa tendance de s'agglomérer. Cependant, par une combinaison adéquate d'un précipitateur électrostatique avec un collecteur cyclonique, on peut obtenir de hauts rendements pour cette matière.

II.5 Modèles numériques des électrofiltres

La modélisation numérique du fonctionnement des électrofiltres a commencé dans les années 70 ; c'est l'époque où les moyens électroniques de calcul ont commencé à se répandre rapidement. Avec l'augmentation de la capacité et de la vitesse de calcul des ordinateurs, des algorithmes de plus en plus complexes sont mis en œuvre avec succès par McDonald [15] en 1978, Lawless [16] en 1989, Lawless & Altman en 1994, etc.... Le principe de base de ces modèles consiste à prendre en compte les phénomènes physiques les plus importants mis en jeu au sein des électrofiltres en simplifiant dans le même temps les équations mathématiques qui décrivent ces phénomènes.

Les premiers modèles numériques [17] ont été développés en utilisant l'équation de Deutsch pour caractériser le transport des particules à l'intérieur du filtre. La vitesse de migration était calculée en tenant compte des distributions locales du champ électrique et de la charge d'espace ionique déterminées numériquement. Avec la vitesse de migration déterminée à partir de ces résultats, l'efficacité de collection était calculée par le modèle de Deutsch, pour chaque classe granulométrique. La comparaison avec des résultats expérimentaux obtenus sur des installations industrielles conduisait à déterminer des coefficients de correction pour prendre en compte les effets qui tendent à diminuer le rendement de séparation.

D'autres modèles numériques plus élaborés ont vu le jour dans les années plus récentes. En 1995 Cristina et Feliziani [18] ont développés un modèle numérique prenant en compte les effets électroaérodynamiques. En 1997 Meroth [19] et Tochon [20], ainsi que Medlin [21]

en 1999, Nikas [22] en 2005 et Neimarlija [23] en 2009 ont développé des travaux en essayant de considérer aussi l'effet de la dynamique du gaz et des poussières, l'évolution de la charge des particules le long de leur trajectoire, le taux de turbulence du flux gazeux, etc....

Les équations de base gouvernant le phénomène de la décharge couronne dans Un électrofiltres se ramènent aux équations de Maxwell de l'électrostatique auxquelles s'ajoutent les équations du milieu considéré (l'air dans notre cas). Ces équations sont :

$$\nabla \cdot \vec{E} = \pm \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1.14)$$

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0 \quad (1.15)$$

$$\vec{J} = \pm \rho \cdot \mu \cdot \vec{E} \quad (1.16)$$

$$\vec{E} = -\nabla \phi \quad (1.17)$$

$$\nabla^2 \phi = \mp \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1.18)$$

où :

- \vec{E} est le vecteur champ électrique (V/m). Le signe dans l'équation (IV-1) est positif si l'électrode active est soumise à une tension de polarité positive et négatif dans le cas contraire.
- ϕ est le potentiel électrique (V)
- ρ est la densité de la charge d'espace (C/m^3), elle est toujours positive. Le signe dans (IV-5) est négatif si l'électrode active est soumise à une tension de polarité positive et positif dans le cas contraire.
- \vec{J} est le vecteur de densité de courant (A/m^2). Le signe dans (IV-3) est positif si la tension appliquée est de polarité positive et négatif dans le cas contraire.
- μ est la mobilité des ions positifs ou négatifs selon la polarité de l'électrode active ($m^2/V.s$).
- ϵ_0 est la permittivité de l'air, $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ (F/m)

L'équation (IV-5) est l'équation de Poisson, elle est obtenue en remplaçant l'expression du champ donnée par (IV-4) dans (IV-1). L'équation (IV-3) est l'équation de la densité de courant. L'équation (IV-2) est l'équation de continuité du courant. En réalité, il est extrêmement difficile de trouver une solution exacte de ces équations à cause de leur nature

non linéaire et c'est ainsi que des approches simplificatrices basées sur des modèles hypothétiques ont été développées.

Pour notre travail, La configuration utilisée en modélisation numérique est déduite du cas réel d'un précipitateur électrostatique qui trouve au niveau du laboratoire de Génie-électrique de l'université de Bejaia. Il est équivalent au modèle représenté sur la figure (2.5) suivante :

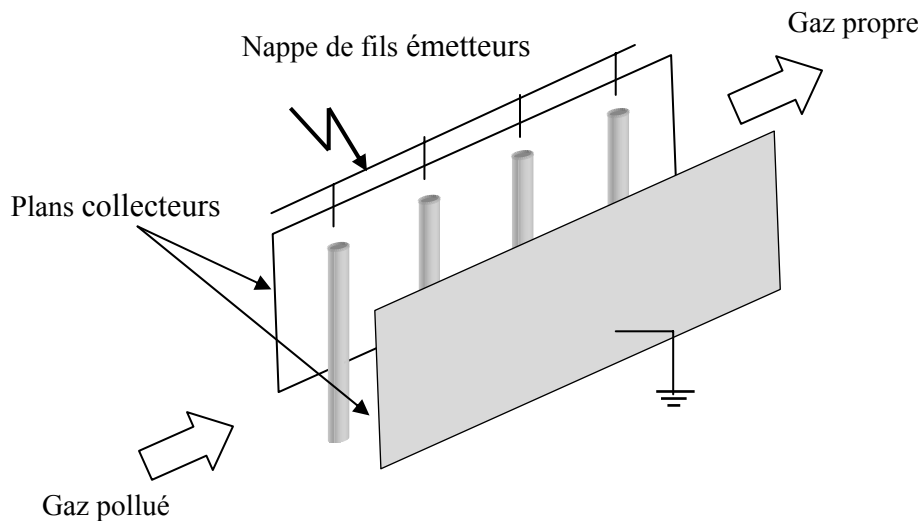
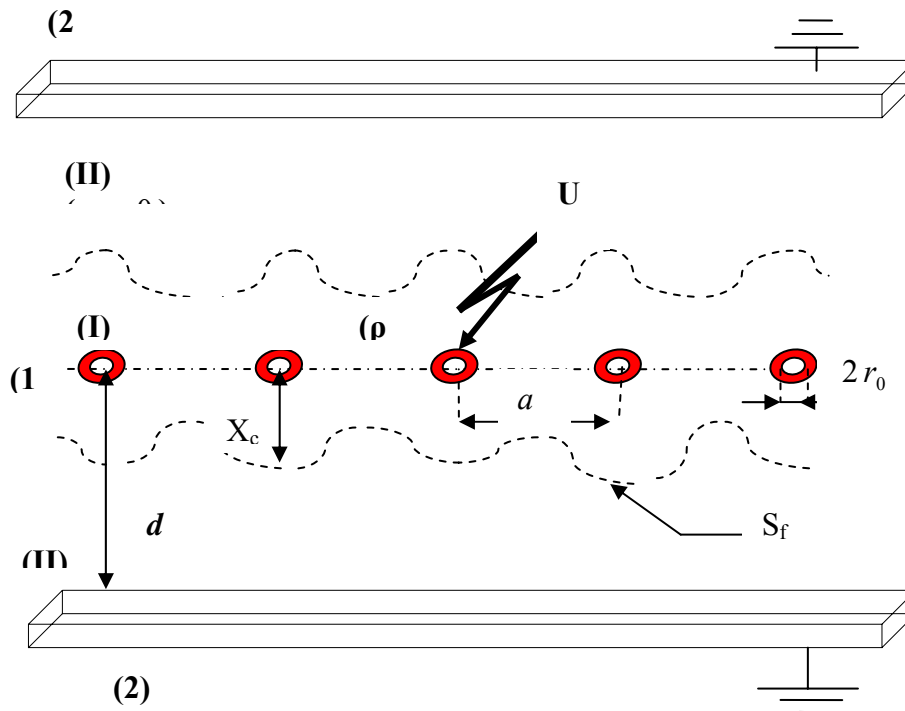


Figure 2.5 Précipitateur électrostatique ou Electrofiltre

La configuration utilisée en modélisation mathématique de notre modèle, est constituée d'une nappe de fils portée à un potentiel U et de deux plans collecteurs mis à la terre. La nappe est placée à égale distance de deux plans (fig. 2.6).

la distance entre deux fils consécutif est constante (figure 2.14).



- | | |
|---|---|
| 1 : nappe de fils. | I : zone d'active ($\rho=0$). |
| 2 : plans mis à la terre. | II : zone de dérive ($\rho \neq 0$). |
| r_0 : rayon d'un fil de la nappe. | X_c : longueur critique de l'avalanche. |
| a : distance entre deux fils voisins. | S_f : surfaces des équipotentiels. |
| d : distance entre la nappe et chaque plan. | U : tension appliquée à la nappe. |

Figure 2.6 Représentation schématique d'une décharge couronne en géométrie nappe de fils – deux plans

II.6 Application de précipitateurs industriels

Les applications importantes des précipitateurs électrostatiques dans les industries sont énumérées ci-dessous :

1. Cimenteries
 - a) Nettoyage des gaz d'échappement des fours de ciment ;
 - b) Récupération des fines particules des fours ;
2. Moulins à pulpe et à papier
 - a) récupération des fumées de soude dans les moulins à pulpe de kraft ;
3. Aciéries
 - a) Nettoyage des gaz des hauts fourneaux afin de pouvoir les utiliser comme combustible ;

- b) Elimination des goudrons du gaz des fours à coke ;
 - c) Nettoyage des gaz de foyers ouverts et des fourneaux électriques ;
4. Industrie de métaux non ferreux
- a) Récupération des matières valorisables des gaz d'échappement ;
 - b) Collecte de la brume acide ;
5. Industrie chimique
- a) Collecte des brumes d'acides sulfurique et phosphorique ;
 - b) Nettoyage de divers types de gaz, tels que l'hydrogène, le CO₂ et le SO₂ ;
 - c) Elimination des fines particules du phosphore élémentaire en état vapeur ;
6. Industrie pétrolière
- a) Récupération des fines particules des catalyseurs ;
7. Industrie du carbone noir
- a) Agglomération et collecte du carbone noir ;
10. Centrales électriques
- a) Collecte des cendres volantes des chaudières chauffées à la houille.

II.7 Avantages des précipitateurs électrostatiques

- Haut rendement de collecte ;
- Les particules aussi petites que 0,1µm peuvent être éliminées ;
- Faible coûts de maintenance et de fonctionnement ;
- Faible chute de pression ;
- Manipulation satisfaisante d'un large volume de gaz à haute température ;
- Le temps de traitement est négligeable (0,1 – 10 s) ;
- Nettoyage facile en mettant hors service certaines unités du précipitateur ;

II.8 Inconvénients des précipitateurs électrostatiques

- Hauts coûts d'installation ;
- Hauts besoin en espace, dû aux dimensions larges de l'équipement ;
- Risque d'explosions pendant la collecte de gaz combustibles ou de fines particules ;
- Pendant l'exploitation, des mesures de sécurité sont nécessaires. La distribution appropriée du flux de gaz, la résistivité du gaz, la conductivité de fines particules, et taux d'ionisation du corona doivent être maintenus avec soin ;
- Pendant l'ionisation du gaz, de l'ozone (gaz toxique) est produit par les électrodes de décharge à charge négative.

II.9 Conditions du choix d'un précipitateur électrostatique

Lorsqu'il s'agit de choisir un système de précipitation électrostatique pour éliminer la pollution en suspension dans un courant gazeux, il est important de tenir compte des éléments suivants :

- Caractéristiques des particules :
 - Dimension, formes réelles et densité des particules;
 - Propriétés physico-chimiques : adhésivité, hygroscopie, tendance à l'agglomération, fluidité, conductivité électrique, inflammabilité, toxicité, etc.
- Caractéristiques du gaz porteur:
 - Température, pression et humidité ;
 - Propriétés physique : densité, point de rosée des composés condensable viscosité, conductivité électrique, inflammabilité, toxicité, etc.
- Caractéristiques du procédé:
 - Flux de gaz constant ou variable ;
 - Débit volumique gazeux ;
 - Concentration des particules ;
 - Rendement de captation exigé ;
 - Perte de charge permise ;
 - Qualité exigée pour les produits.
- Caractéristiques de fonctionnement:
 - Entretien et continuité du fonctionnement ;
 - Sécurité et protection sanitaire ;
 - Utilisation finale des substances recueillies.
- Caractéristiques de fonctionnement:
 - Limites structurales (surface au sol et hauteur libre) ;
 - Limites physiques (pression, température) ;
 - Service d'entretien anticorrosion.

II.10 Conclusion

Les précipitateurs électrostatiques sont capables d'atteindre un rendement supérieur à 95% et même d'un rendement meilleur. Ils pourront donc satisfaire aux futures prescriptions légales imposant une teneur résiduelle en poussières encore plus faible. Le précipitateur électrostatique est un dépoussiéreur qui utilise les forces électriques pour séparer les vésicules du courant gazeux. La charge des particules résulte d'un phénomène appelé "l'effet couronne" qui apparaît lorsque nous appliquons une différence de potentiel entre deux conducteurs aux configurations géométriques appropriées. La filtration des particules et des fumées qui constituent la pollution visible a été le premier objet du traitement de l'air sur le plan technologique, il est acquis que l'utilisation des électrofiltres permet d'obtenir des résultats très satisfaisants en matière de filtration des poussières et des suies. Mais les équipements nécessaires demeurent volumineux et d'un coût élevé tout en investissement qu'en exploitation.

Les modèles récents de précipitateurs utilisent un réseau de fils à effet de couronne suivi d'un groupe de plaques métalliques parallèles mises à la terre. Ces mêmes plaques sont fréquemment secouées afin de les débarrasser des poussières. Il existe également des versions plus petites à usage domestique.

Nous allons donc procéder au chapitre suivant à une étude expérimentale sur le rendement des filtres électrostatiques. Notre tâche est limitée à l'exploitation des résultats réalisés par notre promoteur pour déterminer quelques paramètres expérimentalement.

CHAPITRE III

Etude expérimentale de la précipitation électrostatique

III.1 Introduction

Dans le cadre de ce chapitre, nous allons procéder à l'évaluation des performances des électrofiltres précédemment caractérisés électriquement. Cette évaluation consistera à déterminer leur efficacité de collecte et la vitesse des particules dans des conditions expérimentales diverses et sous contrôle. Il s'agira par exemple de relever l'efficacité de collecte en fonction de la tension, de la fréquence ou du débit. Les résultats obtenus seront analysés, puis ensuite comparés d'un modèle à l'autre. Nous situerons également les performances de ces électrofiltres par rapport à celles d'autres électrofiltres ayant fait leurs preuves ou ayant un intérêt particulier à nos yeux. Ce chapitre sera organisé en trois parties qui sont la présentation des moyens expérimentaux utilisés, la présentation des résultats obtenus avec les électrofiltres étudiés et la comparaison de ces résultats à ceux d'autres électrofiltres.

III.1 Moyens expérimentaux et techniques de mesures

III.1.1 L'installation expérimentale et les outils de caractérisation

La figure (3.1) illustre le schéma global du dispositif expérimental comprenant les systèmes de génération et de comptage de particules [24,25].

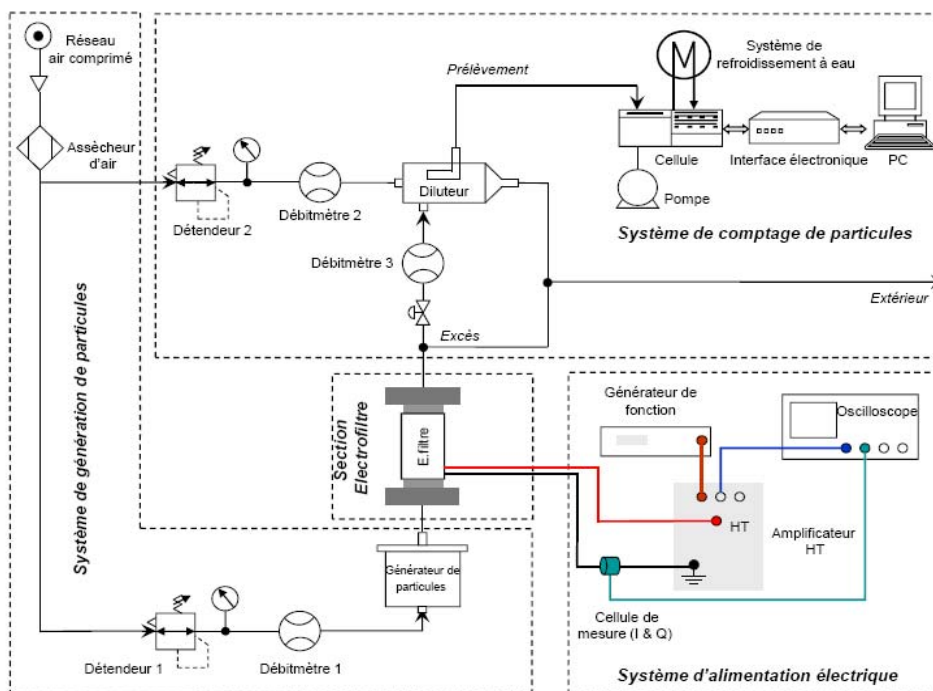


Figure 3.1 – Schéma du dispositif expérimental global pour la caractérisation de la précipitation électrostatique.

De l'air propre et sec provenant du réseau d'air comprimé est introduit dans un générateur de fumée "fait-maison" dans lequel la combustion de bâtons d'encens génère des particules submicroniques. Le mélange gazeux qui en résulte est alors introduit dans l'électrofiltre à tester. Seule une partie des gaz est prélevée à la sortie de l'électrofiltre, puis est diluée avant d'être analysée.

III.1.2 - Principe de fonctionnement dispositif de comptage de particules

Le dispositif de comptage de particules est un granulomètre de marque Palas, Modèle Welas-1000. La technique de comptage est basée sur l'utilisation d'une source de lumière blanche. Un petit volume de mesure défini optiquement est éclairé avec une lumière blanche afin d'analyser la lumière diffusée et de déterminer le nombre et la taille des particules. Les particules passent individuellement à travers ce volume.

Pour chaque particule, une impulsion de lumière diffusée d'une intensité spécifique est produite. L'intensité de l'impulsion de lumière diffusée collectée à un angle de 90° est le moyen de déterminer la taille des particules. Le nombre de ces impulsions de lumière diffusée, mesuré par unité de temps permet de calculer la concentration particulaire.

L'avantage de ce procédé est la totale indépendance entre le nombre de particules et la taille de celles-ci. Cette indépendance est la condition la plus importante pour une bonne résolution analytique. L'utilisation de la lumière blanche permet une illumination homogène du volume de mesure contrairement à l'illumination par lumière monochromatique. De même, la mesure de l'intensité de la lumière blanche diffusée à 90° évite toute ambiguïté entre l'amplitude des impulsions de lumière diffusée et le diamètre des particules. Enfin, la courbe d'étalonnage est par conséquent clairement définie, la lumière blanche réduisant les erreurs causées par les particules de forme non sphérique.

Le système de comptage de particules illustré dans la figure (3.1) se compose du granulomètre et d'un dispositif de dilution des gaz. Le granulomètre comporte quatre organes : le module optique, le module électronique, le module de pompage et de refroidissement et le module de post traitement des données. Les principales caractéristiques du granulomètre sont regroupées dans le tableau ci-après.

Débit volumique	Constant
Gamme	0,18 à 40 μm
Nbre de canaux	32 par décade
Concentration maximale	10^5 part./cm^3
Débit	5 l/mn
Source de lumière	Lampe Xénon
Système de refroidissement	Eau

Table 3.1 – Principales caractéristiques du granulomètre.

Le tableau 3.2 quant à lui, regroupe les caractéristiques des organes du dispositif de dilution.

Débit de la ponction	1,4 l/mn
Débit de la dilution	82 l/mn
Rapport de la dilution	60
Dimension du tunnel (Longueur \times Section)	(1020 \times 2828) mm^3

Table 3.2 – Caractéristiques du dispositif de dilution.

Le système de génération de fumée dont les principales caractéristiques figurent dans le tableau (3.3) fournit les gaz à traiter. La fumée d'encens est produite dans une enceinte close ayant une entrée et une sortie d'air. L'air constituant l'écoulement principal qui arrive dans cette enceinte est préalablement asséché dans un déclicateur à grains de silice garantissant un taux d'humidité relative inférieur à 5 %. Le mélange de l'air propre et de la fumée se fait dans l'enceinte puis il est directement apporté à l'entrée de l'électrofiltre. Afin de maintenir la même densité de particules, nous brûlons toujours le même nombre de bâtons d'encens (deux) avant chaque série de mesure. Ce nombre n'a pas été choisi aléatoirement, mais en tenant compte des capacités du granulomètre limité à 25000 particules réellement comptées par

mesure. Au delà de cette quantité de particules, plus d'une particule peut se trouver dans le volume de mesure, le système émet alors un signal d'alarme. Dans ce cas, le système compte deux particules comme une seule particule de grosse taille. Résultat, la concentration en particules est sous-évaluée et la répartition en taille décalée vers la droite, c'est à dire vers les grosses particules. L'efficacité fractionnelle est alors meilleure qu'elle ne l'est réellement.

Débit de l'écoulement principal	1,6 à 24 l/mn
Elément actif du déclicateur	Grains de silice
Enceinte étanche	Oui

Table 3.3 – *Caractéristiques du système de génération de fumée.*

III.1.3 Distribution granulométrique

La combustion de l'encens génère une fumée contenant majoritairement des particules solides, et quelques aérosols liquides. Un exemple de répartition par taille de ces particules d'encens est illustré dans la figure 3.2. On peut y voir que c'est approximativement autour de la classe $0,3 \mu\text{m}$ que le nombre de particules est maximal.

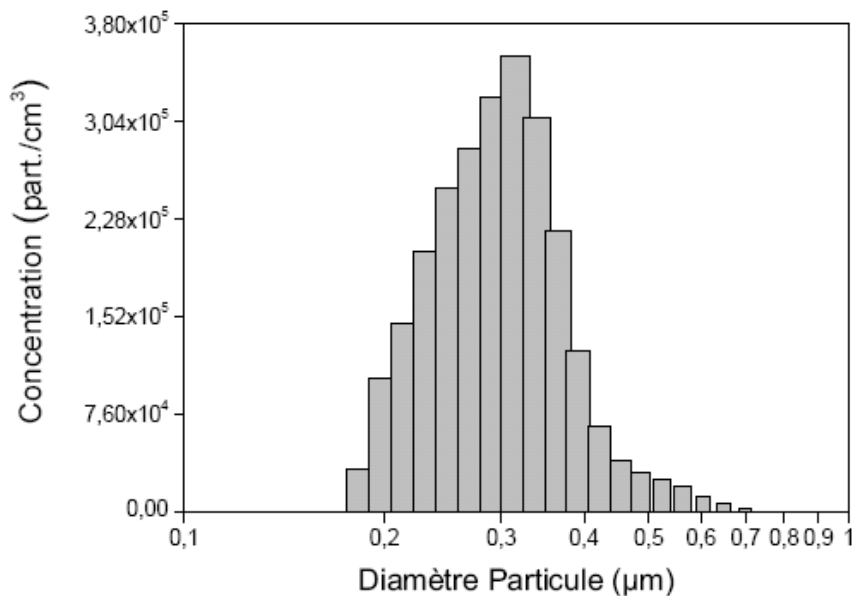


Figure 3.2 – *Distribution granulométrique des particules d'encens.*

Zukeran et al. [26] ont par ailleurs montré que la répartition par taille des particules solides après dessèchement de la fumée d'encens atteint un maximum entre 0,2 et 0,3 μm .

Nous pouvons dès lors considérer que la grande majorité des particules contenues dans la fumée d'encens peut être assimilée à des particules solides. La figure 3.3 montre une image typique prise au Microscope Electronique à Balayage (MEB) des particules solides contenues dans la fumée d'encens.

L'image prise au MEB ne montre que les particules solides car les particules liquides sont évaporées au cours du processus de préparation de l'échantillon à observer. On y voit que les particules sont de forme presque sphérique et que certaines d'entre elles sont agglomérées. Du fait de leur résistivité (environ $7,6 \times 10^{10} \text{ W} \cdot \text{cm}$), les particules peuvent s'agglomérer. Lorsque la densité est élevée, le phénomène est encore plus marqué. La distribution granulométrique montrée dans la figure (3.4) révèle l'apparition d'un deuxième pic, correspondant à une nouvelle population de particules de grosses tailles, dont la classe majoritaire est $d \approx 0,6 \mu\text{m}$. Au cours de nos expérimentations, nous avons observé ce phénomène dans des conditions spécifiques : forte quantité de fumée due à l'utilisation de nombreux bâtons d'encens, et faible débit de l'écoulement principal. A partir de ces observations, nous nous sommes mis dans les conditions expérimentales requises pour que n'apparaisse pas cette population de grosses particules.

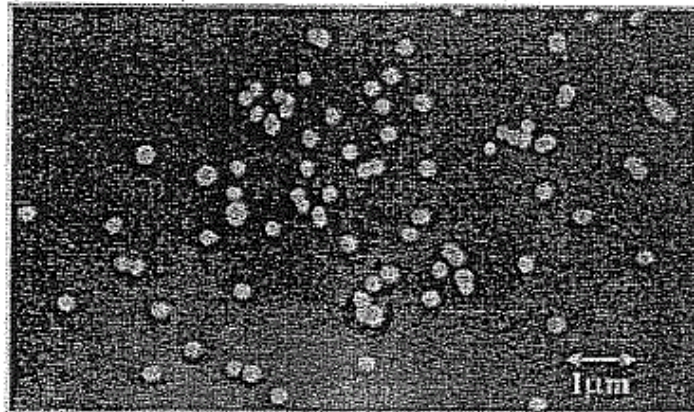


Figure 3.3 – *Image typique prise au Microscope Electronique à Balayage des particules solides contenues dans la fumée d'encens [26].*

La composition de la fumée résultante de la combustion de l'encens est très diversifiée. En effet on y retrouve de nombreux polluants qui peuvent être classés en deux catégories : les polluants gazeux et les polluants solides.

Parmi les polluants gazeux, on compte le monoxyde de carbone (CO), les oxydes d'azote (NO_x), les sulfures d'acide (SO_x) et les composés organiques volatiles (COV). Quant aux polluants solides, il s'agit entre autres de particules solides et de métaux toxiques [27].

Nous avons donc pris quelques précautions d'usage (port de masque, expérimentation en boucle fermée avec extraction des fumées vers l'extérieur, aération régulière de la salle d'expérimentation). Le choix d'utiliser la fumée d'encens malgré sa composition se justifie par les avantages qu'offre cette utilisation : absence de problèmes de condensation rencontrés avec les gaz d'échappement diesel, possibilité de faire les expérimentations dans des salles classiques (non insonorisée, sans double ventilation), simplicité de fonctionnement du générateur de fumée, par exemple.

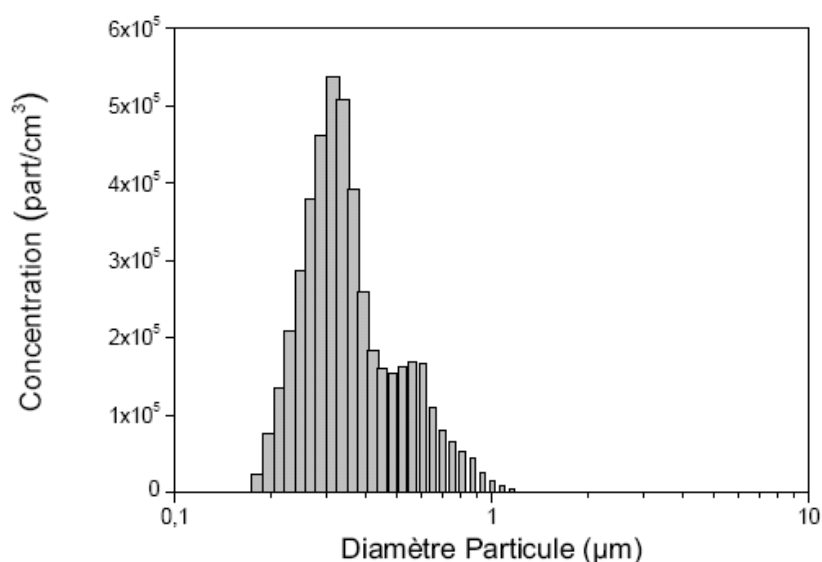


Figure 3.4 – Distribution granulométrique bimodale des particules d'encens

III.2 La validation de la mesure

Avant d'en venir au protocole de mesure proprement dit, précisons que nous procédons à la calibration du granulomètre avant toute campagne de mesure. L'appareil est calibré avec des particules mono-dispersées de Latex ayant un diamètre équivalent de $0,85 \mu m$.

Le calcul de l'efficacité fractionnelle nécessite trois mesures de concentration : deux mesures électrofiltre à l'arrêt (ou mesures en amont) et une mesure électrofiltre en marche (ou mesure en aval). Etant donné que nous prenons deux mesures avec l'électrofiltre à l'arrêt, il faut qu'il

y ait le plus petit écart entre elles pour des raisons de reproductibilité. Ainsi donc, nous ne tolérons qu'un écart maximum de 10 % entre les deux mesures en amont. Par ailleurs, la concentration de particules pour une mesure en amont doit être comprise entre 10000 et 20000 *part./mesure*. Pour ce faire, il est essentiel d'opérer dans une fenêtre temporelle déterminée par la courbe de combustion de l'encens. Le respect de ce protocole en plus de quelques règles simples garantit une bonne reproductibilité des mesures. Parmi ces règles, nous pouvons citer l'utilisation du même type de bâtons d'encens ou encore l'exécution d'une campagne de mesure dans les mêmes conditions extérieures.

III.3 Analyse des performances des électrofiltres

L'efficacité de collecte peut être calculée aussi bien à partir de la concentration par classe de taille qu'à partir de la concentration totale. On parle alors d'**efficacité par classe** ou d'**efficacité globale**.

L'efficacité globale comme son nom l'indique rend compte des performances globales de l'électrofiltre. Elle constitue un bon outil d'analyse quantitative des phénomènes ayant lieu au cours du processus de filtration. Pour une analyse fine des phénomènes physiques opérants pendant la précipitation, il faudra avoir recours aux données d'efficacité par classe. L'efficacité de collecte est influencée par plusieurs paramètres tels que l'amplitude de la tension appliquée et sa forme d'onde, la fréquence, le débit, la configuration géométrique, la concentration des particules, la température, entre autres. Les paramètres de nature électrique et géométrique seront étudiés dans cette section.

III.3.1 Approche par efficacité globale

Le calcul de l'efficacité de collecte en tenant compte des performances globales d'un électrofiltre ne fait pas apparaître l'efficacité pour une taille donnée de particule.

Le chiffre dont on dispose est obtenu en faisant le cumul des efficacités relevées pour chacune des différentes classes de particules recensées. Ce mode de calcul peut être très intéressant lorsqu'une grande majorité des particules à tester sont de la même taille [28].

III.3.2 Approche par efficacité par classe

Il est préférable d'exprimer l'efficacité de collecte par classe, lorsqu'on voit un intérêt à connaître le rendement pour deux populations de particules distinctes appartenant au même g
Les résultats qui sont illustrés dans cette mémoire révèlent deux informations essentielles :

- ❖ L'efficacité croît avec l'élévation de la tension,

❖ L'efficacité est plus élevée pour les grosses particules.

Ces deux points sont confirmés par plusieurs auteurs. L'efficacité de collecte augmente au fur et à mesure de l'élévation de la tension et c'est avec la classe des plus grosses particules que le meilleur rendement est obtenu.

En effet, les particules de grosse taille reçoivent plus de charges à leur surface. Elles acquièrent ainsi une plus grande vitesse de migration et par conséquent, elles sont plus facilement collectées. Il est également à noter que ces courbes d'efficacité suivent la même dynamique que celles relevées en efficacité globale.

III.4 Détermination de la vitesse des particules

Il est très difficile de déterminer expérimentalement la vitesse de migration des particules dans un précipitateur électrostatique. Il existe deux démarches possibles pour obtenir cette vitesse :

- mesures directes par anémométrie laser ;
- à partir des mesures de l'efficacité de collection.

Plusieurs auteurs ont utilisé l'anémométrie laser pour étudier le mouvement des particules au sein des filtres électrostatiques. Cependant, les résultats ont toujours un caractère plus qualitatif que quantitatif car cette méthode est mal adaptée dans le cas des précipitateurs électrostatiques ; l'anémométrie laser permet la mesure de la vitesse globale des particules par rapport à un système de référence fixe. Cette vitesse globale se compose à la fois de la vitesse du gaz ainsi que de la vitesse imprimée par le champ électrique. Il faut donc se placer dans des conditions bien particulières pour connaître la vitesse de l'écoulement gazeux et remonter ensuite à la vitesse de migration.

Concernant l'estimation de w_E à partir des mesures d'efficacité de collection, plusieurs remarques doivent être faites. Premièrement, il existe dans la littérature la notion de *vitesse effective de migration*, souvent notée w_{eff} . Cette vitesse est calculée à partir de l'efficacité totale, en masse, de précipitation, sans tenir compte de la distribution en taille des particules. w_{eff} est un paramètre moyen, qui caractérise globalement le processus de séparation électrostatique. Par exemple, si on considère le modèle de *Deutsch* en introduisant w_{eff} dans l'expression (3.1) on obtient [29, 30]:

$$\eta_t = 1 - \exp\left(-w_{eff} \cdot \frac{S}{D_g}\right) \quad (3.1)$$

En supposant que l'efficacité globale de collection est connue, la vitesse de migration effective est obtenue en utilisant la relation suivante :

$$w_{eff} = -\frac{D_p}{S} \cdot \log(1 - \eta_t) \quad (3.2)$$

La vitesse effective w_{eff} ne peut pas donner d'information sur la vitesse de migration des particules d'une taille donnée ; il faudra alors baser cette estimation sur la mesure d'efficacité fractionnaire.

Deuxièmement, supposons qu'on a un mélange air-particules monodispersées (particules ayant toutes la même taille) ; dans ce cas l'efficacité de collection caractérise les particules d'une taille bien définie. La valeur de la vitesse de migration peut être alors dérivée en introduisant dans (3.2) le rendement $\eta_f(dp)$. En faisant l'hypothèse que le modèle considéré plus haut caractérise complètement le fonctionnement du filtre, on peut se poser la question suivante : est-ce que cette valeur de w_E est représentative de toutes les particules ? La réponse provient du fait que la vitesse de migration des particules est proportionnelle à la fois à l'intensité du champ électrique de précipitation et à la charge portée par celles-ci. Le processus de charge, très complexe dans un électrofiltre, peut conduire à des valeurs de charge différentes pour des particules identiques. Il résulte donc que la valeur de la vitesse ainsi calculée est une moyenne correspondant à la charge électrique moyenne des particules. Si la majorité des particules atteint la charge limite (une distribution de charge très étroite), dans ce cas, la vitesse de migration peut être considérée comme représentative pour toutes les particules.

Dans ce chapitre nous essayons d'estimer la vitesse de migration en fonction de la taille des particules et du champ électrique de précipitation dans des conditions expérimentales variées influant sur la charge des particules.

III.4.1 Méthode d'estimation de w_E

Nous proposons une estimation de la vitesse de migration pour différentes classes de taille de particules. La méthode adoptée fait appel aux mesures d'efficacité fractionnaire de collection réalisées sur le filtre électrostatique pilote. A partir de ces résultats expérimentaux, par l'intermédiaire d'un modèle théorique de fonctionnement du filtre, on estime la vitesse de migration des particules.

III.4.1.1 Démarche expérimentale

La vitesse de migration w_E est directement proportionnelle à l'intensité du champ électrique E présent à l'intérieur du filtre ainsi qu'à la charge électrique des particules q_p . Les mesures de l'efficacité fractionnaire devront donc être réalisées dans certaines conditions expérimentales

qui peuvent assurer, d'une façon cohérente, le calcul de w_E . Une condition essentielle est d'avoir une répartition spatiale connue du champ électrique, qui n'est pas trop affectée par la charge d'espace ionique et par celle résultant des particules chargées. Pour se situer le plus près possible des conditions réelles, présentes dans les précipitateurs industriels, les électrodes ionisantes utilisées dans ces expériences sont des tiges avec pointes. La décharge couronne qui se produit à proximité de chaque pointe conduit à une injection de charge très hétérogène dans la zone comprise entre le plan central et les plaques collectrices. Ainsi, une charge d'espace ionique se forme ; en ajoutant l'influence des particules présentes à l'intérieur du filtre, la distribution du champ électrique est très compliquée. Dans ces conditions, estimer la vitesse de migration est presque impossible ou implique des approximations très discutables. Une adaptation de notre dispositif expérimental est donc nécessaire afin de pouvoir déduire la vitesse de migration des fines particules en fonction de plusieurs paramètres de fonctionnement, parmi lesquels le plus important est l'intensité du champ électrique de précipitation \vec{E} .

Un supplément de clarté peut être apporté dans notre étude par la possibilité de changer les conditions de charge des particules. En gardant la même configuration du filtre et la même composition du mélange air-particules, expérimentalement, il existe deux possibilités de modifier les conditions de charge des particules :

- modifier la valeur du potentiel électrique appliqué aux électrodes ionisantes, ce qui implique donc, la variation de l'intensité du champ électrique et de la densité de charge d'espace ionique ;
- modifier la vitesse moyenne du gaz, donc, le temps de séjour des particules à l'intérieur du filtre.

Pour satisfaire toutes ces conditions, le précipitateur électrostatique divisé en deux parties : une première partie destinée à la charge des particules (et où la distribution hétérogène de charge conduit à la formation d'une turbulence spécifique des filtres électrostatiques) et une deuxième partie où l'on applique un champ électrique uniforme. Les deux parties du filtre ont la même longueur ; dans la première nous avons gardé comme électrodes ionisantes les tiges avec pointes portées à une haute tension négative.

Dans la deuxième zone, les électrodes ionisantes ont été remplacées par une plaque connectée à une autre source de tension de la même polarité (figure 3.5). Cette deuxième section est destinée effectivement à la mesure d'efficacité fractionnaire de collection. Le potentiel électrique appliqué sur la plaque centrale dans la deuxième zone du filtre peut être modifié indépendamment de la tension d'alimentation des tiges. Ceci permet de faire varier facilement

le champ électrique de précipitation présent dans la zone de mesure sur une plage de valeurs assez étendue. Pour éviter les influences de nature électrostatique entre les deux zones du filtre nous avons prévu une distance minimale entre la plaque haute tension et la dernière tige d'environ 6 cm (voir la figure 3.5). Dans ce cas, si par exemple $V_{charge} = 25$ kV, le potentiel électrique flottant mesuré sur la plaque centrale de la seconde zone du filtre monte jusqu'à quelques centaines de volts. Pour cette raison, nous travaillons avec des valeurs de V_{charge} inférieures à 22 kV. Pour ces valeurs, le potentiel électrique mesuré sur la plaque centrale est quasi-nul et la mise à la masse de celle-ci (qui assure un champ de collection nul, nécessaire pour déterminer la distribution granulométrique à l'entrée de la zone de mesure) ne perturbe pas d'une manière significative le champ électrique de charge à la fin de la première zone du filtre.

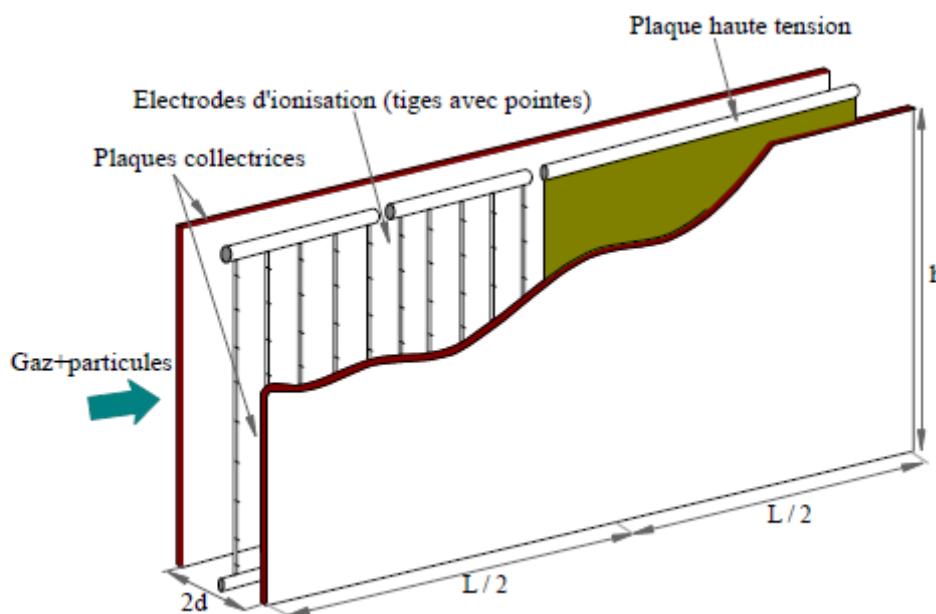


Figure 3.5 - Schéma du filtre électrostatique divisé en deux sections.

III.4.1.2 Principe de mesure de l'efficacité fractionnaire de collection

Suite à la description du dispositif expérimental, nous examinons plus en détail la manière dont on détermine la vitesse de migration des particules. Le schéma logique qui intervient dans nos estimations de vitesse est représenté dans la figure 3.6.

Expérimentalement, on a accès aux mesures d'efficacité fractionnaire dans la deuxième zone du filtre, là où le champ électrique est établi entre deux plaques planes et parallèles. Pour ceci,

des mesures sur la répartition granulométrique des particules à l'entrée et à la sortie de la deuxième partie du filtre sont nécessaires. Les particules en suspension dans le flux gazeux sont soumises, depuis leur entrée dans le filtre électrostatique, au processus de charge (dans la première zone) et à l'action du champ électrique (dans les deux zones). Il existe donc une certaine proportion d'entre elles qui vont être captées dans la première partie du filtre. Les mesures de l'efficacité fractionnaire de séparation seront ainsi réalisées sur les particules qui échappent au processus de précipitation dans la première section de l'électrofiltre. Lorsque le champ électrique de collection dans la deuxième zone du précipitateur est nul, c'est-à-dire lorsque le potentiel appliqué à la plaque centrale est zéro, le prélèvement de la suspension air-particules nous donne la distribution granulométrique des particules à l'entrée de la deuxième zone du filtre. On obtient ainsi la concentration initiale moyenne (en volume) de particules à l'entrée de la zone de mesure. Par contre, en appliquant un potentiel électrique à la plaque centrale de la zone de mesure et en gardant les mêmes conditions dans la première partie du précipitateur, les particules déjà chargées qui sortent de la première zone sont soumises à l'action du champ électrique de collection et une certaine proportion d'entre elles est captée. Dans ce cas, l'analyse de la composition du mélange air-particules conduit à la concentration moyenne des particules à la sortie de la zone de mesure. La détermination de l'efficacité fractionnaire de collection dans la deuxième section (plaque-plaque) demande donc une condition essentielle : la concentration des particules à l'entrée du filtre doit être constante dans le temps.

Un autre facteur essentiel pour l'estimation de la vitesse de migration, est la répartition spatiale du champ électrique de collection \vec{E} .

Dans la section de mesure de l'électrofiltre, la différence de potentiel est appliquée entre deux plaques planes et parallèles. En absence de particules chargées, le champ électrique est uniforme et son intensité est :

$$E = \frac{V_{\text{plaque}}}{d} \quad (3.3)$$

où V_{plaque} représente le potentiel électrique appliqué à la plaque centrale de la zone de mesure et d est la demi-distance entre les plaques de collecte.

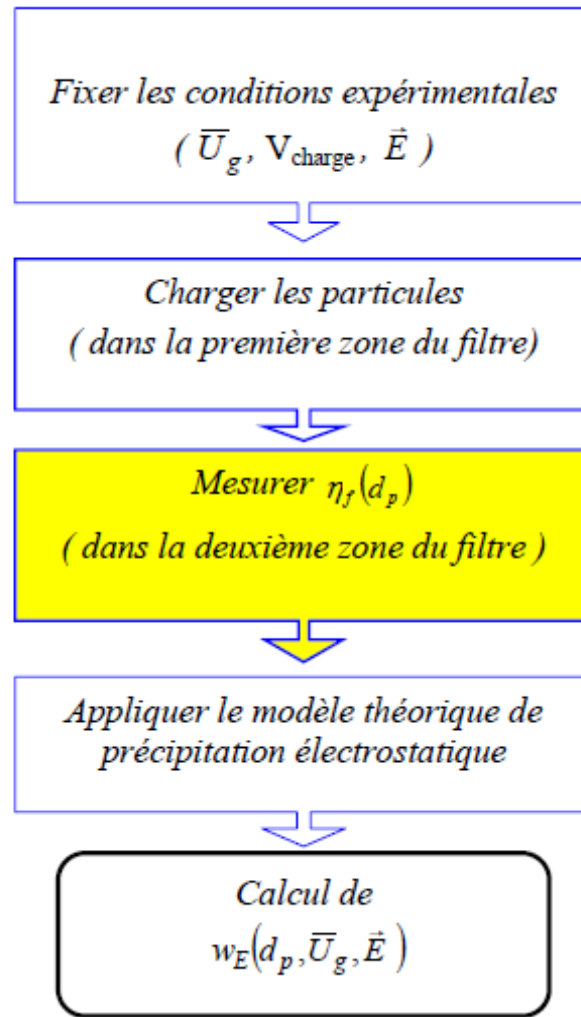


Figure 3.6 - Schéma logique du calcul de $w_E(dp)$

Le fonctionnement de l'électrofiltre et donc les mesures d'efficacité fractionnaire de collection, qui implique nécessairement la présence de particules chargées dans la seconde partie du filtre. La charge d'espace correspondante modifie la répartition du champ électrique de collection et la relation (3.2) n'est plus valable en toute rigueur. Si la concentration de particules entrant dans la zone de mesure est importante, le champ électrique est croissant lorsqu'on se déplace de la plaque centrale vers les électrodes de collecte et il peut prendre des valeurs notablement différentes de celle donnée par (3.2). Par contre si la concentration en particules est très faible, la perturbation du champ est insignifiante et on peut alors la négliger. Pour cette raison, dans nos expériences, nous avons limité la concentration à l'entrée du précipitateur à des valeurs très faibles, inférieures à 500 particules/cm³. En plus, le processus de séparation qui a lieu dans la première zone du filtre diminue fortement le nombre de celles-ci dans la partie de mesure. En effet, les particules de plus grande taille qui sont les plus

chargées sont captées au début du précipitateur. La distribution granulométrique de la suspension qui entre dans cette deuxième zone du filtre change suivant les conditions expérimentales présentes dans la zone de charge. La majeure partie des particules qui sortent de la première zone du précipitateur ont une taille inférieure à $1\mu\text{m}$ (voir figure 3.7).

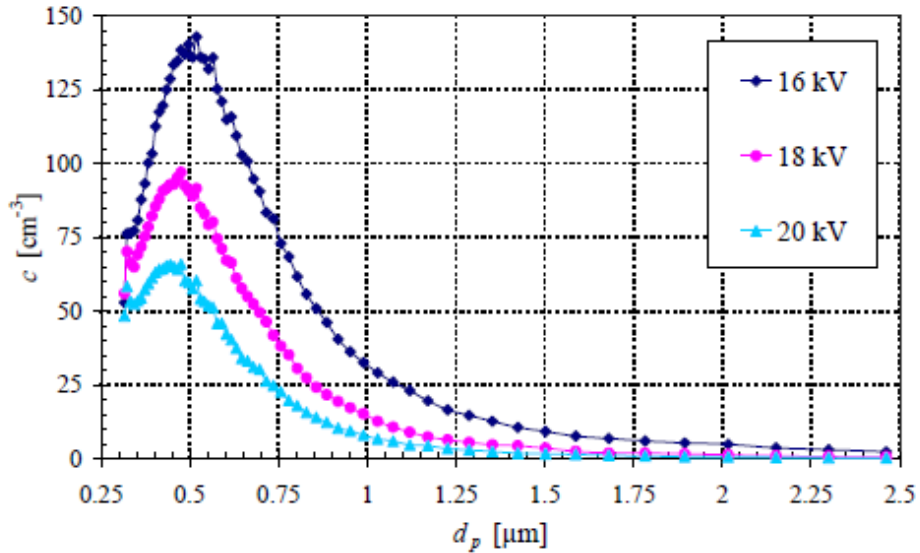


Figure 3.7 - Distribution granulométrique (en nombre) des particules à l'entrée de la deuxième zone du filtre pour $g U = 1,0 \text{ m/s}$ et différentes valeurs du potentiel électrique appliqué aux électrodes ionisantes V_{charge} [29]

La figure 3.3 montre que la distribution granulométrique des particules à l'entrée de la zone de mesure change en fonction de la valeur du potentiel électrique V_{charge} appliqué aux électrodes ionisantes. En examinant la figure 3.3, on observe que la taille caractéristique (correspondant au maximum de la courbe) diminue avec V_{charge} : $(dp)_{max} \approx 0,55 \mu\text{m}$, $0,45 \mu\text{m}$ et $0,40 \mu\text{m}$ pour des valeurs du potentiel de charge $V_{charge} = 16 \text{ kV}$, 18 kV et 20 kV respectivement. Des résultats similaires ont été obtenus pour d'autres vitesses moyennes du gaz. Dans ces conditions, la charge d'espace des particules présentes dans la section de mesure a une très faible influence sur le champ électrique de collection. Ainsi, dans nos calculs nous faisons l'hypothèse que le champ électrique de collection \vec{E} a une répartition uniforme et que son intensité est donnée par la relation (3.3).

L'installation expérimentale utilisée ainsi que la technique employée pour mesurer l'efficacité fractionnaire de collecte dans la section plaque-plaque du précipitateur impliquent des mesures granulométriques entrée – sortie décalées dans le temps. Malgré nos efforts pour maintenir une concentration des particules constante au cours du temps, il existe toujours des fluctuations. La méthode que nous avons adoptée pour réduire l'influence de ces fluctuations consiste à réaliser plusieurs séries de mesures et de calculer les valeurs moyennes de la

concentration pour chaque classe de taille de particules. Ainsi, pour obtenir la courbe de distribution granulométrique dans des conditions expérimentales données, le temps effectif de mesure est d'au moins 15 minutes, ce qui correspond à au moins trois séries de mesures et le nombre total de particules comptées est d'environ 106.

Au cours d'une série de mesures, la captation des particules qui se produit tout au long du précipitateur conduit à la formation de couches de poudre sur les plaques collectrices. Des observations visuelles ont permis de constater qu'il existe aussi un certain nombre de particules qui se déposent à la surface des électrodes ionisantes (sur les tiges et même sur les pointes). En conservant une valeur constante du potentiel de charge, on remarque une légère tendance à la diminution du courant électrique établi dans la zone de charge, au fur et à mesure que la quantité de particules captées augmente. La décroissance du courant – même dans une proportion très faible (5%) – peut influencer le processus de charge des particules ; d'autre part, la formation d'une couche de particules relativement importante aux parois peut conduire aussi à l'apparition de réentraînement. Afin de faire chaque série de mesures en partant des mêmes conditions initiales, on commence par nettoyer soigneusement les plaques collectrices et les électrodes ionisantes à l'aide d'une soufflerie alimentée avec de l'air comprimé sous une pression de 6 bars. Dans la section suivante nous présentons les résultats expérimentaux obtenus sur l'efficacité fractionnaire de collection dans différentes conditions expérimentales. Ces résultats seront utilisés ultérieurement pour estimer la vitesse de migration des particules.

III.3 Les classes granulométriques de particules

Pour caractériser le processus de migration des particules, des classes granulométriques de particules doivent être définies. Naturellement, chaque canal de mesure du compteur laser définit une classe de taille ; cependant le nombre de classes est très élevé : il y a 92 classes de taille qui couvrent l'intervalle compris entre 0,3 et 20 μm dont 45 concernent les particules de diamètre inférieur à 1 μm . Conserver ces classes nous aurait amenés à un travail considérable de traitement des mesures présentées au paragraphe précédent car les calculs de la vitesse de migration des particules sont laborieux.

Toutes les particules qui font partie d'une classe granulométrique seront caractérisées ensuite par le diamètre moyen d_p de cette classe. Alors, dans des conditions expérimentales précises, chaque classe granulométrique est caractérisée par une efficacité de collection moyenne. Par définition, pour une classe donnée de particules, l'efficacité de filtration est calculée par la relation suivante:

$$\eta(d_p) = 1 - \frac{\left(\sum_{i=1}^{N_{canal}} n_i \right)_{sortie}}{\left(\sum_{i=1}^{N_{canal}} n_i \right)_{entrée}} \quad (3.4)$$

où n_i représente le nombre total de particules comptées par canal i et N_{canal} est le nombre de canaux de la classe granulométrique de diamètre moyen d_p .

III.4.1.3 Calcul de la vitesse de migration: Théorie de Leonard

Après avoir mesuré l'efficacité de collecte pour chaque classe de taille des particules, l'estimation de la vitesse de migration nécessite d'utiliser une relation entre w_E et η . Un calcul exact de la vitesse de migration pourrait être réalisé à partir d'une théorie qui caractérise complètement le fonctionnement du filtre électrostatique pilote. Une telle théorie devrait prendre en compte l'influence de chaque paramètre de fonctionnement du filtre afin de permettre l'obtention des valeurs de w_E pour des conditions expérimentales variées. Comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, il n'existe pas de théorie complète sur la précipitation électrostatique capable de rendre compte des observations expérimentales. Dans ce cas, nous sommes obligés de faire appel aux modèles analytiques de fonctionnement des filtres électrostatiques, en essayant de les adapter le mieux possible à nos conditions expérimentales. Nous avons vu que, parmi les trois modèles analytiques présentés, selon la valeur de la diffusivité turbulente D_t , la théorie de *Leonard et al.* permet de retrouver les résultats prédits par le modèle de *Deutsch* et par le modèle laminaire. Suite à cette observation, nous focalisons notre étude sur l'estimation de la vitesse de migration des particules en utilisant le modèle de *Leonard*. La distribution de la concentration c de particules à l'intérieur d'un filtre électrostatique plaque-plaque en présence d'un champ électrique uniforme est caractérisée par l'équation de convection-diffusion. Les détails concernant la résolution analytique de cette équation sont donnés dans [14]. En utilisant les conditions aux limites, la méthode de séparation des variables conduit à rechercher une solution de la forme suivante :

$$c(x, z) = A(x) \cdot B(z) \quad (3.5)$$

La solution générale de l'équation (3.6) suivante :

$$\begin{aligned} \bar{u} \cdot \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + \bar{v} \cdot \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} + \bar{w} \cdot \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} + u_E \cdot \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + v_E \cdot \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} + w_E \cdot \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} - \\ D_{t_x} \cdot \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial x^2} - D_{t_y} \cdot \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial y^2} - D_{t_z} \cdot \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial z^2} + \bar{c} \cdot \frac{\partial u_E}{\partial x} + \bar{c} \cdot \frac{\partial v_E}{\partial y} + \bar{c} \cdot \frac{\partial w_E}{\partial z} = 0 \end{aligned} \quad (3.6)$$

est donnée par :

$$c(x,z) = \sum_m \left\{ \exp \left[\left(-\frac{w_E \cdot x}{u \cdot d} \right) \cdot F_m \right] \right\} \cdot \left\{ C_m \cdot \exp \left[\left(\frac{Pe \cdot z}{2 \cdot d} \right) \right] \right\} \cdot \left[\left(\frac{2 \cdot \theta_m}{Pe} \right) \cdot \cos \left(\frac{\theta_m \cdot z}{d} \right) + \sin \left(\frac{\theta_m \cdot z}{d} \right) \right] \quad (3.7)$$

où $F_m = \left(\frac{1}{\Omega} \right)^2 \frac{Pe}{2} \cdot \left\{ \sqrt{1 + \Omega^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{2\theta_m}{Pe} \right)^2 \right]} - 1 \right\}$, avec $\Omega = w_E/u$; les C_m sont constantes

déterminées par le profil de la concentration des particules à l'entrée du filtre $c(0,z)$. Dans l'expression (3.7), θ_m représente les racines de l'équation:

$$\tan \theta = -2 \cdot \left(\frac{2 \cdot \theta}{Pe} \right) / \left[1 - \left(\frac{2 \cdot \theta}{Pe} \right)^2 \right] \quad (3.8)$$

A partir de (3.7), on détermine l'efficacité de collection qui s'écrit :

$$\eta(d_p) = 1 - \frac{\sum_{m=1}^{\infty} H_m \cdot \exp \left\{ \left[\frac{1}{\Omega} - \left(\frac{1}{\Omega^2} + \frac{2 \cdot \theta_m}{Pe} + 1 \right)^{1/2} \right] \cdot \frac{w_E \cdot d}{2 \cdot D_t} \cdot \frac{L}{d} \right\}}{\sum_{m=1}^{\infty} H_m} \quad (3.9)$$

où H_m a l'expression suivante :

$$H_m = \frac{\left(\frac{2 \cdot \theta_m}{Pe} \right)^2 \cdot \left\{ \left[\frac{1}{\Omega} - \left(\frac{1}{\Omega^2} + \left(\frac{2 \cdot \theta_m}{Pe} \right)^2 + 1 \right)^{1/2} \right] \right\} \cdot (-1)^{m+1}}{\left\{ 2 + \frac{w_E \cdot d}{2 \cdot D_t} \left[\left(\frac{2 \cdot \theta_m}{Pe} \right)^2 + 1 \right] \right\} \cdot \left[\left(\frac{2 \cdot \theta_m}{Pe} \right)^2 + 1 \right]^2} \quad (3.10)$$

On observe dans l'expression (3.7) que la concentration des particules en un point (x,z) situé à l'intérieur du précipitateur est sous la forme d'une série. Le premier terme de cette série ($m = 1$) est appelé mode dominant ; mathématiquement, il représente la solution

asymptotique, pour $x \rightarrow \infty$, de l'équation (3.6). Le profil selon l'axe Oz de cette solution asymptotique est donné par [31] :

$$c(x_0, z) = \exp\left[\left(\frac{Pe \cdot z}{2 \cdot d}\right)\right] \cdot \left[\left(\frac{2 \cdot \theta_1}{Pe}\right) \cdot \cos\left(\frac{\theta_1 \cdot z}{d}\right) + \sin\left(\frac{\theta_1 \cdot z}{d}\right)\right]$$

III.5 Résultats

III.5.1 Mesure du rendement

Les mesures expérimentales du rendement sont représentées sur la figure (3.8). Nous constatons que plus le potentiel augmente plus le rendement augmente. Mais nous remarquons qu'un certain niveau la vitesse de croissance est faible. Ce ci est due à la saturation du système.

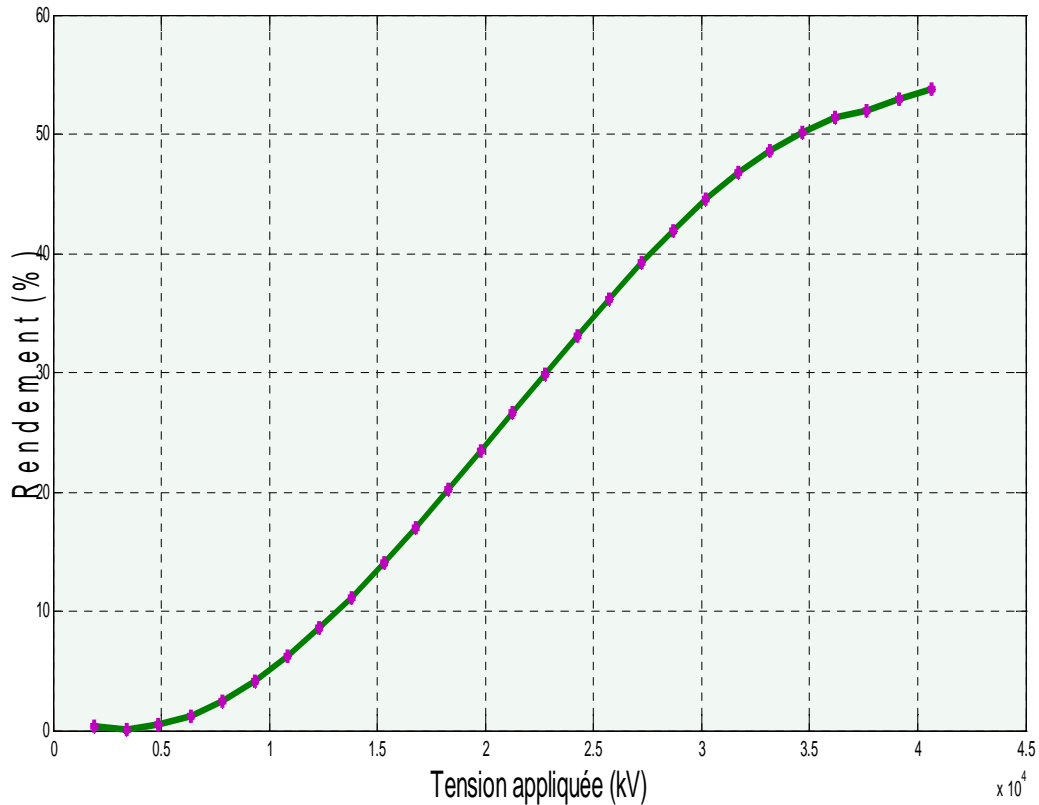


Figure 3.8 : Variation de l'efficacité de l'électrofiltre en fonction du potentiel.

III.5.2 Calcul de la vitesse de particules

Les variations de la vitesse des particules chargées entre les électrodes actives sont représentées sur la figure (3.9). Comme le rendement est une fonction de la vitesse des particules chargées, nous constatons que les deux courbes sont de même forme. Donc pour

des bons rendements, il faut des grandes vitesses en présence des grandes forces électrostatiques.

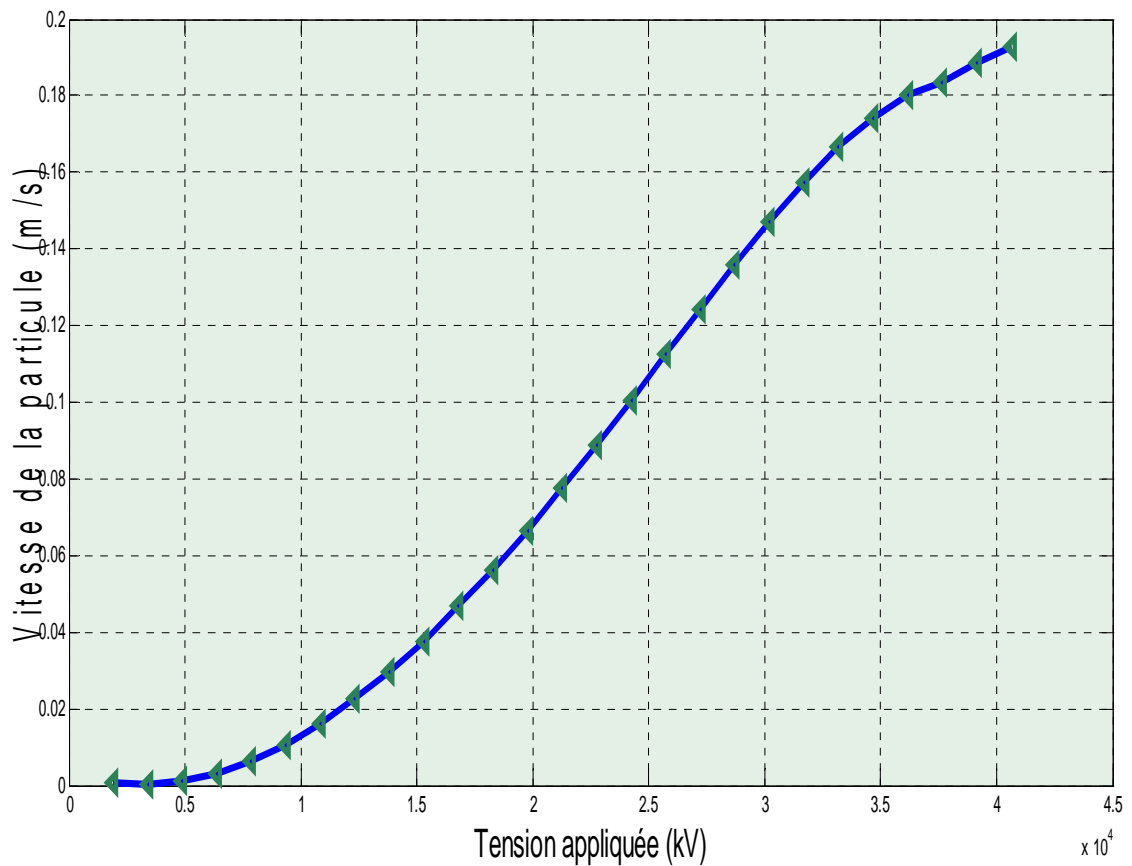


Figure 3.9 : Variation de la vitesse de particules en fonction du potentiel.

III.5.3 Calcul de la charge de particules

Nous avons présenté les variations de la charge en fonction de la vitesse des particules chargées sur la figure (3.10). Nous constatons que la charge et la vitesse sont proportionnelles. Les valeurs de la charge sont déduites directement de l'expression de la vitesse des particules. Cette vitesse est la somme vectorielle de la vitesse due au champ électrique et la vitesse de l'écoulement de l'air à l'intérieur du filtre électrostatique.

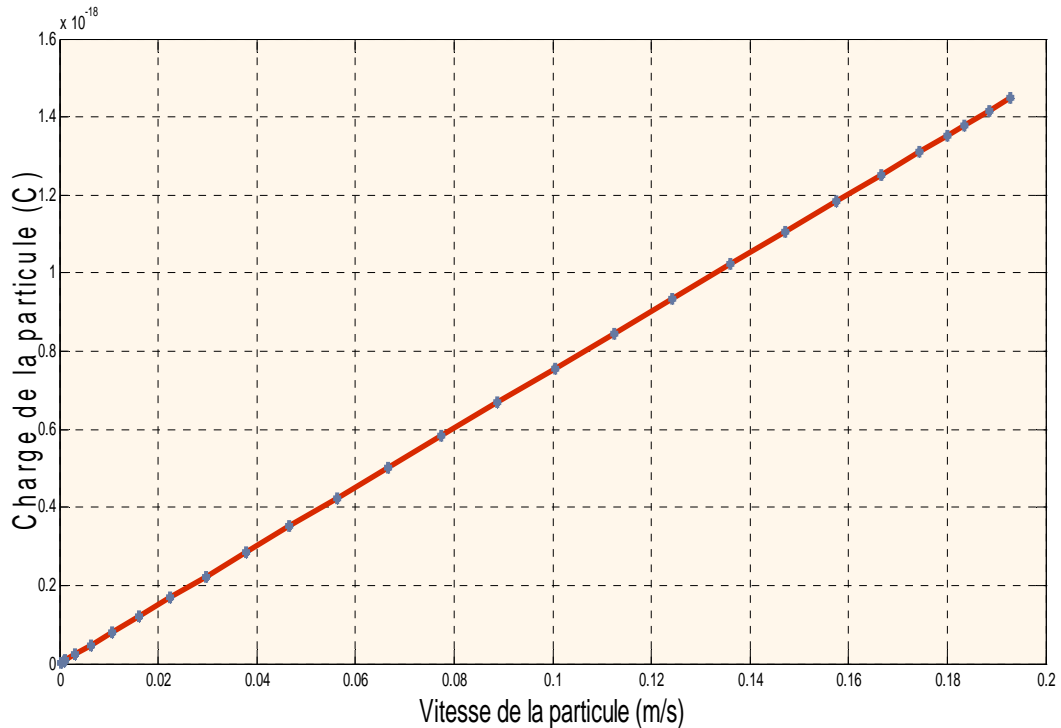


Figure 3.9 : Variation de la Charge de particules en fonction de la vitesse de migration

Les particules de cendre volante qui pénètrent dans l'électrofiltre passent par de nombreuses électrodes émissives lors de leur parcours dans le caisson. Elles entrent en collision avec les ions négatifs dont la concentration et la vitesse varient. De même, l'intensité du champ électrique varie tout au long de leur parcours. Deux mécanismes physiques de base interviennent pour la charge électrique des particules de poussières. Le premier, appelé Charge par choc implique la fixation des ions à la surface des particules jusqu'à atteindre une charge de saturation (qui varie selon la taille de la particule de poussière et de l'intensité du champ électrique).

La vitesse initiale du procédé varie en fonction de la concentration d'ions que la particule «voit» pendant son parcours dans la zone des électrodes émissives. Au fur et à mesure que les particules de poussières accumulent leur charge par fixation d'ions, d'autres ions commencent à être repoussés par la particule, réduisant le taux de charge. Lorsque la charge de saturation est atteinte, on arrive à un état d'équilibre où tout ion supplémentaire est rejeté, ramenant le taux de charge à zéro. La charge par choc est le mécanisme qui intervient principalement pour les particules de rayon supérieur à $1 \mu\text{m}$.

Pour les particules plus petites, un mécanisme physique différent, appelé charge par diffusion ionique s'avère plus efficace. Ce mécanisme varie en fonction de l'agitation thermique aléatoire des ions et des collisions en résultant avec les particules de poussières. La charge par choc et la charge par diffusion ionique interviennent simultanément dès qu'une particule de poussière pénètre dans l'électrofiltre. Par conséquent, les équations différentielles décrivant les mécanismes de charge électrique doivent être résolues en même temps que celles déterminant la trajectoire des particules [6]. Les calculs montrent qu'une particule de 5 μm dans un électrofiltre peut accumuler plusieurs milliers de charges élémentaires alors qu'une particule de 0,3 μm accumule rarement une centaine de charges élémentaires.

Les particules qui passent à proximité des électrodes émissives peuvent déjà avoir atteint des niveaux de charge assez élevés après une courte distance parcourue.

III.6 Conclusion

Dans cette partie de notre projet de fin d'étude, nous avons présenté l'estimation de la vitesse de migration et de la charge globale des particules submicroniques à partir des mesures d'efficacité fractionnaire réalisées sur le filtre électrostatique pilote. En supposant, que la théorie de *Leonard et al.* caractérise complètement le processus de filtration électrostatique dans la zone de mesure de notre filtre, la vitesse de migration w_E a été déterminée pour plusieurs conditions expérimentales. On a observé que la vitesse de migration dépend fortement de l'intensité du champ électrique de collection E . Cependant, une bonne estimation de w_E a nécessité la détermination d'un ordre de grandeur de la diffusivité turbulente D_t . En utilisant l'ensemble des résultats obtenus sur l'estimation de la vitesse de migration, un critère logique a permis de montrer que, dans nos conditions expérimentales, la diffusivité turbulente est d'environ $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

On observe qu'il existe des différences importantes entre les valeurs de la charge moyenne des particules calculées à partir de w_E et les résultats obtenus en utilisant la relation de *Cochet*. Ceci peut constituer un critère d'appréciation sur les valeurs de w_E obtenues.

Une discussion plus approfondie concernant l'estimation de w_E nécessite donc un calcul plus rigoureux de la charge moyenne q_p . Une telle évaluation de q_p sera réalisée dans les prochaines années s'il est possible à l'aide des modèles numériques.

Nous constatons que ces résultats présentent un intérêt particulier pour l'industrie, en matière de conception et de réalisation d'électrofiltres.

CHAPITRE IV

Analyse des performances d'un électrofiltre

IV.1 Introduction :

Plusieurs systèmes dynamiques peuvent être étudiés et analysés d'une façon intuitive où en ayant recours à un prototype. Ils existent toutefois des systèmes dynamiques pour lesquels la relation entre les entrées et les sorties est souvent compliquée et/ou incertaine, qui sont constitués par un grand nombre de sous-systèmes et/ou variables et pour lesquels l'action de contrôle à effectuer est non triviale (par exemple contrôler un navire-citerne ou d'une voiture sur le verglas).

Aussi, l'expérimentation par prototype a plusieurs inconvénients: coût, lenteur, impraticabilité, risque. Une alternative réside dans l'étude formelle des systèmes dynamiques qui a été à la base des nombreuses avancées dans la compréhension de la réalité (par exemple les systèmes de communications et de commandes) et dans la réalisation des technologies (par exemple le pilote automatique d'un avion).

De nombreux formalismes ont été proposés dans la littérature pour représenter le comportement dynamique d'un problème. Les exemples de formalismes mathématiques tels que les automates, les équations différentielles, les équations aux différences et les fonctions de transfert. Le fonctionnement du modèle peut être étudié, et, par conséquent, propriétés concernant le comportement du système actuel ou de ses sous-systèmes peut être déduite. Dans son sens le plus large, simulation est un outil pour évaluer la performance d'un système, existant ou proposé, sous différentes configurations d'intérêt et sur de longues périodes de temps réel. Pour notre étude, nous utilisons l'analyse et la synthèse de la fonction de transfert déduite des valeurs expérimentales et par l'application des propriétés de la transformée de Laplace. Nous cherchons à déterminer dans ce chapitre, le maximum d'information dans le domaine temporel et fréquentiel sur les performances de notre système [32].

IV.2 La transformée de Laplace

La transformée de Laplace permet de convertir une équation différentielle en une équation linéaire où disparaissent les formes dérivées. On se rappellera qu'en posant la solution sous la forme d'une exponentielle, on avait transmuté le problème vers une équation ordinaire dite équation caractéristique. Une telle pratique permet de transposer le problème de l'espace des temps (notre monde temporel), vers un espace dit des phases (un monde parallèle), de le résoudre dans cet espace, puis de transposer de nouveau la solution vers le monde réel (l'espace temporel de nouveau). Voici un diagramme de cette transposition (figure 4.1) [33]:

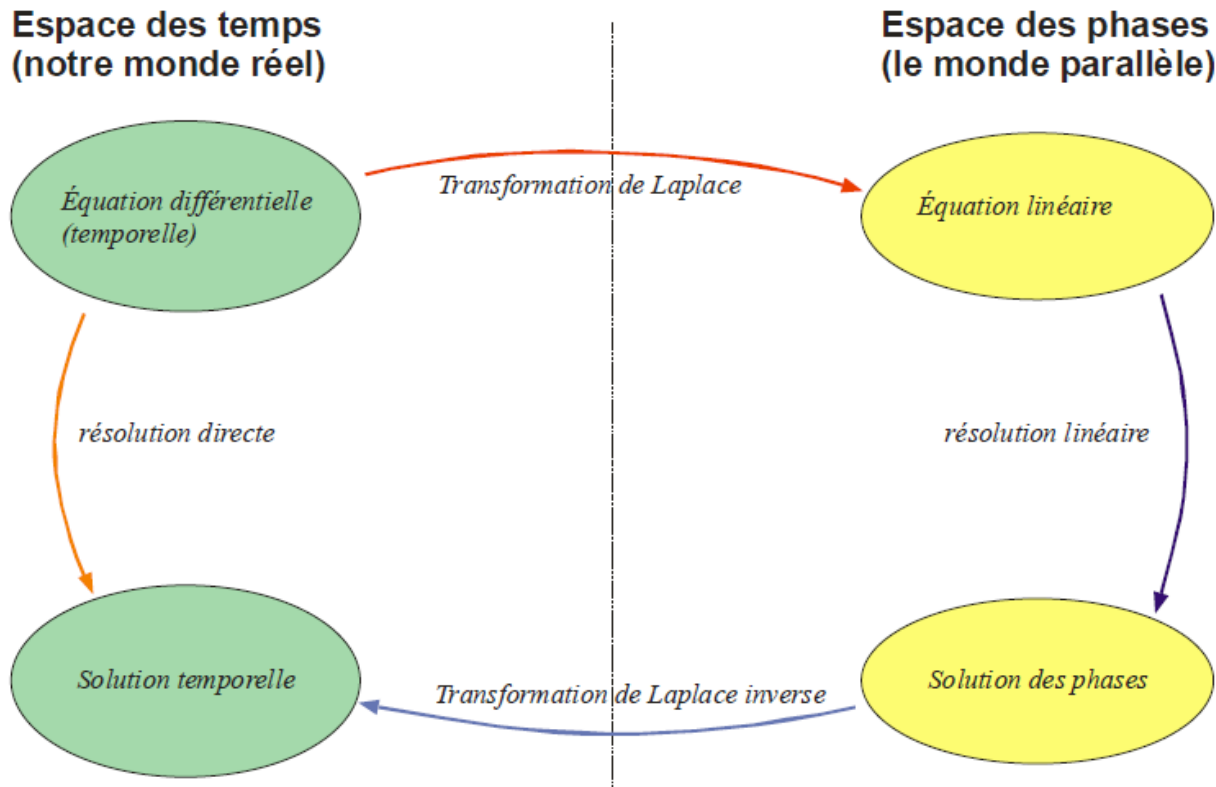


Figure 4.1 : Diagramme du principe de la transformée de Laplace

La transformée de Laplace fait elle-même partie d'une catégorie de transformations intégrales de la forme :

$$F(s) = \int_{t_1}^{t_2} K(s, t) \cdot f(t) dt \quad (4.1)$$

où la fonction $K(s, t)$ est appelée noyau de transformation.

La transformée de Laplace est une application, qui à une fonction $f(t)$ de l'espace des temps, est associée une fonction $F(s)$ de l'espace des phases telle que :

$$L[f(t)] = F(s) = \int_0^{+\infty} e^{-st} f(t) dt \quad (4.2)$$

IV.2 La fonction de transfert

IV.2.1 Définition

La fonction de transfert est une représentation mathématique, en termes de fréquence spatiale ou temporelle, de la relation entre l'entrée et le rendement d'un système (temps-invariable linéaire). Avec dispositifs optiques de formation image, par exemple, il est Transformée de Fourier du

fonction de diffusion de point (par conséquent une fonction de la fréquence spatiale) c.-à-d. la distribution d'intensité provoquée par un objet de point dans le champ visuel.

La fonction de transfert est utilisée généralement dans l'analyse de système à sortie unique à entrée unique, par exemple le cas des filtres électroniques. Il est principalement employé dans le traitement des signaux, théorie de communication, et théorie de commande. La plupart des vrais systèmes ont les caractéristiques « entrée-sortie » non linéaire, mais beaucoup de systèmes, une fois fonctionnés dans des paramètres nominaux (« surmenage ») ont un comportement qui est assez proche de linéaire. D'après la théorie de système de LTI, est une représentation acceptable du comportement d'entrée-sortie [34].

On considère une fonction de transfert à une entrée et une sortie de la figure 4.2 suivante :

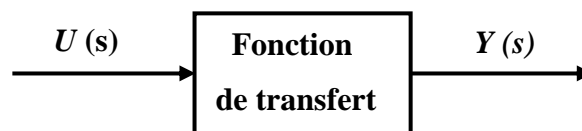


Fig. 4.2 Fonction de transfert.

A partir des équations différentielles à coefficients constants qui décrit un tel système, nous avons établi son équation caractéristique qui exprime la relation entre entrée et sortie :

$$a_0 y(t) + a_1 y'(t) + a_2 y''(t) + \dots = b_0 u(t) + b_1 u'(t) + b_2 u''(t) + \dots \quad (4.3)$$

Nous pouvons traduire l'équation caractéristique dans l'espace de Laplace, grâce à la transformée de Laplace selon les règles d'entrée- sortie :

$$a_0 Y(s) + a_1 s Y(s) + a_2 s^2 Y(s) + \dots = b_0 U(s) + b_1 s U(s) + b_2 s^2 U(s) + \dots \quad (4.4)$$

La mise en évidence des variables Y et U fait apparaître deux polynômes en s . N

$$(a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + \dots + a_n s^n) Y(s) = (b_0 + b_1 s + b_2 s^2 + \dots + b_m s^m) U(s) \quad (4.5)$$

La fonction de transfert qui est appelée parfois transmittance isomorphe est défini par le quotient des grandeurs de sortie et d'entrée, exprimées dans l'espace s . Sa valeur est obtenue par le quotient des polynômes en s formés par les coefficients de l'équation caractéristique :

$$H(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} \quad (4.6)$$

$$H(s) = \frac{b_0 + b_1 s + b_2 s^2 + \dots + b_{m-1} s^{m-1} + b_m s^m}{a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + \dots + a_{n-1} s^{n-1} + a_n s^n} = \frac{N(s)}{D(s)} \quad (4.7)$$

Dans une fonction de transfert réel, le degré n du polynôme dénominateur $D(s)$ sera toujours supérieur ou égal au degré m du polynôme numérateur $N(s)$. Seules des simplifications exagérées peuvent conduire au cas contraire. Si on utilise un tel modèle ultra simplifié, on peut obtenir dans certains contextes des résultats éloignés de la réalité.

IV.2.2 Les différents types de fonction de transfert :

Généralement, nous avons deux types, les fonctions de transferts en boucle ouverte et les fonctions de transfert en boucle fermée.

Un système est en boucle ouverte (figure 4.3) lorsque la commande est élaborée sans l'aide de la connaissance des grandeurs de sortie : il n'y a pas de retour. Dans le cas contraire, le système est dit en boucle fermée (figure 4.4). La commande est alors fonction de la consigne (la valeur souhaitée en sortie) et de la sortie. Pour observer les grandeurs de sortie, on utilise des capteurs. C'est l'information de ces capteurs qui va permettre d'élaborer la commande.

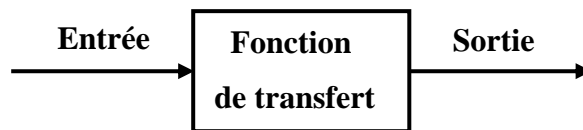


Figure 4.3: Schéma d'un système en Boucle Ouverte

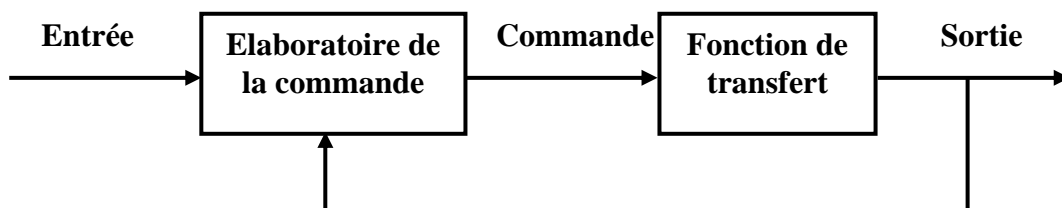


Fig. 4.4: Schéma d'un système en Boucle Fermée

IV .2 .3 Propriétés de la fonction de transfert

La fonction de transfert d'un système possède plusieurs propriétés utiles :

- 1- La fonction de transfert d'un système est la transformée de Laplace de sa réponse impulsionnelle. C'est-à-dire, si le signal d'entrée d'un système dont la fonction de transfert est $H(s)$ est une impulsion et si toutes les valeurs initiales sont nulles, alors la transformée du signal de sortie est $H(s)$.
- 2- On peut déterminer la fonction de transfert d'un système à partir de son équation différentielle, en prenant la transformée de Laplace et en laissant de côté tous les termes dépend des conditions initiales. La fonction de transfert $H(s)$ est alors donnée par $H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)}$
- 3- on peut obtenir l'équation différentielle du système à partir de la fonction de transfert en remplaçant la variable s par l'opérateur différentiel.
- 4- on peut déterminer la stabilité d'un système indépendant du temps à partir de son équation caractéristique.
- 5- les racines du dénominateur sont les pôles du système, et celles du numérateur ses zéros.

IV.2.4. Les différentes techniques de calcul de la fonction de transfert

On appelle fonction de transfert $H(z)$ d'un système discret ou échantillonné, le rapport des transformées en z de la sortie $Y(z)$ et de l'entrée $U(z)$ du système lorsque les conditions initiales sont nulles. Elle est donnée par l'équation (4.8) suivantes :

$$H(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} \quad (4.8)$$

C'est une représentation mathématique des systèmes dynamiques linéaires: la relation liant les grandeurs d'entrée et de sortie est une équation aux différences linéaire.

Deux manières standard de mise en forme de la fonction de transfert: la forme polynomiale et la forme pôles- zéros [35].

➤ La forme polynomiale standard

La forme polynomiale standard pour la fonction de transfert est donnée par:

$$H(z) = \frac{b_0 z^m + b_1 z^{m-1} + \dots + b_{m-1} z + b_m}{p^n + a_1 z^{n-1} + \dots + a_{n-1} z + a_n} = \frac{B_m(z)}{A_n(z)}, \text{ avec } b_0 \neq 0 \quad (4.9)$$

Ou par la forme équivalente en z^{-1}

$$H(z^{-1}) = z^{-(n-m)} \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_{m-1} z^{-(m-1)} + b_m z^{-m}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_{n-1} z^{-(n-1)} + a_n z^{-n}} \quad (4.10)$$

Notons que la condition de réalisabilité est que : $n \geq m$

➤ La forme pôles /zéros standard

La forme pôles/zéros standard pour la fonction de transfert est donnée par l'expression (4.11):

$$H(z) = K^* \frac{\prod_{i=1}^{n_z} (z - z_i)^{m_i}}{\prod_{i=1}^{n_p} (z - p_i)^{n_i}} \quad (4.11)$$

où m_i est l'ordre de multiplicité du zéro z_i : $m = \sum_{i=1}^{n_z} m_i$

n_i est l'ordre de multiplicité du pôle p_i : $n = \sum_{i=1}^{n_p} n_i$

IV.2.5 Les différentes techniques de l'analyse et de synthèse des performances des systèmes

IV.2.5.1. Diagramme de Bode [36, 37] :

Le module de la fonction de transfert (figure 4.5) s'exprime comme le rapport du module de la tension de sortie sur le module de la tension d'entrée du système considéré. En dB , on aura donc :

$$H_{dB} = 20 \text{Log}_{10}(H) = 20 \text{Log}_{10} \left(\left| \frac{\overline{V_s}}{\overline{V_e}} \right| \right) \quad (4.12)$$

Pour la suite, on utilisera Log pour signifier le logarithme en base 10.

Le décibel (dB) est une échelle logarithmique définie à partir des puissances de la façon suivante:

$$P_{dB} = 10 \text{Log}(P)_{10} \quad (4.13)$$

où P est une puissance exprimée en Watts sur une échelle linéaire.

Pour les tensions, le facteur devant le Log est 20 du fait que la puissance est proportionnelle au carré de la tension.

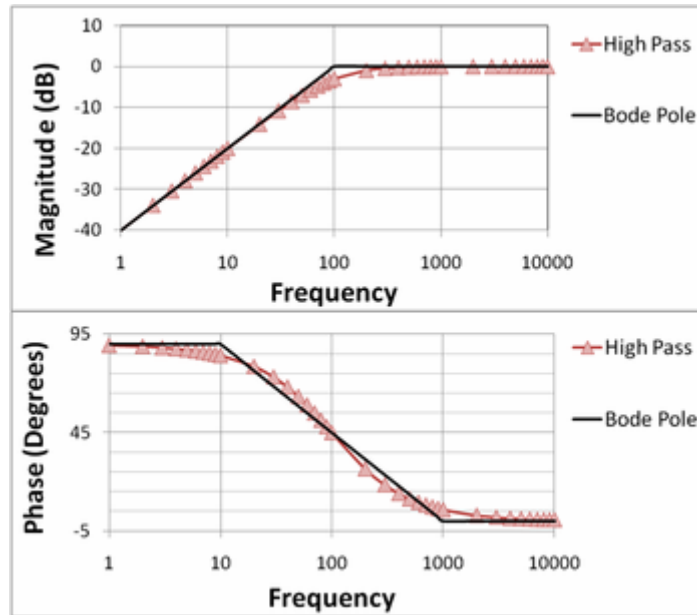


Figure 4.5 : Exemple du diagramme de Bode.

IV.2.5.2 Lieu de racine :

La technique du lieu des pôles (appelé aussi lieu d'Evans, lieu des racines et root locus en anglais) méthode de synthèse des correcteurs qui permet d'étudier sur un diagramme l'influence d'un paramètre de réglage sur la localisation des pôles du système en boucle fermée (figure 4.6). On sait que les propriétés des systèmes linéaires sont directement liées à la localisation des pôles et des zéros de la fonction de transfert du système en boucle fermée. On traitera de l'influence du gain k sur l'emplacement des racines de la FT en boucle fermée.

Le lieu des racines d'une fonction de transfert en boucle ouverte $H(s)$ est le graphe représentant les locations de tous les pôles du système en boucle fermée à un retour unitaire et de gain proportionnel.

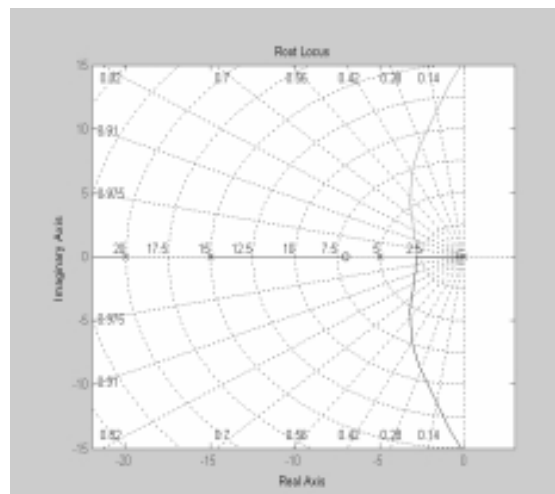


Figure 4.6 : Exemple du lieu des racines.

IV.2.5.3 Diagramme de Black :

Le diagramme de Black est une représentation de la réponse harmonique du système, c'est à dire une représentation de $H(j\omega)$ quand ω parcourt \mathbb{R} , où $H(p)$ est la fonction de transfert du système.

en abscisse: phase (en degrés) en ordonnée: gain (en décibels) .

L'abaque de Nichols, qui définit les lieux de module ou / et phase constantes en boucle fermée à retour unitaire, est (figure 4.7):

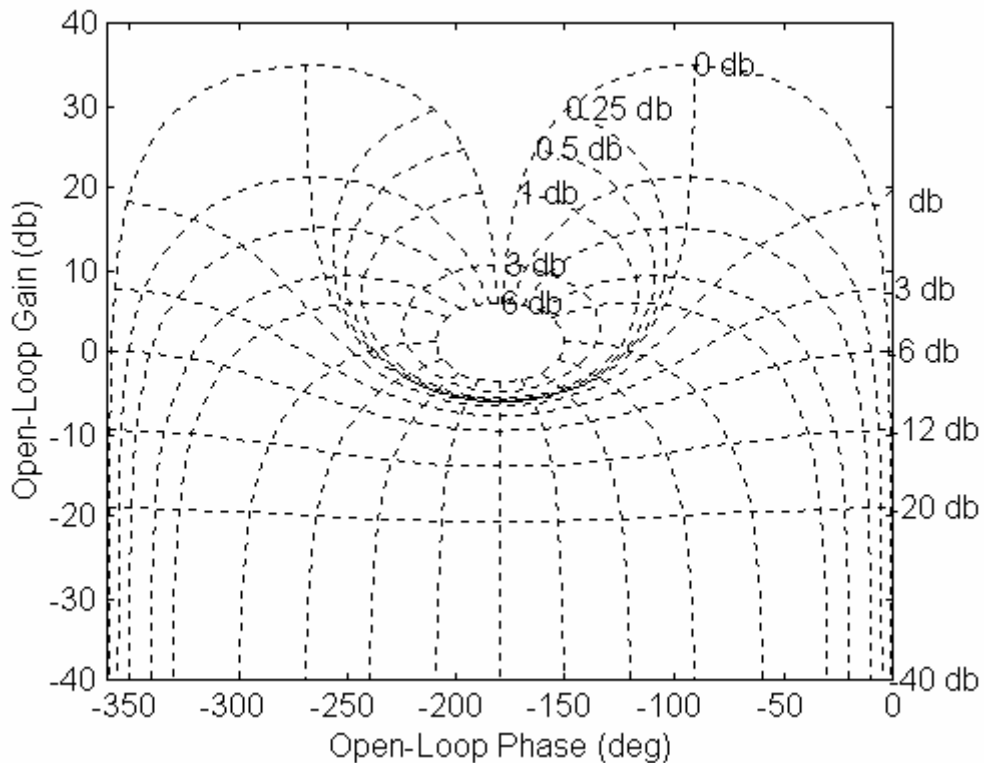


Figure 4.7 : Diagramme de Black

IV.1.4.1. Diagramme de Nyquist

C'est une méthode graphique permettant de déterminer si le dénominateur de $HBF(s)$ n'a pas de pôles instables à partir de la connaissance de $HBO(s)$. Elle est basée sur le théorème de Cauchy.

Soit $F(s)$ une fonction de la variable complexe s admettant P pôles et Z zéros dans un contour fermé C . Lorsque s décrit le contour C , la courbe $F(C)$, image de C par $F(s)$ effectue $T=P-Z$ tours autour de l'origine. T est compté positivement si C et $F(C)$ sont orientés dans le même sens et négativement autrement.

Le contour d'exclusion de Nyquist G englobe tout le demi-plan droit correspondant aux pôles et zéros à parties réelles strictement positives de la fonction de transfert $F(s)$ (figure 4.8).

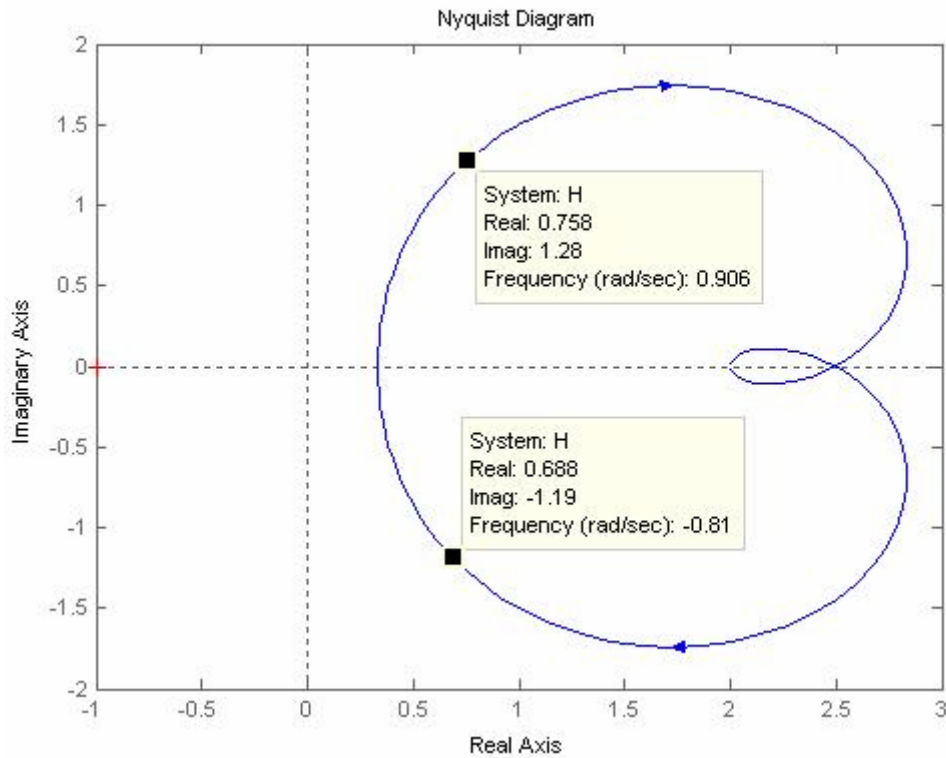


Figure 4.8 : Diagramme de Nyquist

IV.3. Résultats et interprétation

IV.3.1 Détermination de la fonction de transfert du filtre électrostatique

A partir des valeurs expérimentales présentées dans le chapitre trois, nous avons représenté graphiquement la caractéristique entrée sortie de notre système. Les variations sont représentées dans la figure (4.9). Nous constatons si le potentiel augmente, le rendement augmente aussi.

Donc à partir de cette courbe, nous cherchons à déterminer un modèle fiable et original pour notre système. Nous cherchons à identifier les différents paramètres du modèle de Strejc suivant :

$$H(P) = \frac{K}{(1 + \tau P)^n} e^{-TP} \quad (4.14)$$

Pour cette première partie, nous cherchons à déterminer le gain K , la constante du temps T et le retard τ .

Pour déterminer les paramètres du modèle, nous utilisons le tableau 4.1 suivant :

n	Tu/Ta	Tu/T	Ta/T	Y _N	T ₁ /T	T _m /T	T _m /T _a
1	0	0	1	0	0	1	1
2	0.104	0.282	2.718	0.264	1	2	0.736
3	0.218	0.805	3.695	0.323	2	2.5	0.677
4	0.319	1.425	4.465	0.353	3	2.888	0.674
5	0.404	2.100	5.119	0.371	4	3.219	0.629
6	0.493	2.811	5.699	0.384	5	3.510	0.616
7	0.570	3.549	6.226	0.394	6	3.775	0.606
8	0.642	4.307	6.711	0.401	7	4.018	0.599
9	0.709	5.081	7.164	0.407	8	4.245	0.593
10	0.773	5.869	7.590	0.413	9	4.458	0.587

Tableau 4.1 : Table de Strejc

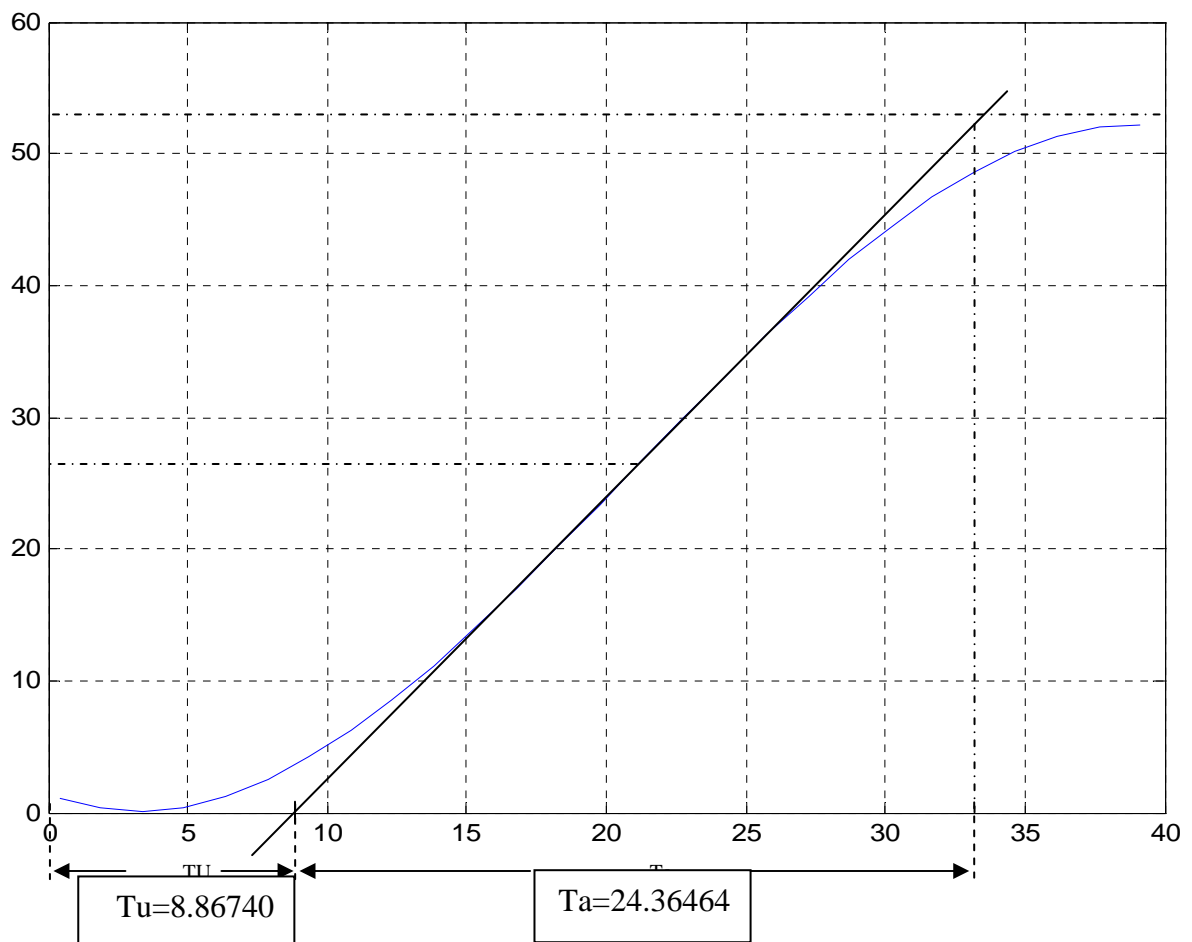


Figure 4.9 : Caractéristique entrée-sortie.

Nous avons calculées les différents paramètres comme suit :

$$\frac{T_u}{T_a} = \frac{8.86740}{24.36464} = 0.36394 \Rightarrow n = 4$$

$$n = 4 \Rightarrow \frac{T_a}{T} = 4.465 \Rightarrow T = \frac{24.36464}{4.465} = 5.45680 \text{ s}$$

$$n = 4 \Rightarrow \frac{T'_u}{T_a} = 0.319 \Rightarrow T'_u = 0.24.36464 \times 0.319 = 7.77594 \text{ s}$$

$$\tau = T_u - T'_u = 8.8674 - 7.77594 = 1.09146$$

$$K = 0.5315559$$

Donc la fonction de transfert de notre système (filtre électrostatique) est :

$$H(P) = \frac{0.5315559}{(1 + 5.4568P)^4} e^{-1.09146P} \quad (4.15)$$

IV.3.2 Analyse des performances du système

La représentation simple est celle de la figure 4.10 suivante :

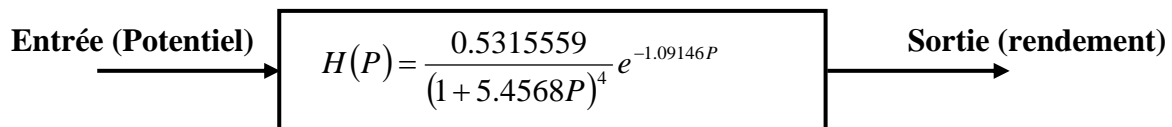


Figure 4.10 : Représentation simplifiée du modèle (BO).

Pour la représentation en boucle fermée nous avons (figure 4.11) :

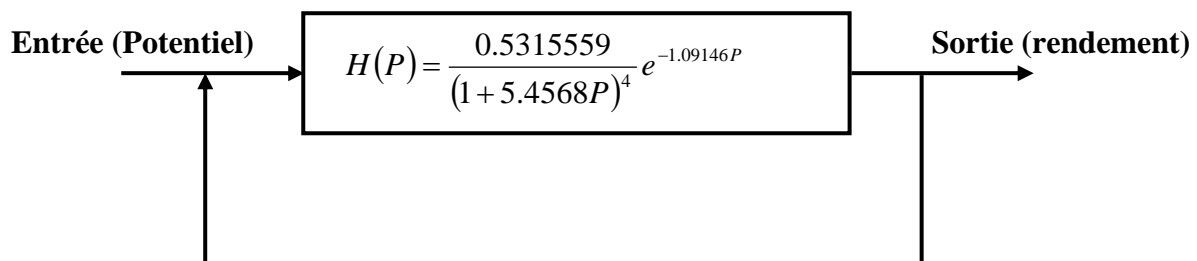


Figure 4.11 : Représentation du modèle en boucle fermée.

La fonction de transfert dans ce cas est :

$$TF = \frac{0.5315559}{887.8s^4 + 650.6s^3 + 178.8s^2 + 21.83s + 1.532} \quad (4.16)$$

Les différentes variations sont regroupées dans la figure (4.12) suivantes :

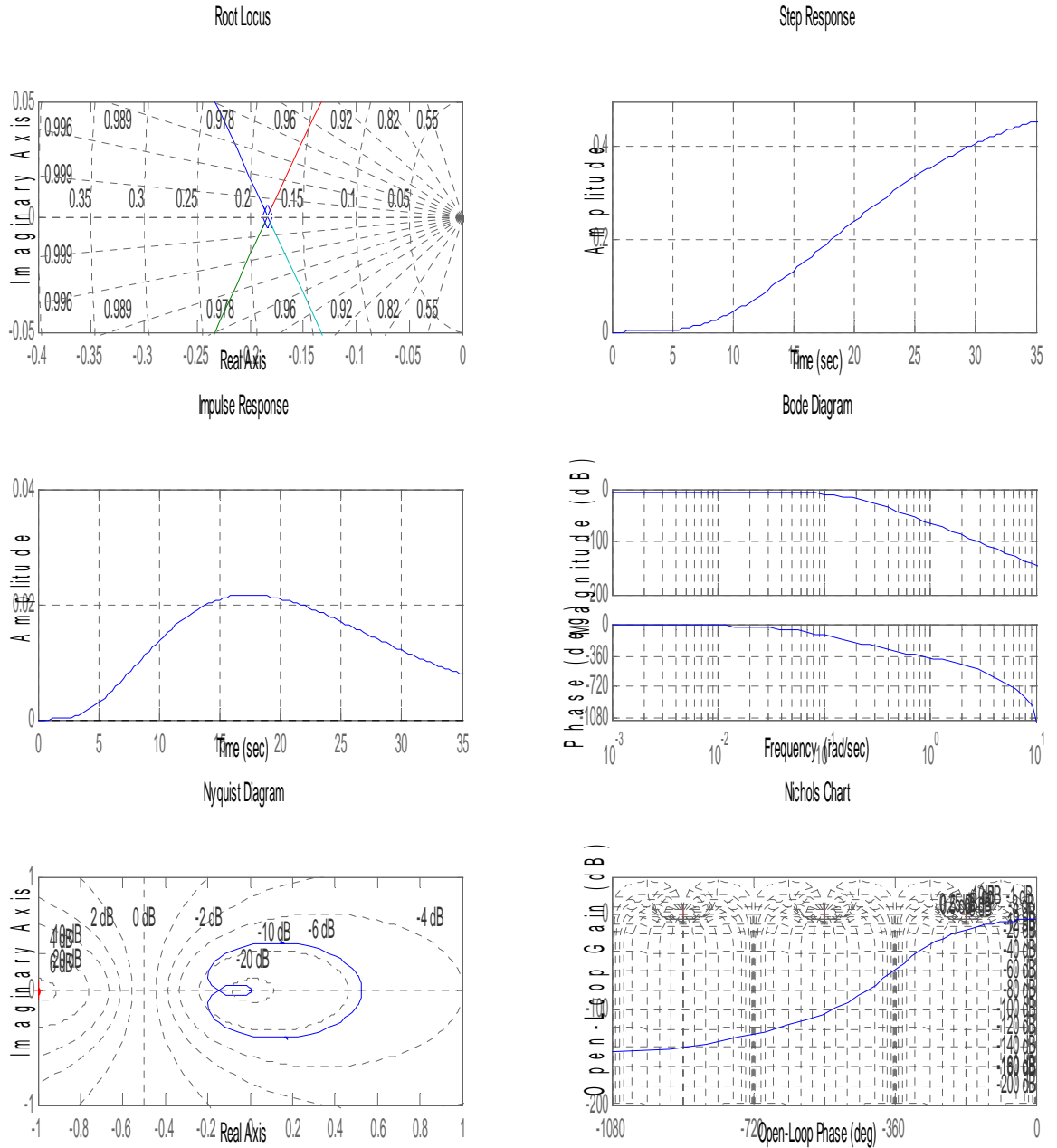


Figure 4.12 : Représentation des différentes caractéristiques du modèle original de Strejc.

IV.3.3 Design de correcteurs sous MATLAB

La modélisation n'a d'utilité que si le système que l'on crée peut être analysé et caractérisé par la suite. Une fois un modèle complété, nous disposons aussi des outils qui nous permettent de faire se travail d'analyse. Dans cette étude, nous avons utilisé un modèle simple et un correcteur dont les constantes on été fixées par essai et erreur. Dans le cas de systèmes plus complexes, il est utile et même crucial de pouvoir connaître le comportement de notre système dans certaines conditions [38].

Une fois notre système caractérisé (dans le cas précédent, nous avons déjà la fonction de transfert, mais généralement, c'est ce que nous chercherons à trouver), nous voulons le contrôler en boucle fermée de façon à obtenir un comportement précis. Reprenons notre modèle précédent et tâchons de le contrôler pour obtenir ce que l'on désire (figures 4.13 et 4.14).

Tout d'abord, il faut définir notre système sous MATLAB en créant une nouvelle fonction de transfert. Ensuite, nous démarrons l'utilitaire sisotool.

Nous avons présenté ici un survol des possibilités que proposent MATLAB dans le cadre de la conception, du design et de la simulation de systèmes dynamiques. Ces outils sont utiles et leur utilisation lors des laboratoires à venir est suggérée.

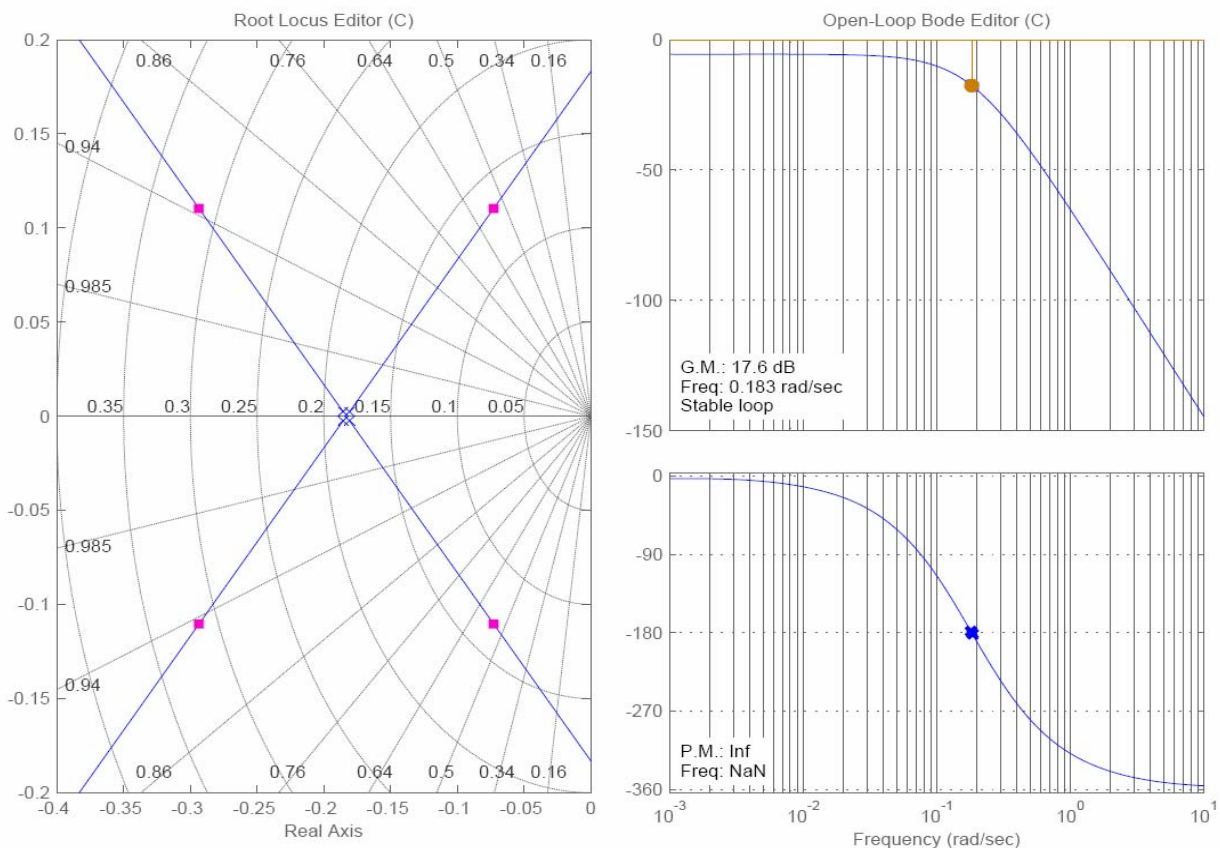


Figure 4.13: Synthèse du performance du modèle original.

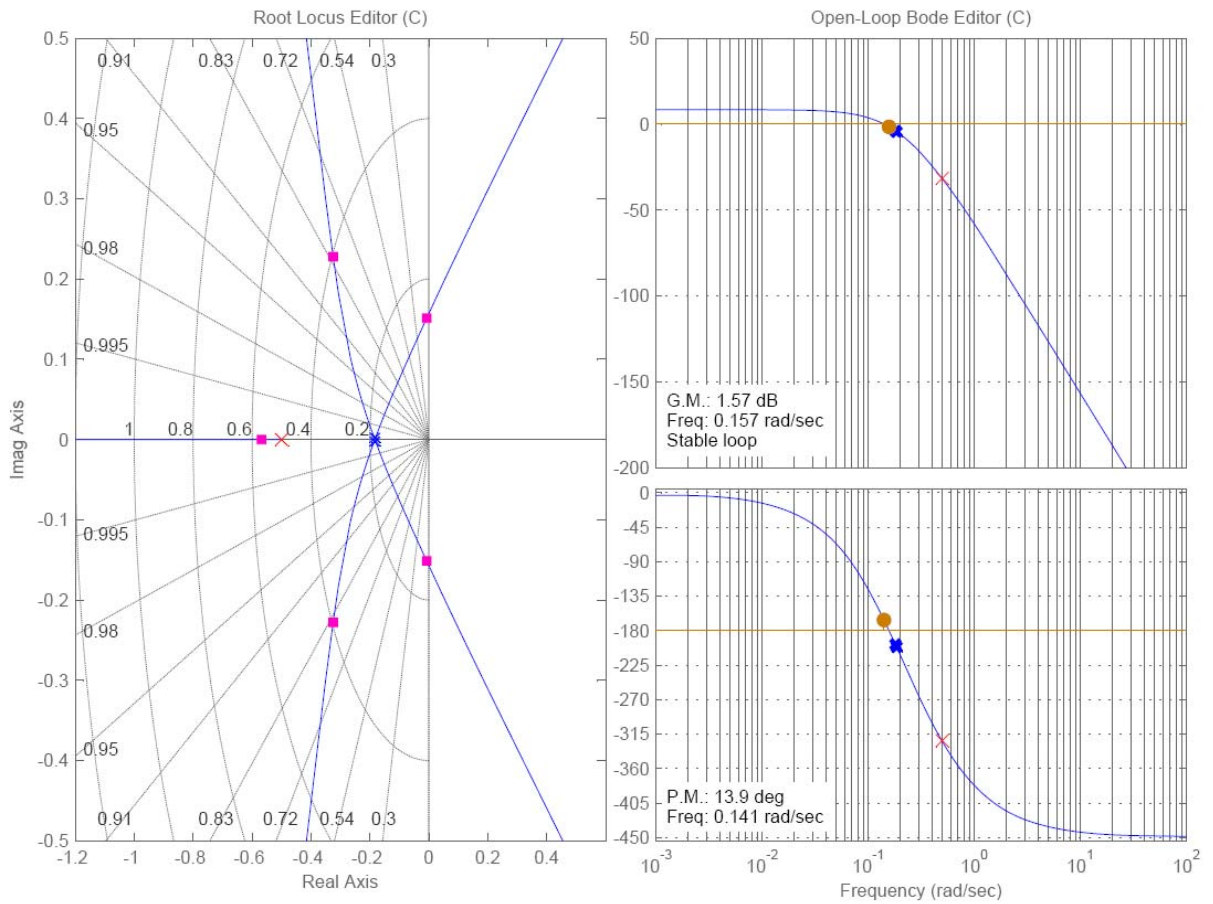


Figure 4.14: Synthèse du performance du modèle modifié.

Donc le schéma bloc du modèle amélioré est représenté sur la figure (4.15) suivante :

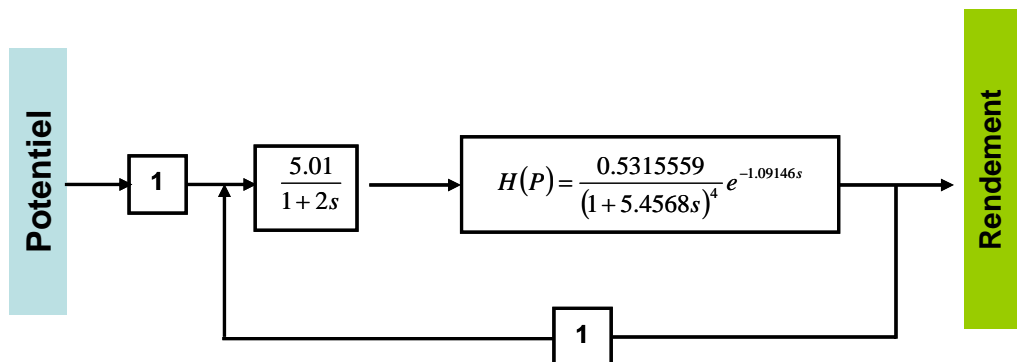


Figure 4.15 : Schéma bloc du modèle amélioré.

Nous avons représenté dans La figure (4.16), les différents diagrammes temporels et fréquentiels. Pour permettre de faire une synthèse générale. Nous remarquons qu'il y a une amélioration considérable dans la réponse du système. Le gain statique est passé de 0.848 à 5.01. le dépassement est passé de 0.59 à 0.0502.

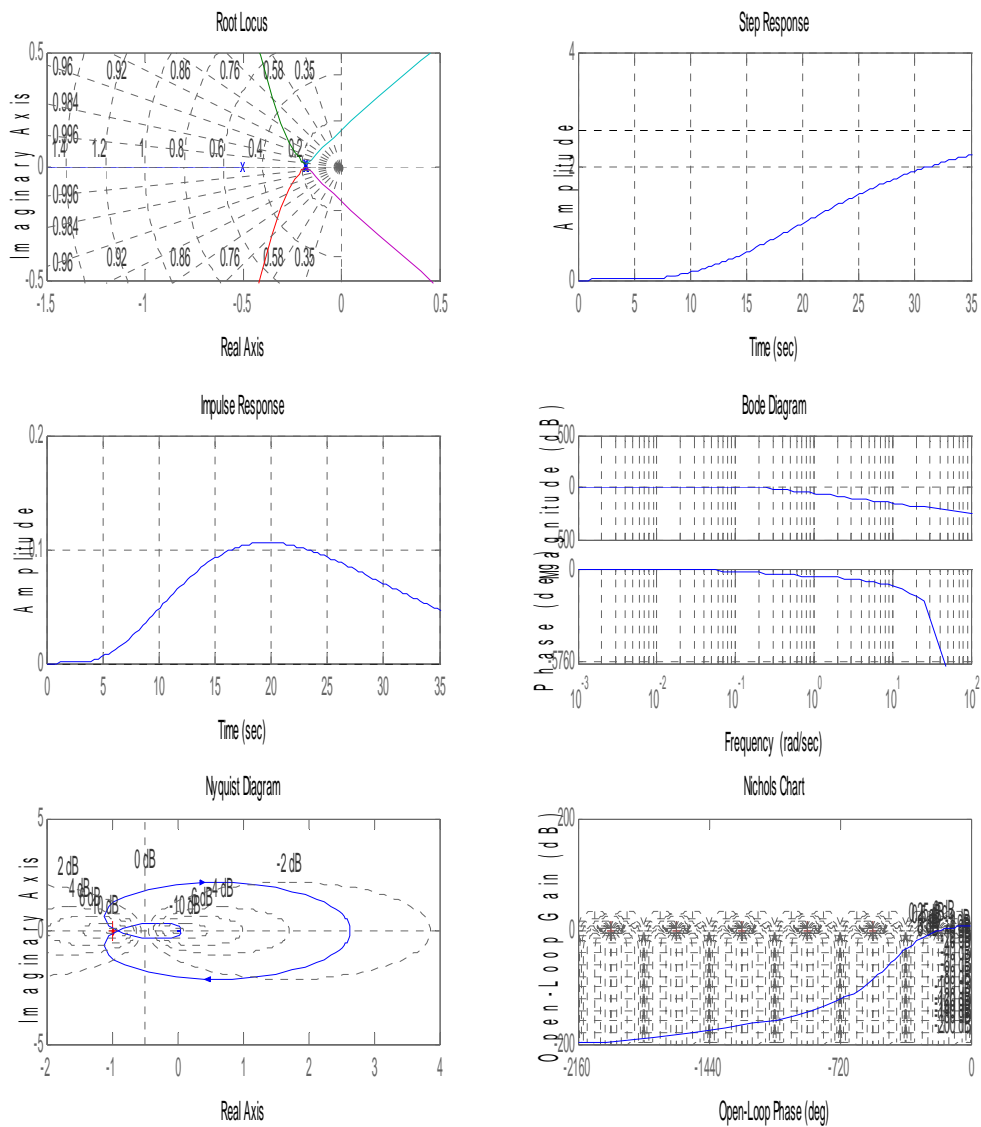


Figure 4.16 : Représentation des différentes caractéristiques du nouveau modèle.

IV.4 Conclusion

Une approche graphique est généralement le moyen le plus facile à analyser et concevoir des boucles de rétroaction. Nous avons donc examiné la façon générale la représentation graphiquement la fonction de transfert. Il existe plusieurs façons de le faire, mais la méthode proposée par H.W. Bode dans les années 1930 est particulièrement utile. La méthode de Bode consiste à tracer deux courbes (gain et de phase) en fonction du logarithme de la fréquence.

Habituellement, le gain en décibels, dB en abrégé, et la phase sont tracées de façon linéaire le long de l'axe Y sur du papier millimétré qui a plusieurs cycles d'une échelle logarithmique sur l'axe des x. Chaque cycle représente un facteur de dix en fréquence. Ce papier spécial est connu sous le nom du papier graphique semi-logarithmique, et il ou un programme d'ordinateur avec des graphiques log-log sont essentiels pour la représentation des diagrammes de Bode.

Un test de stabilité pour les systèmes invariants dans le temps linéaire peut également être calculé dans le domaine fréquentiel. Il est connu en tant que critère de stabilité de Nyquist. Il est basé sur le résultat de l'analyse complexe connu en tant que principe de Cauchy. L'importance de la stabilité de Nyquist réside dans le fait qu'il peut également être utilisé pour déterminer le degré relatif de la stabilité du système en produisant la phase et les marges de stabilité du gain. Ces marges de stabilité sont nécessaires pour les techniques de conception du contrôleur.

rlocus en matlab calcule le lieu des racines d'Evans d'un modèle SISO en boucle ouverte. Le lieu des racines donne les trajectoires des pôles en boucle fermée. Le lieu des racines est utilisé pour étudier les effets des gains divers sur les lieux des pôles en boucle fermée. À leur tour, ces endroits fournir des informations indirectes sur le temps et les réponses en fréquence. Grâce à la formulation systématique de la série de règles du lieu des racines, nous attendons pour l'explication plus claire et plus simple des phénomènes dynamiques du système. Les règles du lieu des racines nous donner une compréhension claire et précise des motifs par un ensemble infini d'équations caractéristiques.

Conclusion générale

Nous intéressons dans cette étude à l'analyse de la réponse du système (expérimentale ou simulée). Plusieurs utilisations peuvent être faites de ces travaux :

- optimisation de la modélisation pour obtenir une réponse simulée comparable à une réponse expérimentale
- analyse de la réponse temporelle et choix d'un correcteur pour avoir un système performant
- analyse de la structure de l'asservissement à mettre en place pour obtenir un système performant.

Ces différents points peuvent être découverts à travers des travaux de recherches approfondis (réponses temporelles des systèmes fondamentaux, analyse harmonique, analyse des performances, choix des correcteurs,...).

Dans le contexte actuel de la modélisation analytique, l'étude d'identification d'un système nous permet d'expliquer physiquement le fonctionnement d'un système. Néanmoins, quelques inconvénients subsistent notamment en ce qui concerne la nécessité de simplification des hypothèses, les systèmes physiquement complexes ainsi que certaines lois physiques régissant le fonctionnement du système qui sont mal connues.

Dès lors, nous sommes obligés de faire recours à l'expérience afin de valider le modèle et de déterminer ses paramètres.

L'identification d'un système est la détermination d'un modèle directement à partir de l'expérience sans le recours obligatoire à une analyse physique, dans notre cas, il s'agit de déterminer les fonctions de transferts et les équations gouvernant le phénomène.

L'identification non-paramétrique de systèmes dynamiques consiste à en obtenir, i.e. à en estimer, les réponses temporelles (e.g. indicielle, impulsionnelle) et fréquentielle sous forme expérimentale, sans en rechercher directement les paramètres ou la fonction de transfert (celle-ci n'existant par ailleurs que dans le cas linéaire). Le problème de l'identification non-paramétrique est de définir les conditions d'expérience à satisfaire pour que les réponses mesurées reflètent le comportement effectif (celui que le régulateur verra) du système que l'on étudie et d'en chiffrer le degré de concordance. Il faut en effet réaliser qu'à cause des bruits et autres perturbations, l'on n'a pas accès au signal de sortie du "vrai" système.

La démarche de simulation permet la réalisation directe de l'équipement sans passer par de nombreux prototypages. Le gain de coût est important et direct. Par ailleurs, les temps de simulation étant bien plus courts que des temps de prototypage, le client raccourcit ses cycles de développement ainsi que le délai entre l'investissement et sa rentabilisation.

En passant du virtuel au réel, les développements trouvent une réalisation concrète, à même de satisfaire les clients les plus exigeants. La maîtrise de l'ensemble de la chaîne de conception et développement garantit une qualité optimum. Cette étude présente une démarche concrète de dimensionnement d'un système énergétique complexe à l'aide d'outils de simulation. La démarche proposée permet de faire l'économie de nombreux prototypes, en représentant virtuellement le système et en focalisant rapidement le développement sur les points importants. Elle permet d'évaluer le dimensionnement optimum des organes, en testant différentes situations ; les organes n'étant pas surdimensionnés, le coût de réalisation est minimum. Presque tous les phénomènes observés quotidiennement ont des aspects dynamiques importants et peuvent être décrits par un ensemble d'entrées et sorties. Plusieurs systèmes dynamiques peuvent être étudiés et analysés d'une façon intuitive où en ayant recours à un prototype. Ils existent toutefois des systèmes dynamiques pour lesquels la relation entre les entrées et les sorties est souvent compliquée et/ou incertaine, qui sont constitués par un grand nombre de sous-systèmes et/ou variables et pour lesquels l'action de contrôle à effectuer est non triviale (par exemple contrôler un navire-citerne ou d'une voiture sur le verglas). Aussi, l'expérimentation par prototype a plusieurs désavantages: coût, lenteur, impraticabilité, risque. Une alternative réside dans l'étude formelle des systèmes dynamiques qui a été à la base des nombreuses avancées dans la compréhension de la réalité (par exemple les systèmes de communications et de commandes) et dans la réalisation des technologies (par exemple le pilote automatique d'un avion).

De nombreuses présentations graphiques ont été proposées dans ce projet de fin des études du cycle ingénieurs tel que la réponse impulsionnelle, les diagrammes de Bode, Nyquist, Evens, ... En basons sur l'analyse et la synthèse de toute ces information, nous pouvons représenter le comportement du problème et de faire le choix du correcteur pour améliorer la qualité de notre système.

Comme perspective, Afin de prévoir le comportement d'un système, on doit non seulement être capable de proposer une modélisation des entrées mais également du système. Puisque l'objectif principal de la modélisation est de permettre de prédire le comportement d'un système. Il fait apparaître la chaîne d'action ou directe (celle qui agit pour obtenir la consigne souhaitée) ainsi que la chaîne de retour ou d'information qui informe sur la grandeur réellement obtenue.

*Références
bibliographiques*

- [1] Aissani A., Modélisation et simulation, OPU, pp. 9 – 39, 2007.
- [2] SALANNE J-P., Contrôle du point de fonctionnement des décharges électriques par l'intermédiaire de leur alimentation, Thèse De doctorat, Université de Toulouse, 2005.
- [3] Borne P. Modélisation et identification des processus, Tome 2, Editions Technip, Paris, France, 1992.
- [4] Rivoire M., Ferrier J-L, Cours d'automatique. Tome 3, Edition Eyrolles, Paris, France. ,1993.
- [5] Danko J., Ondrovi M., Vojtech V., Robust controller design to control a warm air – Drying chamber. Journal of Electrical engineering, VOL. 55, NO. 7-8, pp. 207-211, 2004.
- [6] Mikle J., Miroslav F., Process Modelling, Identification, and Control. Tome 2, Slovak University of Technology in Bratislava, 2004.
- [7] Boumahrat M., Gourdin A., Méthodes numériques appliquée, OPU, pp. 293 – 364, 1993.
- [8] Alexander D. P., Zayed M. R., Adaptive filtering primer with matlab, CRC, Taylor & Francis, New York, 2006.
- [9] Saiyasitpanich P. (2006) Control of Diesel Particulate and Gaseous Emissions Using a Single-Stage Tubular Wet Electrostatic Precipitator. Thèse de doctorat de l'université de Cincinnati, USA.
- [10] Benamar B., La faisabilité de l'électrofiltration d'une atmosphère chargée en poussières de bois : étude expérimentale et numérique, Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 1, France, 2008.
- [11] Lahjomri A. C. et Atten P. (1987) Simulation EHD des précipitateurs électrostatiques. Revue Phys. Appl. 22, 1087 – 1094.
- [12] Kim S. H., Lee K. W. (1999) Experimental study of electrostatic precipitator performance and comparison with existing theoretical prediction models. J. Electrostatics, 48, 3-25.
- [13] Kim S. H., Park H. S., Lee K. W. (2001) Theoretical model of electrostatic precipitator performance for collecting polydisperse particles. J. Electrostatics, 50, 177-190.
- [14] Xiangrong Z., Lianze W., Keqin Z. (2002) An analysis of wire-plate electrostatic precipitator. J. Aerosol Science, 33-11, 1595-1600.
- [15] McDonald J. R., Smith W. B. & Spencer H. W. (1978) A mathematical model for calculating electric conditions in wire-duct electrostatic precipitation devices. J. of Applied physics, 48, N°6, 2231 – 2243.
- [16] Lawless P. A. (1989) Numerical solution of Laplace's equation and ion current flow by the use of flux tube / equipotential relaxation. IEEE- IAS annual meeting, San- Diego, 1999-2006.

- [17] Gooch J. P. & Francis N. L. (1975) A theoretically based mathematical model for calculation of electrostatic precipitator performance. *Journal of The Air Pollution Control ASS.*, 25 (2), 108 – 113.
- [18] Cristina S. & Feliziani M. (1995) Calculation of ionised fields in DC electrostatic precipitators in the presence of dust and electric wind. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, IA31 (6), 1446- 1451.
- [19] Meroth A. M. (1997) Numerical electrohydrodynamics in electrostatic precipitators. Ph.D. Thesis, Karlsruhe University 1, Germany,
- [20] Tochan P. (1997) Etude numérique et expérimentale d'électrofiltres industriels. Thèse de Doctorat de l'université Joseph Fourier – Grenoble 1, France
- [21] Medlin A. J. (1998) Electrohydrodynamic modelling of fine particle collection in electrostatic precipitators. Ph.D. Thesis, university of New South Wales, Australia.
- [22] Nikas K.S.P., Varonos A.A., Bergeles G.C. (2005) Numerical simulation of the flow and the collection mechanisms inside a laboratory scale electrostatic precipitator. *J. Electrostatics*, 63, 423-443.
- [23] Neimarlija N., Demirdzic I., Muzaferiya S. (2009) Finite volume method for calculation of electrostatic fields in electrostatic precipitator. *J. Electrostatics*, 67, 37-47.
- [24] Dramane B., Zouzou N., Moreau E. et Touchard G. (2009) Electrostatic precipitation of submicron particles using a DBD in axisymmetric and planar configuration. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 16, Issue 2, pp. 343-351.
- [25] H. Nouri , N. Zouzou, E. Moreau, L. Dascalescu, Y. Zebboudj, Effect of relative humidity on the collection efficiency of a wire-to-plane electrostatic precipitator, **The IEEE Industry Applications Society Annual Meeting**, Houston, Tx, **ISSN:** 0197-2618, **Print ISBN:** 978-1-4244-6393-0 3-7 October, 2010.
- [26] A. Zukeran, P. Looy, A. Chakrabarti, A. Berezin, S. Jayaram, J. Cross, T. Ito, and J. Chang. Collection efficiency of ultrafine particles by an electrostatic precipitator under dc and pulse operating modes. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 35(5) :1184– 1190, 1999.
- [27] R. C. Mannix, K. P. Nguyen, E. W. Tan, E. E. Ho, and R. F. Phalen. Physical characterization of incense aerosols. *The Science of the total environment*, 193(2) :149–58, 1996.
- [28] Dramane B. (2009) Précipitation électrostatique de particules submicroniques- par décharge à barrière diélectrique- étude électrique, granulométrique et aérodynamique. Thèse de doctorat de l'université de Poitiers, France.
- [29] Dumitran L. M. (2001) Collection des fines particules dans un dépoussiéreur électrostatique. Thèse de Doctorat de l'Université Joseph Fourier, Grenoble, France.
- [30] A. Mizuno, "Electrostatic precipitation", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 7, pp. 615-624, 2000.

- [31] Leonard G., Mitchner M. & Self S.A., Particle transport in electrostatic precipitators. Atmospheric environment. Vol. 14, pp.1289-1299, 1980.
- [32] Danko J., Ondrovicova M., Vesely V., Robust controller design to control a warm air – Drying chamber, Journal of electrical engineering, V. 55, NO. 7-8, pp. 207-211, 2004.
- [33] Bi Q., Cai W-J., Lee E-L., Wang Q- G, Hang C-C., Zhang Y., Robust identification of first-order plus dead-time model from step response, Pergamon, Control Engineering Practice 7, pp. 71-77, 1999.
- [34] Ramirez R., Aguado A., Control of a biomass combustor using the general smith predictor, Journal of Applied Research and Technology, , Vol. 1, No.1, pp.53-62, 2002.
- [35] Guyenot P., Hans T., Régulation et asservissement, Troisième édition, Eyrolles, pp. 1_53, 1992.
- [36] Distefano J. J., Stubberud A. R., Williams I. J., Systèmes asservis 2, Serie schaum, édition française (M. Lobenberg), groupe McGrawhill, pp. 179 – 295, 1985.
- [37] Edward B. Magrab & al., An engineer's gUide to matLAB, prentice Hall, pp. 391 – 445, 2000.
- [38] D.-W. Gu, P. Hr. Petkov and M. M. Konstantinov, Robust Control Design with MATLAB, British Library Cataloguing in Publication Data Gu, D.-W., Springer, London , 2005.

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
D'INGENIEUR D'ETAT EN GENIE ELECTROTECHNIQUE

OPTION: COMMANDE ELECTRIQUE

Proposé et dirigé par : Monsieur: H. NOURI

Présenté par : ALIOUI Ouahid
BOUTI Abderrazak
BOUDJELLAL Djamel Eddine

Thème :

**MODELISATION DU FONCTIONNEMENT DES FILTRES
ELECTROSTATIQUES PAR UNE IDENTIFICATION HYBRIDE**

Résumé :

De nombreux problèmes industriels demandent de représenter par une fonction la relation déterministe entre des grandeurs que l'on peut mesurer. Parmi ces problèmes, la modélisation de processus de production ou de transformation de matière tient une place de choix ; dans ce cas, une grandeur d'intérêt est alors essentiellement fonction d'un ensemble de grandeurs de commande.

Ce projet de fin d'étude pour le cycle ingénieur, propose une analyse et une synthèse des caractéristiques de bon fonctionnement des filtres électrostatique réels. Ce sujet, englobe dans les sciences de l'ingénieur du fait des nombreuses applications technologiques. Nous nous sommes efforcés de comprendre et de modéliser ce phénomène en faisant intervenir plusieurs domaines différents tel que la physique des décharges, l'automatique et les mathématiques.

Mots Clés:

Précipitateur électrostatique, Identification paramétrique, Fonction de transfert, Diagrammes de Bode , d'Evens et de Nyquist, Contrôle Robuste.