

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



UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES
Faculté de Génie Electrique
Département d'Électrotechnique

Thèse présentée par :

Seddik Touhami

Pour l'obtention du diplôme de :

Doctorat Es-Sciences en Électrotechnique

Option : Electrostatique

Intitulé de thèse :

**Etude et mise au point des stratégies et des
systèmes de contrôle destinés au pilotage des
processus de séparation électrostatique**

Présentée devant le jury composé de :

Président :	Pr. Tilmantine Amar	Professeur	Université de Sidi Bel Abbès
Directeur de thèse :	Pr. Medles Karim	Professeur	Université de Sidi Bel Abbès
Co-directeur de thèse	Pr. Dascalescu Lucien	Professeur	Université de Poitiers(France)
Examineurs :	Dr. Miloudi Mohamed	M.C.A	Université de Sidi Bel Abbès
	Pr. Rahli Mostafa	Professeur	Université M.B. Oran
	Pr. Ouiddir Rabah	Professeur	Université M.B. Oran

Soutenue le : 01/06/ 2016

REMERCIEMENTS

Pour débiter ce manuscrit je souhaite remercier les individus qui au cours de la thèse ont contribué à son déroulement.

- Directeur de thèse, Monsieur **Medles Karim** Professeur à l'université de Sidi Bel Abbas, à qui j'exprime ma profonde gratitude de m'avoir encadré et ma profonde reconnaissance pour ces conseils avisés ses encouragements constants et la confiance qu'il m'a faite en me donnant la chance de travailler sur un sujet aussi riche.
- Co-directeur de thèse monsieur **Dascalescu Lucian** Professeur à l'université de Poitiers pour son aide précieuse et les remarques utiles qu'il m'a procurées durant le stage longue durée effectué au sein du Laboratoire d'Electrostatique Appliquée de l'IUT d'Angoulême.
- Monsieur **Tilmatine Amar**, professeur à l'université de Sidi Bel Abbas, pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de thèse.
- Mes remerciements vont également aux personnes qui ont acceptés de prendre part au jury de ma thèse : Monsieur **Rahli Mostafa** Professeur à l'université Mohammed Boudiaf d'Oran ; Monsieur **Ouidir Rabah** Professeur à l'université Mohammed Boudiaf d'Oran et Monsieur **Miloudi Mohammed** Maître de conférences à l'université de Sidi Bel Abbas. Je les prie de bien vouloir accepter mes plus vifs et sincères remerciements.
- C'est avec reconnaissance que je remercie le directeur de l'IUT d'Angoulême monsieur **Zegloul Thami** pour la patience qu'il a su témoigner lors de la révision du manuscrit de cette thèse.
- Je remercie chaleureusement les personnel de notre laboratoire et mes collègues de travail de l'Université de Sidi bel Abbas et ceux de l'université de Mascara en particulier **Aksa Wassim Rezoug Mohammed** et **Dahou Omar**. et je souhaite une bonne continuation aux doctorants du laboratoire APELEC et IRECOM, de Sidi bel Abbas et de l'électrostatique appliquée de l'IUT d'Angoulême.
- En fin je voudrais remercier les membres de ma famille pour m'avoir encouragée tout au long de ma thèse.

Touhami Seddik

16/05/2016

Tables des matières

Introduction générale	2
Chapitre I : Etat de l'art des techniques de traitement des DEEE	6
I.1 Réduction de la taille des DEEE	8
I.2 Séparation électrostatique des DEEE	15
I.3 Les améliorations et les nouvelles inventions dans le domaine de la séparation électrostatique.....	22
I.4 Bibliographie sur les applications des processus de séparations électrostatiques.	25
I.5 Conclusion	26
Chapitre II : Modélisation expérimentale des processus de séparation électrostatique	27
II.1 Modélisation empirique d'un séparateur électrostatique à cylindre tournant .	27
II.2 Modèle empirique polynomial.....	30
II.3 Modèle empirique non linéaire à base de réseau de neurones	46
II.4 Conclusion.....	54
Chapitre III : Méthodes d'optimisations	55
III.1 Optimisation du processus de SE	55
III.2 Méthodes du gradient.....	58
III.3 Méthode de Nelder & Mead « NM »	63
III.4 Méthode des Algorithmes Génétiques	65
III.5 Conclusion	71
Chapitre IV : Stratégies de contrôle - commandes d'un séparateur électrostatique	72
IV.1 Systèmes élémentaires d'un séparateur à cylindre tournant.....	72
IV.2 Modèles utilisés dans la simulation.....	76
IV.3 Simulation d'une variation du débit.....	81
IV.4 Contrôle du processus de séparation électrostatique.....	85
IV.5 Conclusion	96
Conclusion générale	97

Introduction générale

La forte croissance de la production des équipements électriques et électroniques et leurs faibles durées de vie entraînent actuellement une augmentation du volume des Déchets d'Équipements Électriques et Electroniques (DEEE) et contribuent à l'épuisement de ce qui reste des ressources primaires.

Depuis quelques années, le recyclage des produits métalliques et isolants provenant des déchets DEEE s'inscrit dans une démarche d'éco conception destinée à gérer la fin de vie des produits pour accroître la disponibilité des matières premières. Il s'agit d'enjeux environnemental, sociétal et économique. Si le premier volet constitue une des principales des organisations non gouvernementales pour préserver l'environnement, l'aspect économique impose à la plupart des pays du monde d'élaborer des stratégies efficaces pour préserver et/ou compenser le manque de leurs ressources primaire. À cet égard, les technologies électrostatiques pour la séparation des matériaux usagés issues des DEEE s'inscrivent pleinement dans cette évolution. Les améliorations et optimisations permanentes de ces technologies en font actuellement l'une des meilleures solutions utilisées dans la séparation des particules des mélanges granulaires en fonction de quelques paramètres liés aux caractéristiques électriques des particules du mélange.

Initialement inventée pour être exploitée dans le traitement des minerais[1-3], cette technique trouve actuellement sa place dans plusieurs applications de traitement des *DEEE* parmi lesquelles on peut citer : - séparation couronne-électrostatique du cuivre et du PVC des déchets de câbles électriques [5-7] et de cartes électroniques; [8 -9]; - séparation tribo-électrostatique à chute libre pour le traitement des mélanges de plastiques granulaires [6 ;10-13].- séparation tribo-aéro-électrostatique des déchets de plastiques granulaires micronisés [14-15]. Dans l'ensemble de ces applications et afin d'augmenter la capacité productive des chaînes de tri, les séparateurs électrostatiques peuvent-être exploités en combinaison avec d'autres installations qui incluent des techniques basées sur des procédés de séparation mécanique, magnétique, hydraulique,...etc.

L'adaptation d'un séparateur électrostatique pour une application donnée se fait généralement par l'ajustement approprié des paramètres géométriques, cinématiques

et électriques de l'installation elle-même. Cette tâche peut être effectuée à l'aide d'une analyse systématique de la liaison fonctionnelle qui relie les facteurs et les réponses de l'installation.

Cette analyse a fait le sujet de plusieurs travaux de recherche [16-21]. Le but commun de tous ces travaux entre dans le cadre de la détermination d'une procédure destinée à l'optimisation du fonctionnement des processus de séparations électrostatiques. S'agissant du séparateur à cylindre tournant faisant l'objet d'une partie importante de l'étude présentée dans cette thèse, la conclusion la plus importante à retenir pourrait se résumer ainsi : "*La liaison fonctionnelle entre les facteurs et les réponse de l'installation d'un séparateur électrostatique à cylindre tournant est trop compliquée pour être représentée sous une forme mathématique par des relations purement physiques.*" Cette difficulté est due généralement au nombre important de paramètres ou encore de phénomènes, pas toujours bien identifiés, qui interagissent simultanément dans le processus de séparation. Aussi, l'utilisation des modèles *empiriques* « ou modèle type boîte noire » devient-elle incontournable.

La modélisation à base de logique floue représente l'une des solutions proposées [22]. Le principe de ce type de modèle est basé sur l'interprétation de la liaison entre les facteurs et les réponses d'un séparateur à cylindre tournant par l'intermédiaire de règles linguistiques. Il est ainsi possible de transformer le savoir-faire d'un expert en règles simples que l'on peut mettre en œuvre sous la forme d'un contrôleur destiné à l'optimisation du fonctionnement du séparateur électrostatique. Malgré la réussite des tests sur des installations de laboratoire, l'exploitation de la modélisation à base de logique floue dans des contextes industriels reste très difficile à défaut d'expertise dans le domaine.

La méthode des plans d'expériences représente une autre solution qui a été appliquée avec succès dans la modélisation et l'optimisation de plusieurs installations [20-21]. Cette méthode présente l'avantage d'établir un modèle polynomial généralement du deuxième degré « *modèle empirique* » à partir d'un nombre limité d'expériences. Cependant, l'application de cette méthode sur un système réel dont la liaison fonctionnelle entre les facteurs et les réponses est fortement non linéaire est plus délicate à mettre en œuvre. Il apparaît également que l'utilisation d'un algorithme d'optimisation à l'issue des plans d'expériences est presque indispensable.

Les travaux réalisés dans ce domaine montrent que l'exploitation des algorithmes génétiques dans l'optimisation d'un modèle polynomial permet d'identifier la solution globale de l'installation à partir d'un ensemble de solutions locales [23]. Par conséquent, il convient de s'interroger sur la pertinence de l'utilisation de modèles polynomiaux du deuxième degré pour modéliser le comportement du séparateur électrostatique dans une zone d'étude où la liaison entre les facteurs et les réponses de l'installation a tendance à être fortement non linéaire.

Dans le travail présenté dans cette thèse, nous tenterons de répondre à cette question par une comparaison qualitative des modèles polynomiales et des modèles à base de réseau de neurones. Les deux types de modèles sont exploités dans la modélisation du fonctionnement d'un séparateur électrostatique à cylindre tournant dans un espace d'étude caractérisé par les limites imposées par les contraintes physiques et mécaniques de l'installation.

Ce mémoire de thèse s'articule en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, nous présentons l'état de l'art des techniques utilisées dans le traitement des *DEEE*. Nous commençons par la présentation des installations utilisées actuellement dans la réduction de taille de ce type de déchets. Ensuite, nous décrivons les installations de base utilisées dans le processus de séparation électrostatique des déchets granulaires. Nous terminons ce chapitre par la présentation des améliorations et des nouvelles inventions apportées au domaine de la séparation électrostatique ces dernières années.

Dans le deuxième chapitre nous abordons le problème de l'estimation des paramètres d'un modèle polynomial par la méthode des *Moindres Carrés* utilisée dans la méthodologie des plans d'expériences. Les performances du modèle obtenu, seront examinées et ensuite comparées à un autre modèle à base de réseaux de neurones.

Dans ce chapitre nous allons exploiter deux bases de données. La première est utilisée pour estimer les paramètres du modèle polynomial et la matrice des poids du réseau neuronal. Cette base de données servira par la suite pour mesurer la qualité prédictive des modèles obtenus. La deuxième base de données permettra de mesurer

la qualité de généralisation des deux modèles et prendre une décision finale sur la qualité des modèles obtenus.

Au troisième chapitre nous décrivons quelques méthodes d'optimisation appartenant à deux classes différentes : méthode déterministe et méthode probabiliste. Les résultats d'optimisation des processus de séparation, leurs analyses et discussions sont ensuite exposés.

Le quatrième chapitre est consacré à une discussion des stratégies de contrôle destinées au pilotage des processus de séparation électrostatique. Ces stratégies s'appuient sur l'exploitation des modèles de type boîte noire basées sur des méthodes d'optimisation probabilistes.

Enfin, la conclusion générale mettra en valeur les apports de cette étude et proposera des perspectives de notre travail.

Chapitre I : Etat de l'art des techniques de traitement des DEEE

Les Equipements Electriques et Electroniques EEE sont devenus omniprésents dans notre vie quotidienne. L'analyse des éléments constituant ce type d'équipements montre que leurs procédés de fabrication sont très consommateurs de matières premières tels que les plastiques (ABS ; PS ; PC ; PVC...), les métaux (Or ; Argent ; Cuivre ; étain ; Plomb ...), ou encore les terres rares principalement utilisées dans l'industrie du verre et de la céramique [24-27]. La figure I.1 montre un exemple d'un EEE (*défecteur électromagnétique du tube cathodique*). Cet élément contient plusieurs matériaux de natures différentes à savoir : le cuivre ; verre ; plastique ; résine époxy ; acier ; céramique ;...etc. [24]. Actuellement la plus part de ces matériaux sont considérés comme matériaux non renouvelables en voie d'épuisement. Par conséquent, il est devenu indispensable de trouver des solutions qui permettent de réutiliser les DEEE pour prolonger le cycle de vie des matériaux et in fine réduire le taux d'épuisement des ressources naturelles [28].

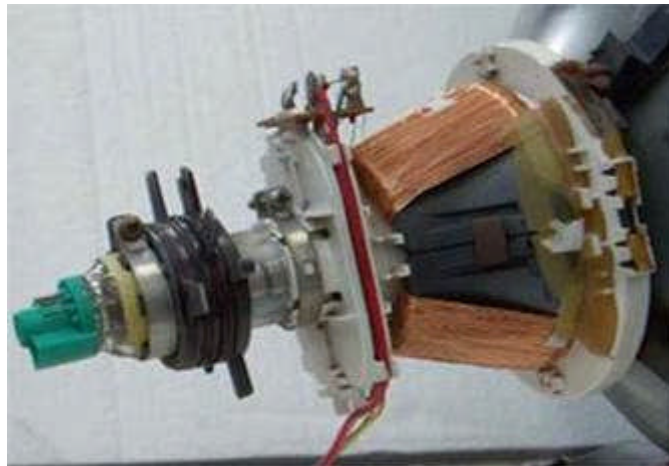


Figure I.1 : *Défecteur électromagnétique d'un tube cathodique comportant des éléments en cuivre ; plastique ; résine époxy ; acier ; verre ; céramique... etc. [28]*

Pour commencer à apporter des solutions à ce problème, nombreuses entreprises dans le monde procèdent au recyclage des DEEE en fin de vie. La table I.1 montre les informations sur le pourcentage des matériaux qui peuvent être récupérés à partir de quatre équipements électriques et électroniques utilisés au Japon [25].

Table I.1 : Pourcentage des matériaux utilisés dans la fabrication de quatre EEE différents [25]

Matériaux	Télévision	Machine a lavé	Climatiseur	Réfrigérateur
Verre	57	-	-	-
Plastique	23	36	11	40
Fer	10	53	55	50
Cuivre	3	4	17	4
Aluminium	2	3	7	3
Autres	5	4	10	3

Selon *K. Makenji & al* [26] et d'un point de vue énergétique, le recyclage des matériaux à partir des *DEEE* est plus rentable par rapport à l'extraction de ces produits à partir des ressources naturelles. La table I.2 indique l'estimation de l'énergie économisée lors du recyclage de quelques matériaux récupérés à partir des *DEEE*.

Table I.2 : Energie économisée par le recyclage des DEEE [26]

Matériaux	Energie économisé (%)
Aluminium	95
Cuivre	85
Plomb	65
Produit en plastic	> 80

Bien que le recyclage des *DEEE* permette d'économiser une quantité considérable d'énergie, il faut en amont passer par l'étape de tri sélectif qui demeure très compliquée lorsqu'il s'agit du traitement des équipements constitués par des éléments hétérogènes. Dans des situations similaires un traitement manuel est appliqué au début de la chaîne de tri (figure I.2). Dans cette chaîne de tri, des opérateurs procèdent à la sélection et au tri des *DEEE* transportés par un tapis convoyeur. Chaque opérateur peut sélectionner un ou plusieurs types de déchets en même temps. Le but de cette opération consiste à sélectionner les éléments homogènes des équipements et les envoyer vers une chaîne de recyclage. La pureté des déchets homogènes obtenus par cette opération dépasse généralement les 95% [26].



Figure I.2 : Traitement manuelle des DEEE. [26]

Le reste, c'est-à-dire les éléments hétérogènes des *DEEE*, sont expédiés généralement vers d'autres chaînes de traitement où ils vont subir une réduction de taille en première étape donc une dissociation des éléments de matériaux différents. Le produit obtenu peut être traité ensuite par des techniques qui incluent des procédés mécaniques, électriques, magnétiques, thermiques, hydrauliques,...etc. (figure I.3)

I.1 Réduction de la taille des DEEE

Le traitement des *DEEE* hétérogènes commence généralement par une étape de réduction de taille (déchiquetage et/ou broyage et/ou granulation). Dans cette étape les *DEEE* sont soumis à l'action des forces brutales des marteaux, boules ou des lames en mouvement dans un compartiment fermé [27]. Le but de ces procédés consiste à libérer les éléments constituant un objet hétérogène. Le même procédé est utilisé généralement dans l'industrie des minerais, l'industrie des produits chimiques et pharmaceutiques.

Dans le cas du traitement des *DEEE*, l'utilisation d'un procédé de granulation doit porter le déchet à un certain degré de dissociation [27]. Selon *W. Schubert* [29] le degré de dissociation d'un déchet récupéré à la sortie d'un broyeur est défini par le pourcentage du produit dissocié par rapport à la masse totale de l'échantillon.

$$D_d = \frac{M_{hm}}{M_{ech}} \quad (I.1)$$

où D_d est le degré de dissociation des déchets récupérés à la sortie d'un broyeur, M_{hm} la masse du produit homogène et M_{ech} la masse de l'échantillon.

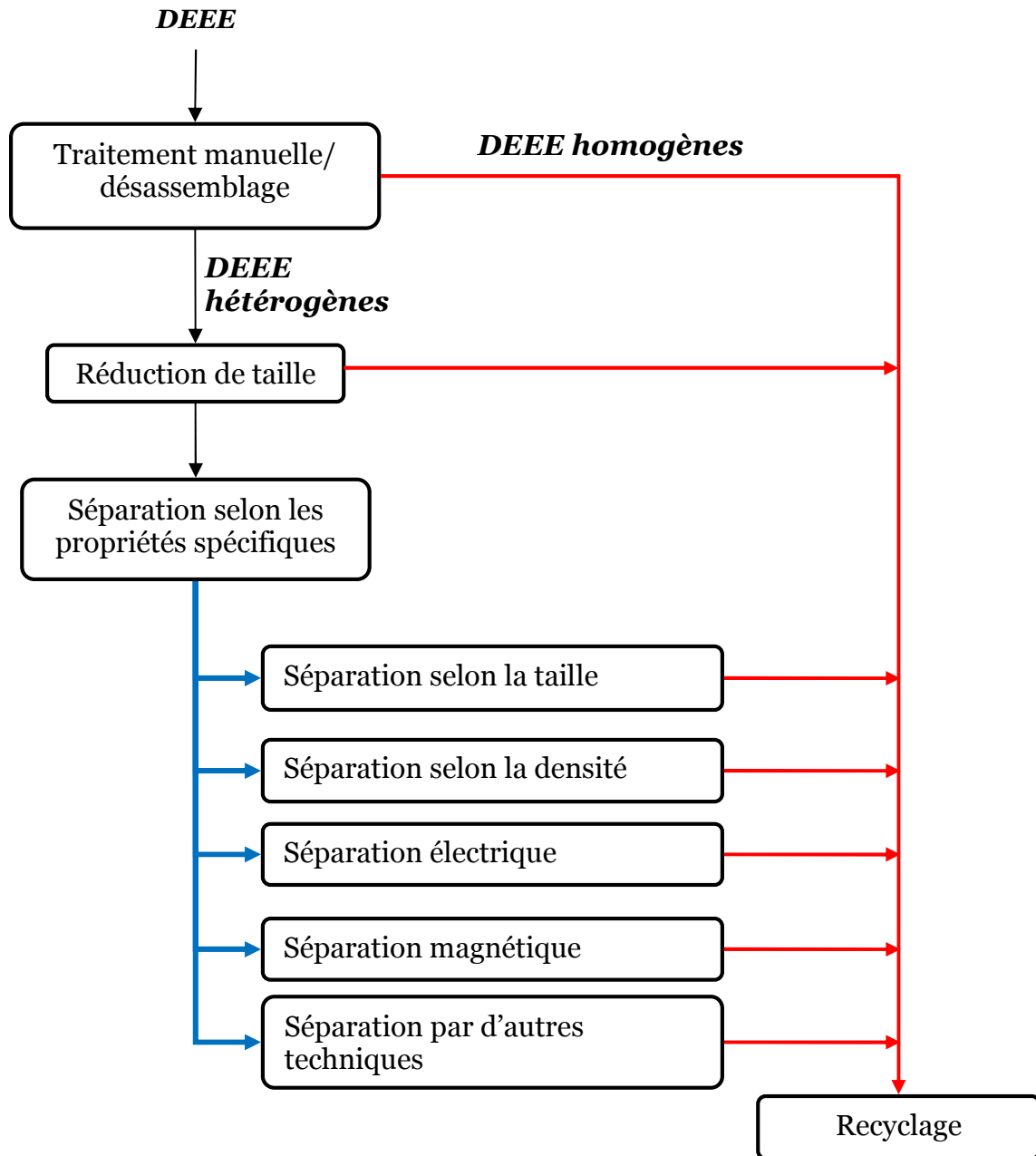


Figure I.3 : Méthode de séparation des DEEE basées sur les méthodes de traitement des minerais [24].

La figure I.4 montre un exemple d'un échantillon de déchets de câbles électriques récupéré à la sortie d'un broyeur. La présence des particules de cuivre encapsulées par des matériaux isolants réduit le degré de dissociation de l'échantillon. Ainsi la pureté des produits récupérés à la sortie des processus de séparation exécutés dans l'étape suivante se trouve-t-elle diminuée.

Le degré de dissociation D_d représente un paramètre très important dans la réussite ou non d'un processus de séparation quelconque. D'un côté et selon *S. Zhang*

& al [30] le broyage des circuits imprimés électroniques à des tailles inférieures à 2 mm permet l'obtention d'un produit granulaire caractérisé par un degré de dissociation très élevé. D'un autre coté les travaux de *H. Masuda & al* [31] montrent que l'énergie consommée dans l'étape de broyage est inversement proportionnelle à la taille des particules obtenues à la sortie du broyeur. Donc une minimisation excessive de la taille des particules est parfois inutile et engendre une perte d'énergie considérable.

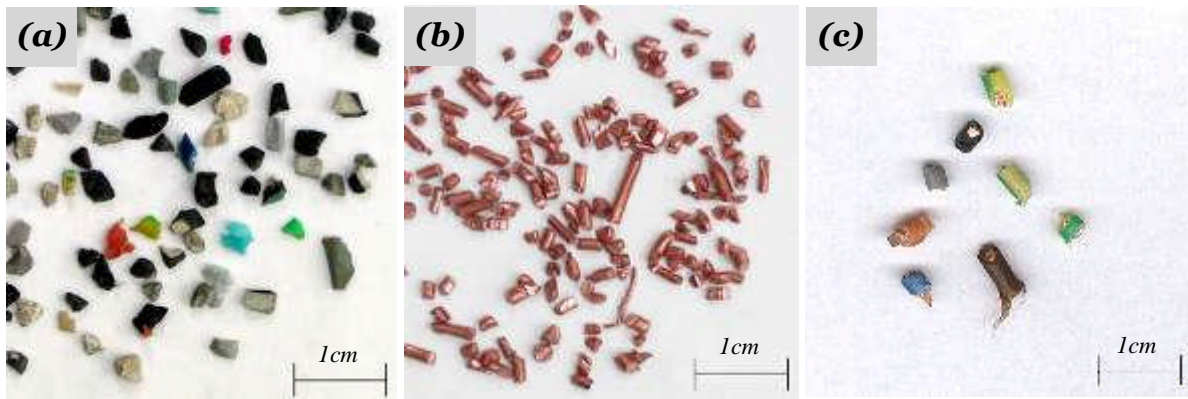


Figure I. 4: Déchet de câble électrique récupéré à la sortie d'un broyeur (a-b) : granules homogènes ; (c) : granules hétérogènes

Actuellement il existe différentes installations qui sont exploitées dans le broyage des DEEE. Le choix de l'installation appropriée est guidé généralement par la nature des déchets à broyer (métallique et/ou non métallique) la taille et la forme des particules désirées, la capacité productive et l'énergie consommée par l'installation. Parmi les installations les plus compatibles et les plus utilisées dans les applications de recyclage des DEEE, citons les: *broyeur à marteaux*, *broyeur à cylindre denté*, *broyeur à lames*.

Broyeur à marteaux

Dans cette installation les matériaux à broyer sont introduits dans la chambre de broyage par une ouverture qui se trouve en dessous de l'installation. En contact avec les marteaux liés au rotor (Figure I.5) les particules sont projetées avec une grande vitesse vers les barres d'impact. Après avoir subi une réduction de taille, les particules quittent la chambre de broyage à travers l'espace qui se trouve entre les barres d'impact.

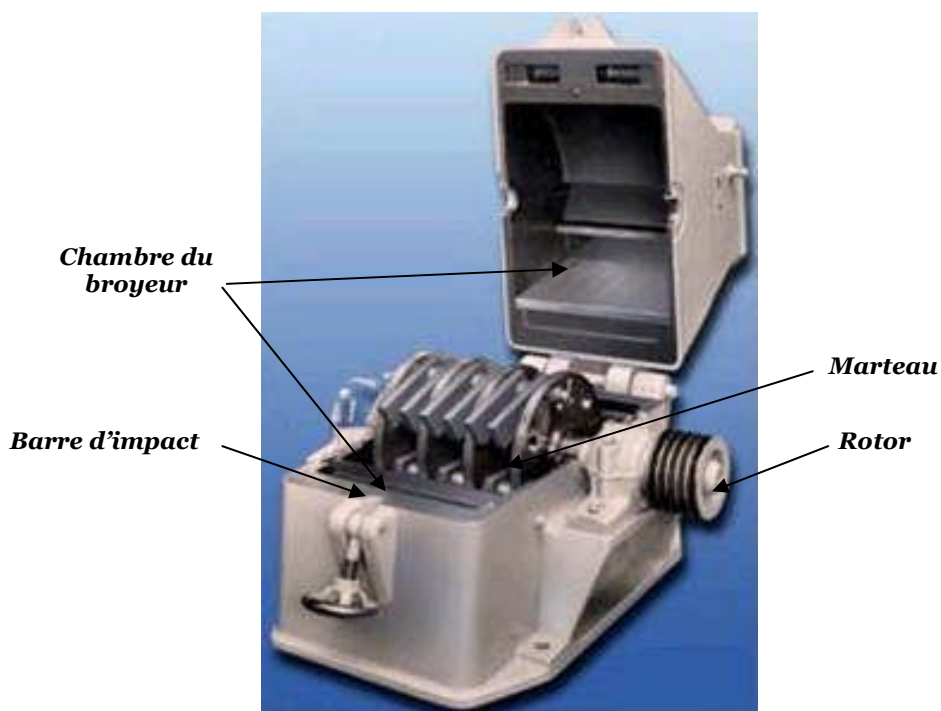


Figure I.5 : Broyeur à marteau

Pour contrôler le processus de broyage ainsi que la taille des particules obtenues, cette installation nous donne la possibilité de régler l'espace entre les barres d'impact et la vitesse de rotation du rotor. Les résultats d'une application de broyage des DEEE par un broyeur à marteau modèle (Alpine Omniplex type 80/60) sont représentés sur la Figure I.6.

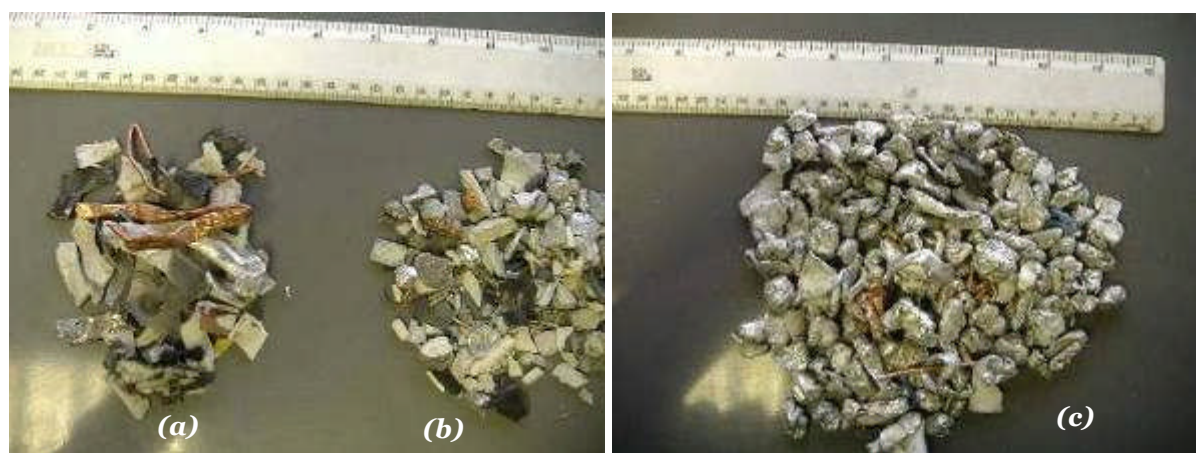


Figure I.6 : Résultats du broyage des DEEE obtenus à la sortie d'un broyeur à marteau modèle (Alpine Omniplex type 80/60) ; Espace entre barre d'impact 20mm ; vitesse de rotation du rotor 1000tr/min ; nombre des marteaux 18. (a)DEEE avant broyage ; (b) après broyage ; (c) forme des particules métallique après broyage [32]

Broyeur à cylindre denté

Dans cette installation les DEEE sont introduits à l'aide d'un bras hydraulique vers un cylindre tournant et une lame fixe dentée (Figure I.7). Les arrêtes des dents de la lame fixe et les dents du cylindre forment des couteaux capables de couper et de réduire ainsi la taille des DEEE. Les déchets coupés ainsi introduits à l'intérieur de la chambre de broyage sont pressés contre un écran incurvé pendant la rotation du cylindre. Dans cette position la réduction de la taille des morceaux de DEEE se poursuivra jusqu'à ce que les morceaux soient de tailles inférieures à celles des trous de l'écran/grille. Selon la matière des dents choisis le broyeur à cylindre denté peut traiter des DEEE constitués de produits métalliques et non métalliques tel que les câbles électriques, contenant des éléments en fer, en cuivre et en aluminium.



Figure I.7 : Broyeur a cylindre denté

La Figure I.8 montre le résultat d'une application de broyage des carcasses en plastique à l'aide d'un broyeur à cylindre denté modèle (*Wagner 40*). Selon les essais effectués par *K. Freegard & al* [32] l'exploitation de ce type de modèle permet la réduction de la taille des déchets en plastique de *1500 mm* à *20 mm* en un seul passage avec une capacité productive de *1.6 t/h*. La taille et la forme des déchets obtenus par ce type de broyeur sont représentées dans la figure I.8.



Figure I.8 : Résultat du broyage des carcasses de TV en plastique à l'aide d'un broyeur à cylindre denté modèle (Wagner 40) équipé d'un écran de 20 mm ; (a) : avant broyage ; (b) après broyage [32]

Broyeur à lames

L'élément principal de cette installation est un tambour tournant équipé d'une série de lames. Les lames tournant à vitesse constante viennent frôler une autre série de lames fixes dans la chambre de broyage. Les deux séries de lames sont placées de façons opposées avec un certain angle par rapport à l'horizontale. Avec cette disposition les lames forment des ciseaux qui coupent avec une grande finesse les DEEE introduits dans la chambre de broyage. (Figure I.9).

Le mouvement du tambour permet de balayer les particules sur un écran perforé. Le choix du diamètre des trous sur l'écran permet le contrôle de la taille des particules obtenues à la sortie du broyeur. Les résultats du broyage des DEEE par un broyeur à lames (Modèle Herbold SML 60/100) sont représentés dans la figure I.10. Cette figure montre le résultat d'une application obtenue avec un écran perforé dont le diamètre des trous est de 10 mm.

Ce type d'installation est très adapté au traitement des produits en plastique pré déchiquetés. Cependant, la présence des produits métalliques peut abîmer les lames du broyeur. La capacité productive de cette application peut atteindre les 4.8 t/h. Les particules obtenues à la sortie du broyeur possèdent une taille presque uniforme.

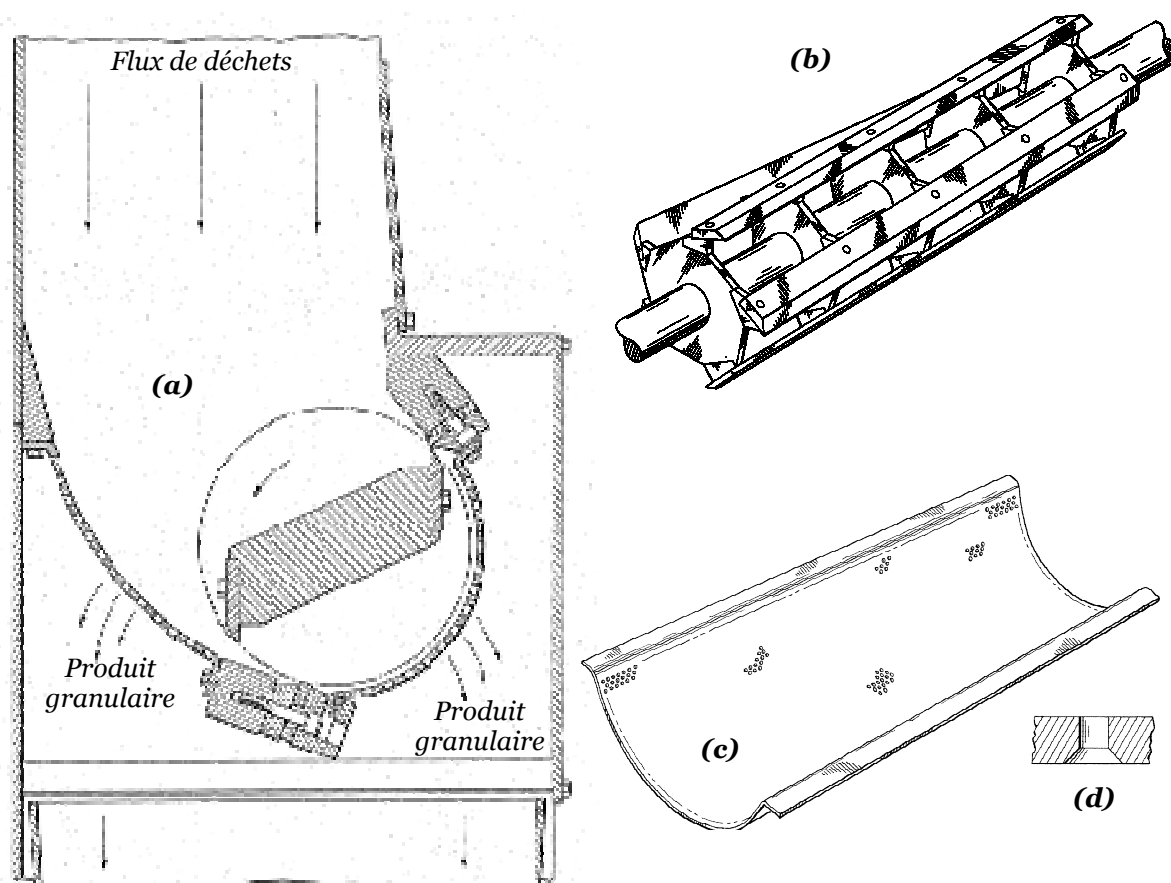


Figure I.9 : Broyeur a lames : (b) la disposition des lames sur le rotor du broyeur ; (c) forme de l'écran ; (d) la formes des trous exécuter sur l'écran. [33]

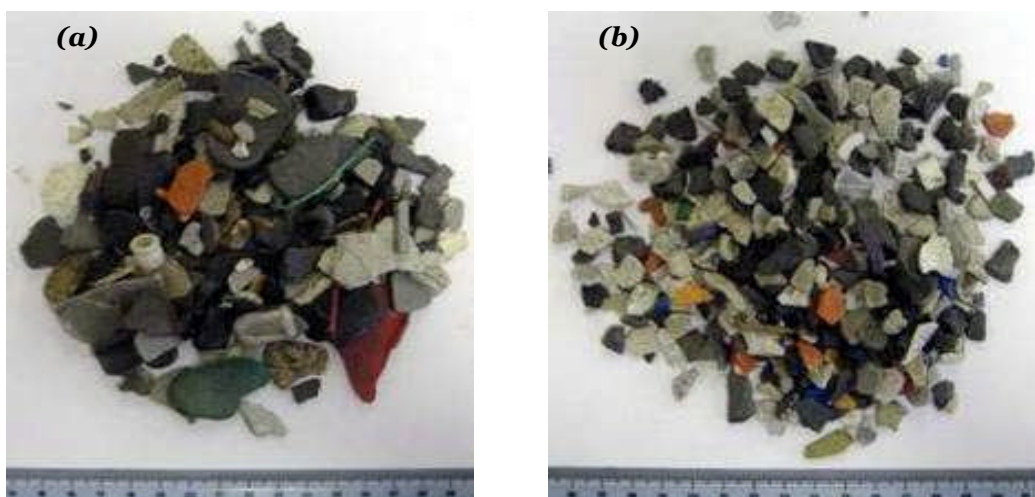


Figure I.10 : Résultats du broyage des DEEE obtenus à la sortie d'un broyeur à lames ; (a) DEEE avant broyage ; (b) après broyage ; [32]

I.2 Séparation électrostatique des DEEE

Les produits granulaires obtenus par le broyage des DEEE hétérogènes qui respectent des conditions spécifiques sur le degré de dissociation des matériaux du mélange peuvent être traités par une ou plusieurs techniques incluant des procédés mécaniques, électriques, magnétiques, thermiques hydrauliques,...etc. [34-36].

Actuellement, les processus de séparations électrostatiques sont considérés parmi les plus performants dans le tri des mélanges granulaires en fonction de leur conductivité électrique. Cette technique utilise les forces qui agissent sur les particules chargées ou polarisées soumises à un champ électrique intense généré entre deux électrodes alimentées en haute tension. Les tensions des sources utilisées dans ce type de processus varient de 10 à 100kV DC [34].

Quel que soit le processus de séparation électrostatique considéré, il faut ajuster de façon appropriée l'intensité, la direction et la durée de l'application des forces électriques agissant sur les particules du mélange traité. Il peut se révéler aussi avantageux d'exploiter des forces mécaniques telles que la force gravitationnelle, la force centrifuge et la force de frottement pour effectuer un tri sélectif.

Les trois configurations de la figure I.11 nous donnent la possibilité de contrôler indépendamment les forces électriques et mécaniques appliquées aux particules d'un mélange granulaire ainsi que d'augmenter la distance qui sépare les points de collecte des particules de natures différentes. Ces types d'installations sont exploitées généralement dans la séparation des mélanges qualifiés de : Conducteur / Conducteur ; Conducteur/Isolant et Isolant/Isolant.

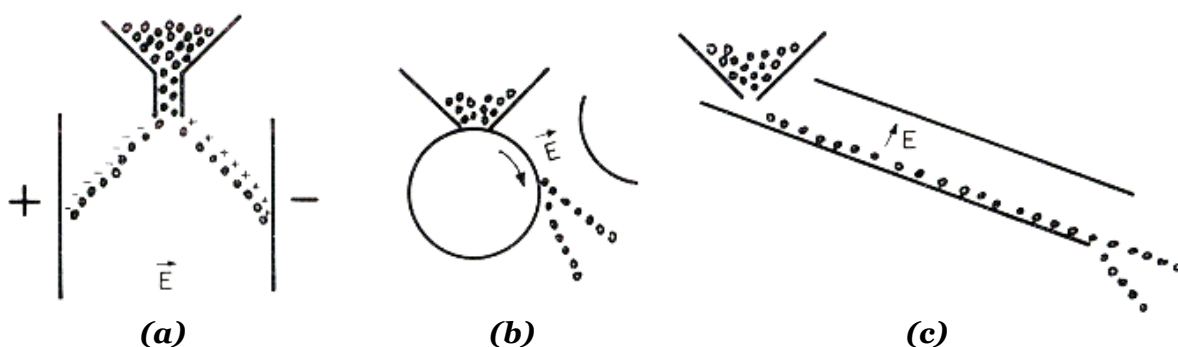


Figure I.11 : Installation utilisé dans la séparation électrostatique des mélanges granulaires ; de gauche à droite : (a)- séparateur à chute libre, (b) - à cylindre tournant ; (c) - à plaque inclinée, [34]

Séparateur à chute libre

La première configuration de base (figure I.11.a) est appelée séparateur à chute libre. La figure I.12 montre un dispositif utilisé comme banc expérimental pour la séparation des mélanges granulaires Isolant/Isolant.

Dans cette installation les particules chargées différemment par effet triboélectrique sont introduites dans le séparateur par un entonnoir installé dans la partie supérieure du dispositif. Sous l'effet de leurs poids les particules tombent en chute libre dans une zone de champ électrostatique intense généré entre deux électrodes alimentées en haute tension.

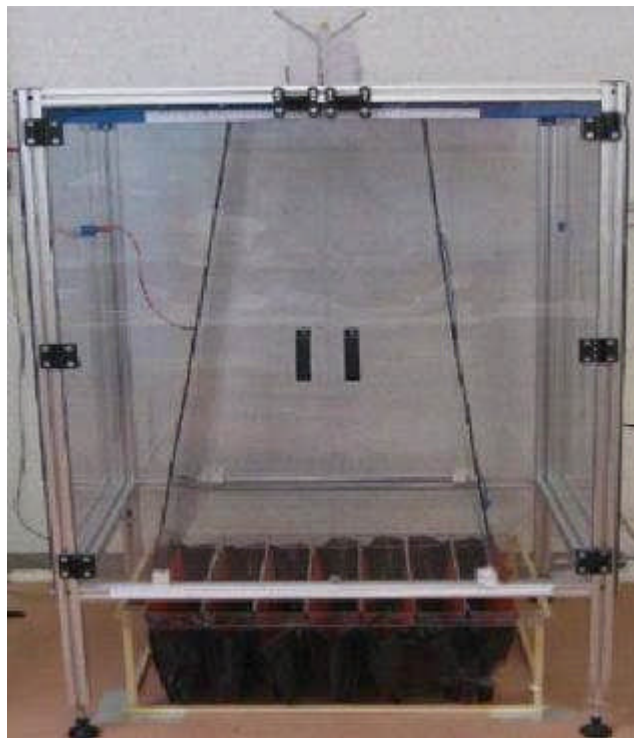


Figure I.12 : *Séparateur à chute libre (Laboratoire de d'Electrostatique Appliquée ; IUT d'Angoulême France)*

Au cours de leur mouvement, une particule chargée est soumise à plusieurs forces en même temps à savoir : une force due à l'action de la gravité terrestre sur la masse de la particule F_g (I.1) ; une force électrostatique F_{el} (I.2) due à l'action du champ électrostatique E sur la charge Q acquise par la particule ; et une force due à la réaction du milieu de séparation (c'est-à-dire l'air) sur les particules en mouvement F_{air} (I.3) (figure I.13).

$$F_g = \frac{4}{3} \pi r_p^3 \rho g \quad (I.1)$$

$$F_{el} = QE \quad (I.2)$$

$$F_{air} = \frac{1}{2} C_D \pi r^2 \rho_{air} v^2 \quad (I.3)$$

avec : r_p le rayon de la particule supposée sphérique, Q la charge électrique portée par la particule ; E l'intensité du champ électrostatique ; ρ la densité volumique de la particule ; $\rho_{air} = 1.2 \text{ kg/m}^3$ la densité volumique de l'air ; v la vitesse relative de la particule par rapport à la vitesse du milieu; C_D le coefficient de frottement.

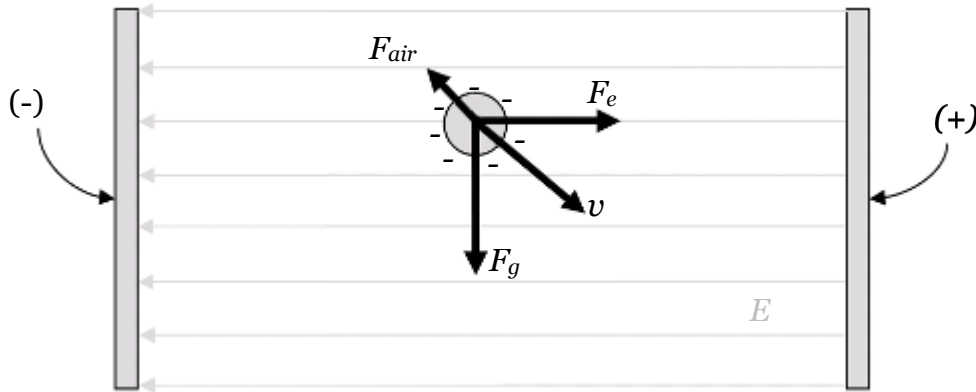


Figure I.13 : Forces agissant sur une particule chargée négativement dans un séparateur à chute libre

Le déplacement horizontal de la particule par rapport à l'axe de symétrie de l'installation dépend de sa charge initiale et de l'intensité et la durée de l'application de la force électrique. Donc, pour avoir un déplacement horizontal important on a deux possibilités: la première consiste à augmenter l'intensité de la force électrique appliquée sur la particule par l'augmentation de l'intensité du champ électrostatique et/ou la charge acquise par la particule. La deuxième consiste à augmenter la durée de l'application de la force électrique par l'augmentation de la hauteur des électrodes. L'application de l'ensemble de ces solutions nous permet d'augmenter l'écart entre les points de collecte des particules chargées différemment.

Séparateur à plaque

Le séparateur à plaque [37-38] est l'une des configurations de base utilisée dans la séparation des mélanges granulaires qualifiés de bon conducteur/ mauvais conducteur. Dans cette installation un champ électrique intense est généré entre une

plaque inclinée mise à la terre et une électrode alimentée par une source haute tension. (Figure I.14)

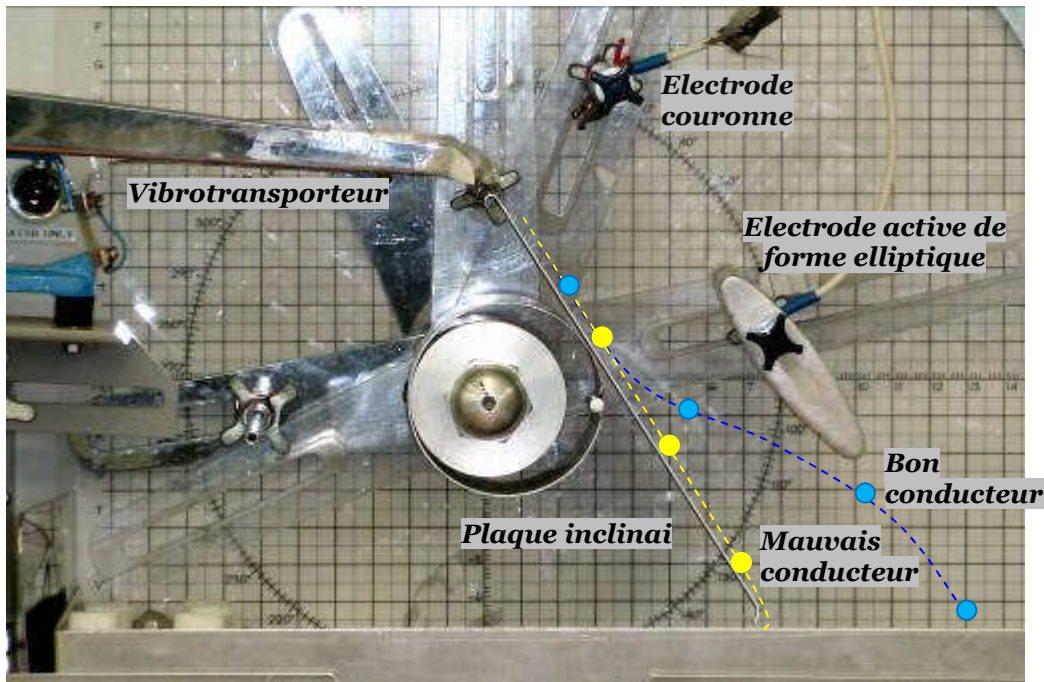


Figure I.14 : Trajectoire des particules dans un séparateur à plaque (modèle Carpco_ Laboratoire d'Electrostatique Appliquée ; IUT d'Angoulême, France)

En contact avec la plaque, les particules conductrices acquièrent une charge électrique par induction électrostatique. La quantité Q de charge acquise par une particule de forme sphérique peut être évaluée par la formule (I.4).

$$Q = \frac{2}{3} \pi^3 \varepsilon_0 r_p^2 E \quad (I.4)$$

Où r_o représente le rayon de la particule supposée de forme sphérique ; E l'intensité du champ électrostatique et ε_0 la permittivité électrique de l'air.

Au cours de son mouvement sur la surface de la plaque inclinée, la particule chargée est sollicitée par une force gravitationnelle F_g (I.1), une force électrostatique F_{el} (I.5), une force de frottement avec l'air F_{air} (I.3) et une force de frottement avec la surface de la plaque inclinée F_f (I.6) (figure I.15).

$$F_{el} = 0.832 Q E \quad (I.5)$$

$$F_f = \mu F_n \quad (I.6)$$

Q représente la charge électrique de la particule acquise pendant le contact avec la plaque inclinée ; E l'intensité du champ électrostatique, et μ le coefficient de frottement dynamique du contact particule/plaque. F_n la somme des forces normal a la surface de la plaque.

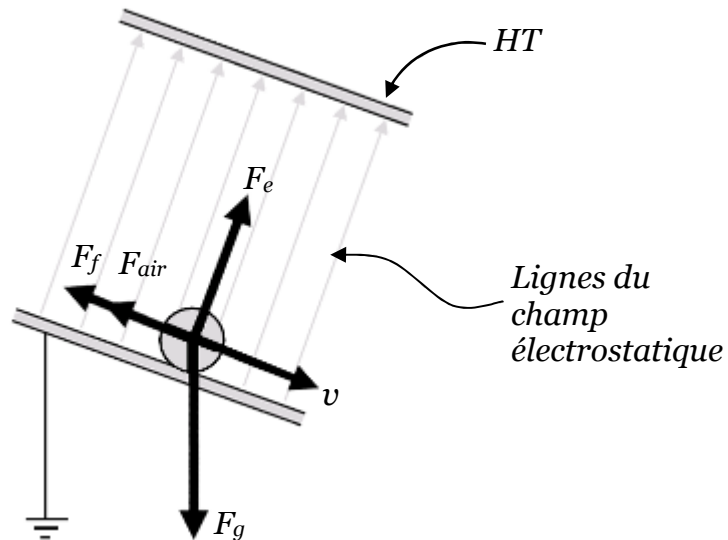


Figure I.15 : Forces agissent sur une particule conductrice en contact avec une plaque inclinée mise à la terre et soumise à champ électrostatique

Si la composante verticale de la force électrostatique est supérieure à la force gravitationnelle, la particule sera attirée vers l'électrode active pour être récupérée ensuite dans la partie droite du collecteur, inversement si la composante verticale de la force électrostatique est négligeable devant la force gravitationnelle cette particule glissera tout le long de la plaque pour tomber ensuite dans la partie gauche du collecteur.

Donc, pour maîtriser le tri électrostatique des particules d'un mélange granulaire dans un séparateur à plaque, il est nécessaire que les forces gravitationnelles soient inférieures aux composantes verticales des forces électriques appliquées aux particules du mélange. Dans le cas contraire, nous sommes généralement amenés à réduire la taille des DEEE à traiter.

Séparateur à cylindre tournant

La troisième configuration qui fait l'objet de cette étude est connue sous le nom de séparateur électrostatique à cylindre tournant [5-6 ;40-42] (figure I.16). Dans cette installation le produit à séparer est déposé de façon continue et uniforme par un vibrotransporteur (4) sur la surface d'une électrode tournante reliée à la terre (3).

Cette électrode forme avec l'électrode couronne (1) une zone de décharge couronne ; et avec l'électrode statique (2) une zone de séparation électrostatique. Le produit déposé sur la surface de l'électrode tournante est entraîné par cette dernière successivement dans les deux zones.

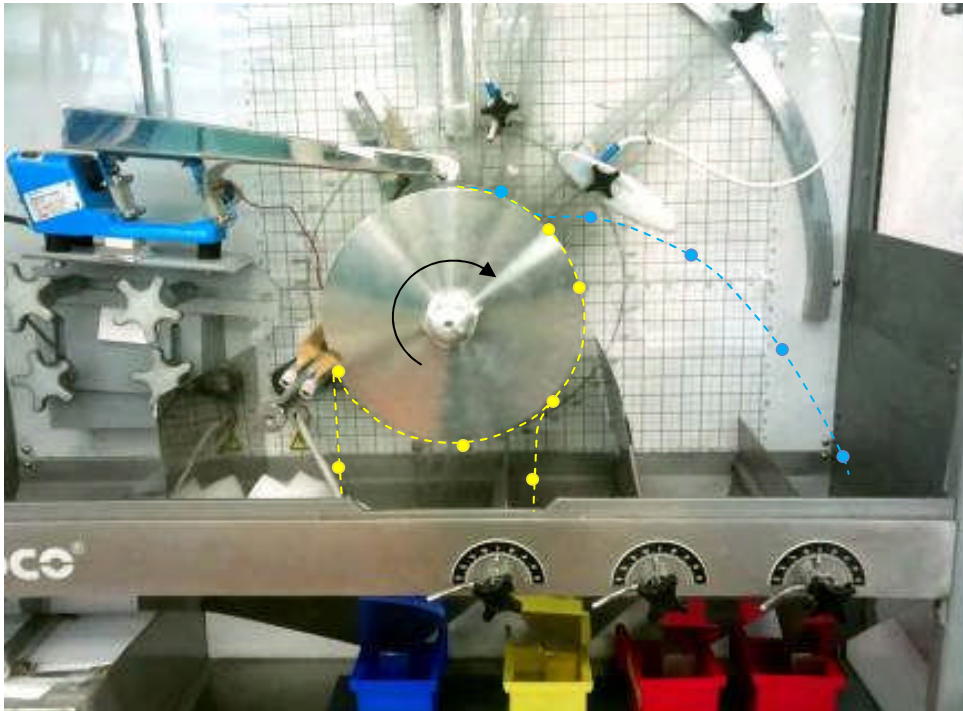


Figure I.16 : Trajectoire des particules dans un séparateur à cylindre tournant (modèle Carpeco_ Laboratoire d'Electrostatique Appliquée, IUT d'Angoulême, France)

Dans la zone de décharge couronne, les particules du mélange granulaire sont exposées à un bombardement ionique. Seules les particules isolantes sont aptes à conserver la charge électrique acquise dans cette zone. La quantité de la charge acquise par une particule de forme sphérique peut être évaluée par la relation (I.7).

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{(Q - Q_m)^2}{\tau \cdot Q} \quad (I.7)$$

$$Q_m = 4\pi \varepsilon_0 r_p^2 \left[\frac{3\varepsilon_r}{(\varepsilon_r + 2)} \right] E \quad \text{et} \quad \tau = 4 \frac{\varepsilon_0}{\sigma_0} \quad (I.8)$$

Où ε_0 la permittivité de l'air ; $\sigma_0 = J/E$ la densité de la décharge couronne dans le point considéré; exprimé en fonction de la densité du courant de décharge J et l'intensité du champ électrostatique E ; r_p et ε_r représentent respectivement le rayon et la permittivité relative de la particule. Q et Q_m représentent la charge instantané et

la charge maximal acquise par la particule dans la zone de la décharge couronne ; τ la constante du temps lié à l'évolution de la charge acquise par la particule.

Les particules conductrices perdent rapidement la charge acquise par bombardement ionique à travers le cylindre mis à la terre. Entraînées dans la zone de séparation électrostatique ces particules se chargent par induction électrostatique (I.4) et sont soumises à une force électrostatique F_{el} (I.5) qui contribue avec la force centrifuge F_c (I.9) à projeter ces particules vers la partie droite du collecteur.

$$F_c = \frac{4}{3} \pi r_p^3 \rho w^2 R_{cylindre} \quad (I.9)$$

Où w et $R_{cylindre}$ représentent respectivement la vitesse angulaire et le rayon du cylindre tournant.

Les particules non conductrices chargées par bombardement ionique sont soumises à la force image électrique F_i (I.10) proportionnelle au carré de leur charge. Dans le cas d'une particule sphérique, l'intensité de la force image peut être évaluée par la relation (I.10)

$$F_i = \frac{Q^2}{16 \pi \epsilon_0 r_p^2} \quad (I.10)$$

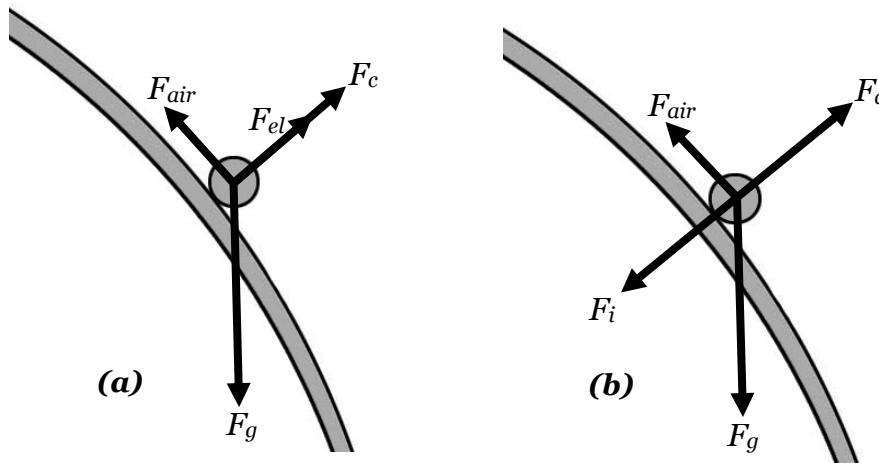


Figure I.17 : Forces agissant sur les particules conductrices (a) et isolantes (b) en contact avec le cylindre tournant

Cette force permet aux particules isolantes d'adhérer à la surface du cylindre tournant au cours de sa rotation. Elles sont donc entraînées vers le côté gauche du collecteur là où leur force d'image est annulée par neutralisation naturelle ou forcée de leurs charges acquises par bombardement ionique. La figure I.18 montre les

trajectoires des particules conductrices et isolantes dans un séparateur électrostatique à cylindre tournant.



Figure I.18 : Trajectoire réel des particules dans un séparateur à cylindre tournant (laboratoire de séparation électrostatique Cluj-Napoca, Romania)

I.3 Les améliorations et les nouvelles inventions dans le domaine de la séparation électrostatique.

Séparateur à plaque en S

Pour améliorer le comportement des particules dans un séparateur à plaque de nouvelles évolutions ont été apportées à cette installation. La première consiste à optimiser la forme de la plaque pour maximiser la composante horizontale de la vitesse des particules conductrices au point de décollage. Cette solution est mise en œuvre par l'utilisation d'une plaque sous forme de *S* [37-38 ;43] (Figure I.19).

Cette forme de plaque possède deux sections de courbures opposées délimitées par un point d'inflexion. La première section est considérée comme un brachistochrone (toboggan) qui permet aux particules d'acquérir une vitesse suffisamment élevée par rapport aux plaques ordinaires. Une fois arrivées au point d'inflexion les particules conductrices sont soumises à une force centrifuge qui contribue en même temps avec la force électrostatique à faire décoller ces particules pour les projeter dans la partie droite du collecteur.



Figure I.19 : Séparateur à plaque en S (laboratoire de séparation électrostatique ; IUT d'Angoulême France) ;

Par ailleurs, pour minimiser la composante horizontale de la vitesse des particules non conductrices au point de décollage une autre solution est mise en application. Cette solution consiste à utiliser un séparateur à plaque en S assisté par une décharge couronne [44].

Séparateurs tribo aéro électrostatiques (à bande transporteuse ; à deux cylindres ; à disques)

Dans l'ensemble des installations tribo aéro électrostatiques (figure I.20) le mélange granulaire est introduit dans une chambre de triboélectrisation parcouru par un courant d'air dont la vitesse est contrôlable. Dans cette chambre les particules en plastique sont soumises à une agitation continue formant ainsi un lit fluidisé ayant l'aspect d'un liquide bouillonnant ou turbulent. Au cours de l'agitation, les particules du mélange entrent en collision entre elles et avec les parois de la chambre de triboélectrisation. Les contacts particules/particules et particules/parois chargent électriquement les particules [13 ;45]. Cette méthode de chargement est reconnue comme l'un des processus les plus économiques utilisés dans le chargement des particules en plastique destinées à la séparation électrostatique [46].



Figure I.20: séparateurs tribo aero électrostatiques ; (a) : à deux cylindres ; (b) : à deux bandes transporteuses ; (c) : à disques

La quantité de charge électrique acquise par les particules dépend de plusieurs paramètres tels que : le temps de chargement ; la nature du lit fluidisé ; l'humidité ; la taille, la forme et les matériaux des particules...etc. D'un autre côté, le signe de la charge acquise par les particules dépend de leurs travaux d'extraction et de leurs positionnements dans la série tribo-électrique (figure I.21) [47-50]. Les particules les mieux chargées sont attirées vers l'électrode de polarité opposée au signe de leurs charges électriques.

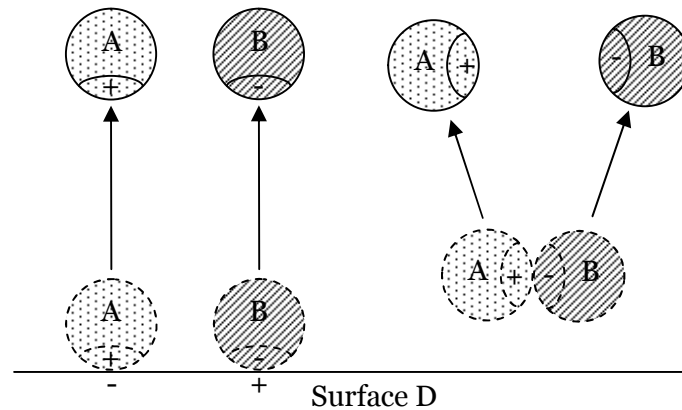


Figure I.21: Signe de la charge acquise par les particules en fonction de leur travail d'extraction ($W_A < W_B < W_D$)

1.4 Bibliographie sur les applications des processus de séparations électrostatiques.

Les installations présentées dans les paragraphes précédents sont utilisées généralement dans la séparation des mélanges: Conducteur / Conducteur ; Conducteur / Isolant et Isolant / Isolant. La table I.3 regroupe des applications déjà réalisées.

Table I.3: Applications des séparateurs électrostatiques

Installations	Application			
	Produit	Source	Taille	Réf
Chute libre	PVC/HDPE	Matières premières d'extrudeuse	1-4 mm	[11]
	Charbon/sandre	Mines de Ramagundam, Inde	<300µm	[51]
	PS/PE	NAPOCHIM S.A., Cluj-Napoca	PS 3x3x2 mm PE 2.5x2x2	[52]
	PE/PS	Inconnue	inconnue	[54]
	PVC / caoutchouc	Câbles de communication	1.6mm \varnothing <math><4\text{mm}</math>	[10]
	HDPE/PP	Déchets industriels	2-5mm	[13]
	PP/PS	Déchets industriels	2-5mm	[13]
	PVC/PET	Inconnue	1.4-2mm	[54]
	PVC/PP	Inconnue	1.4-2mm	[54]
	PVC/PE	Inconnue	1.4-2mm	[54]
	PVC/PE	inconnue	1-2mm	[6]
	PVC/PS	Inconnue	1.4-2mm	[54]
	PET/PVC	Matières premières d'extrudeuse	PET 4x2x2 mm PVC 4x2x2	[55]
à deux étages	PA/PC	Matières premières d'extrudeuse	2,5-3,6 mm	[56]
	HDPE/PVC/PC	Matières premières d'extrudeuse	inconnue	[57]
A deux	ABS/HIPS	Matières premières d'extrudeuse	≈ 1 - 3mm	[58]

cyindres	PVC/PVC	Matières premières d'extrudeuse	Poudre	[15]
A deux disques	PVC/PVC	Matières premières d'extrudeuse	Poudre	[14]
A plaque en S	Sel/verre/sable	Sel de table/ sable de construction / verre inconnu	0.125mm<Ø <0.25mm	[4 3]
	Sel/verre	inconnue	<0.1mm	[6]
	Sel/sable	inconnue	<0.1mm	[6]
	Quartz/Magnetite	Quartz : Valenii de Munte, Romania / Magnetite : Teliuc, Romania	Poudre	[4]
Cylindre tournant	PE/PVC/Cu	Déchets de câbles électriques	<5mm	[5]
	PE/PVC/Cu	Déchets de câbles électriques	<5mm	[41]
	Conducteur/isolant	Cartes électroniques	0.6-1.2mm	[42]
	Conducteur/isolant	Cartes électroniques	0.3-0.45mm	[59]
	PVC/Cu fine	Déchets de câbles électriques	<1cm	[6]
	PVC/Cu massive	Déchets de câbles électriques	<1cm	[6]
	PVC/Cu	Déchet de câbles électriques	inconnue	[7]
A 2 bandes transporteuse	ABS/HIPS	DEEE	<2mm	[60]

L'ensemble des applications réalisées jusqu'à ce jour montre l'intérêt grandissant de l'exploitation des processus de séparation électrostatique dans l'industrie du traitement des DEEE. Le lecteur peut trouver plus de détails sur les principes de fonctionnement des séparateurs électrostatiques dans les références [40], [61-64].

1.5 Conclusion

Le chemin parcouru dans le domaine de l'étude et l'amélioration des processus de séparations électrostatiques est déjà important ; beaucoup de choses ont été réalisées du point de vue pratique. Du point de vue théorique plusieurs phénomènes physiques interagissant dans le fonctionnement des processus de séparations électrostatiques ont été identifiés.

Les résultats de ces études ont apporté des avancées significatives aux processus de séparation électrostatique pour les adapter aux nouvelles applications dans le domaine du traitement des DEEE. Cependant, ces améliorations aboutissent à des mises en œuvres de processus de plus en plus compliqués qui exigent actuellement l'utilisation de techniques d'ajustement et de pilotage basées sur des méthodes purement expérimentales.

Chapitre II : Modélisation expérimentale des processus de séparation électrostatique

Le présent chapitre est consacré à la mise en place d'une modélisation fine du comportement réel d'un séparateur électrostatique à cylindre tournant (Figure II.1) qualifié de complexe à cause de l'interaction d'un ensemble de phénomènes. Vu la complexité de ces phénomènes nous avons vu qu'il est envisageable de modéliser le comportement de cette installation par un modèle empirique. Le modèle élaboré sera couplé à une méthode d'optimisation, afin de nous fournir des scénarii de configurations pour atteindre des qualités de séparations optimales.



Figure II.1 : Séparateur électrostatique à cylindre tournant SELMEG
(Laboratoire IRECOM ; Université de Sidi Bel Abbese ; Algérie)

II.1 Modélisation empirique d'un séparateur électrostatique à cylindre tournant

Nous cherchons à travers cette étude à améliorer le comportement d'un séparateur électrostatique utilisé dans la récupération des produits conducteurs et isolants à partir des déchets de câbles électriques (Figure II.2). L'installation utilisée dans cette application est équipée de trois compartiments réservés aux produits conducteurs, isolants et mixtes.

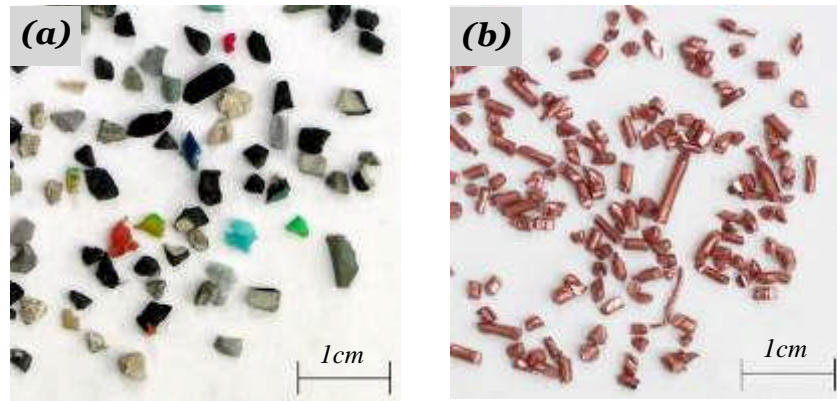


Figure II.2: Déchets de câbles électriques récupérés à la sortie d'un broyeur
(a) : granules isolantes (b) : granules conductrices

Dans cette installation la qualité d'une séparation peut être quantifiée par plusieurs critères de performances tels que : la *récupération* et la *pureté* des produits conducteurs et isolants et le *pourcentage* du produit mixte définis respectivement par les relations (II.1-II.3) [13,65]

$$Réc(\%) = \frac{m_{ic}}{m_{it}} \times 100 \quad (II.1)$$

$$Pur(\%) = \frac{m_{ic}}{m_{tci}} \times 100 \quad (II.2)$$

$$M(\%) = \frac{M}{m_t} \quad (II.3)$$

Avec

- m_t : masse totale du mélange granulaire introduit dans le séparateur,
- m_{ti} : masse totale du produit i introduit dans le séparateur ;
- m_{ic} : masse du produit i collecté dans la partie qui lui est réservé,
- m_{tci} : masse totale du produit collecté dans le compartiment réservé au produit i .
- M : masse totale du produit mixte

L'étude des effets des facteurs d'un séparateur à cylindre tournant utilisé pour le traitement des *DEEE* montre la présence d'un nombre important de facteurs liés aux paramètres géométriques et électriques de l'installation [16-17]. Ces facteurs exercent une influence significative sur l'ensemble des critères de performance de l'installation (II.1-II.3).

Dans notre étude la qualité d'une séparation est modélisée en fonction de trois facteurs contrôlés électriquement. Ces facteurs sont : la vitesse de rotation du

cylindre tournant « $n [tr/min]$ », la valeur de la haute tension appliquée aux électrodes couronne et statique « $u [kV]$ » ; et le débit du mélange introduit dans le séparateur électrostatique « $d [kg/h]$ ». Des essais préliminaires ont permis de déterminer les plages de variation de chaque facteur susceptible de conduire à des séparations optimales (table II.1)

Table II. 1 : Domaine d'étude

Facteur	min	max
Vitesse $n [tr/min]$	60	100
Tension $u [kV]$	26	30
Débit $d [kg/h]$	6	12

La modélisation des critères de performance (II.1-II.3) du séparateur en fonction des facteurs regroupés dans la table II.1 est réalisée à l'aide d'un modèle empirique. Ce type de modèle (*modèle type boîte noire*) est généralement construit à partir d'une base de données expérimentales, qui regroupe des valeurs numériques du critère de performance étudié et les niveaux des facteurs associés. La modélisation dans ce cas consiste à estimer les paramètres du modèle mathématique pour qu'il soit capable de prédire les résultats expérimentaux.

Dans la littérature on trouve deux types de modèles qui sont adaptés à notre problème à savoir les modèles linéaire et non linéaire [66]. Le premier type de modèle a été largement exploité dans la modélisation des processus de séparation électrostatique autour d'un point de fonctionnement optimal [19-21, 67]. La forme généralisée des fonctions linéaires utilisées dans l'ensemble de ces travaux est :

$$f(x) = \sum_{i=1}^N \alpha_i h_i(x) \quad (\text{II.4})$$

Où les $h_i(x)$ sont des fonctions non paramétrées d'une ou plusieurs variables groupées dans le vecteur x et α_i les paramètres de la fonction $f(x)$.

Le deuxième type de modèle qui est considéré comme non linéaire a aussi été largement utilisé pour la modélisation des processus industriels [68- 69]. Cependant, l'exploitation de ce type de modèle dans le domaine de la séparation électrostatique reste limitée. La forme généralisée de ce type de modèle est:

$$f(x) = \sum_{i=1}^N \alpha_i h_i(x, \beta_i) \quad (\text{II.5})$$

Où les β_i sont des combinaisons linéaires de fonctions paramétrées qui représentent des vecteurs de paramètres des fonctions h_i , et α_i représentent les paramètres de la fonction $f(x)$.

L'estimation des paramètres d'un modèle empirique se fait généralement par la minimisation d'une fonction de coût associée à l'erreur de prédiction du modèle (*Risque empirique* [71]). Cette fonction est définie par :

$$R_{emp}(f) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f(x_i) - y_i)^2 \quad (\text{II.6})$$

Dans le cas d'un modèle non linéaire le problème de la minimisation du risque empirique peut être mal posé et plusieurs solutions optimales coexistent. Dans ce cas le risque empirique est remplacé par le risque empirique régularisé [70] défini par la relation suivante :

$$R_{reg}(f) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f(x_i) - y_i)^2 + \lambda \Gamma(f) \quad (\text{II.7})$$

Où Γ est une fonctionnelle de régularisation qui pénalise les solutions très complexes.

II.2 Modèle empirique polynomial

Dans cette étude on veut choisir une forme de modèle qui définit correctement la réponse d'un séparateur électrostatique à cylindre tournant en fonction de la valeur de la haute tension appliquée aux électrodes couronne et statique de la vitesse de rotation du cylindre et du débit du mélange traité. Parmi tous les modèles possibles on cherche celui qui possède le nombre le plus faible de paramètres et qui peut être mis en place à partir d'un nombre limité d'expériences. Nous commençons donc cette étude par la mise en place d'un modèle polynomial du premier ordre dont la forme est définie par la relation suivante :

$$Y = a_0 + a_1 n + a_2 u + a_3 d \quad (\text{II.8})$$

Où n, u, d sont les facteurs liés au critère de performance Y .

Etant donné que nous avons retenu trois facteurs, nous avons au total 4 coefficients à déterminer; la base de données expérimentale devra donc être constituée au minimum de 4 expériences. Pour réaliser ces expériences chaque facteur doit être doté d'au moins 2 modalités. La modalité choisie pour chaque facteur est indiquée dans la table II.2.

Table II.2 : Modalités des facteurs choisis pour l'élaboration d'un modèle linéaire

Facteur	Modalité	
Vitesse n [tr/min]	60	100
Tension u [kV]	26	30
Débit d [kg/h]	6	12

Dans ce cas, la définition du domaine expérimental découle directement de la définition des facteurs et de leurs modalités. En effet le domaine est défini comme étant l'ensemble des combinaisons réalisables à partir des modalités des facteurs [68]. Donc, pour définir le domaine expérimental associé à cette application nous allons exploiter les règles d'orthogonalité et la permutation entre les modalités des facteurs. Les combinaisons possibles entre les modalités de ces facteurs permettent de réaliser 8 expériences. La distribution de ces expériences dans l'espace de recherche est représentée par la figure II.3.

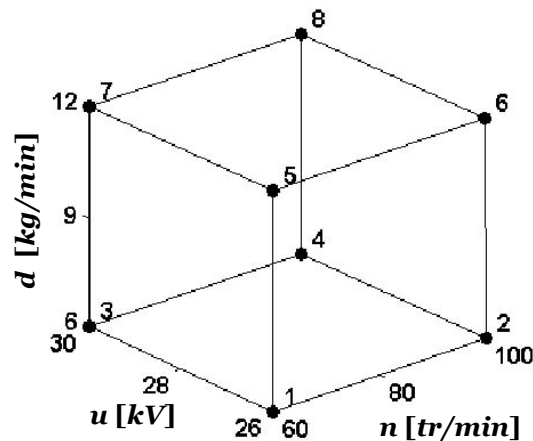


Figure II.3 : Distribution des points expérimentaux utilisés dans l'élaboration d'un modèle linéaire

Dans chaque expérience, le séparateur électrostatique est alimenté par 200 g de produit granulaire issu de déchets de câbles électriques. Le mélange contient 100 g du produit conducteur et 100 g du produit non conducteur.

Après la séparation, la masse du produit récupéré à la sortie du séparateur est mesurée avec une balance électronique à haute résolution (0,01 g). Les résultats expérimentaux de la récupération du produit non conducteur sont regroupés dans la table II.3.

Table II.3 : Expériences réalisées pour l'élaboration d'un modèle linéaire

Expérience	n	u	d	Y_{mes}
N°	[tr/min]	[kV]	[kg/min]	[%]
1	60	26	6	78,73
2	100	26	6	74,39
3	60	30	6	87,62
4	100	30	6	75,25
5	60	26	12	43,15
6	100	26	12	19,48
7	60	30	12	58,12
8	100	30	12	73,87

Pour ajuster les paramètres du modèle (II.8) sur l'ensemble des expériences regroupées dans la table II.3 nous avons utilisé la méthode des moindres carrés. Le principe de cette méthode consiste à estimer les paramètres du modèle (II.8) par la minimisation d'une fonction coût associée à l'erreur de prédiction du modèle (II.6).

Pour développer la forme de cette erreur, on suppose que chaque point expérimental (c'est-à-dire le point définie par les valeurs de facteur (n_k, u_k, d_k) et la valeur de la réponse associée à ces facteurs (Y_k) avec k l'indice de l'expérience) satisfaisant l'équation (II.8). Nous construisons alors un système d'équations linéaires dont les coefficients du modèle sont inconnus. Le système est défini par la relation II.9 et sa forme matricielle par la relation II.10 :

$$\begin{aligned}
 Y_{mes1} &= a_0 + a_1 n_1 + a_2 u_1 + a_3 d_1 \\
 Y_{mes2} &= a_0 + a_1 n_2 + a_2 u_2 + a_3 d_2 \\
 &\vdots \\
 Y_{mes8} &= a_0 + a_1 n_8 + a_2 u_8 + a_3 d_8
 \end{aligned}
 \tag{II.9}$$

$$Ax = b
 \tag{II.10}$$

Avec :

$$A = \begin{bmatrix} 1 & n_1 & u_1 & d_1 \\ 1 & n_2 & u_2 & d_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & n_8 & u_8 & d_8 \end{bmatrix}; \quad x = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix}; \quad b = \begin{bmatrix} Y_{mes1} \\ Y_{mes2} \\ \vdots \\ Y_{mes8} \end{bmatrix}$$

Le système d'équations (II.9) est généralement caractérisé par un nombre d'équations indépendantes supérieures aux nombres d'inconnues. Par conséquent, il n'existe aucune solution qui satisfasse simultanément toutes les équations [72,73]. Nous sommes alors amenés à minimiser l'écart entre Ax et b . Pour cela on définit une fonction coût :

$$e = \frac{1}{2} \|Ax - b\|^2 \quad (\text{II.11})$$

Le minimum de e est défini par la solution x_0 tels que :

$$\frac{\partial}{\partial x} e(x_0) = A^T (Ax_0 - b) = 0 \quad (\text{II.12})$$

La résolution de l'équation II.12 permet l'obtention du vecteur de coefficients x_0 . Cette solution est donnée par la relation II.13.

$$x_0 = [A^T A]^{-1} A^T b \quad (\text{II.13})$$

En principe la matrice « $[A^T A]^{-1} A^T$ » est calculée à partir de la matrice « A » qui inclue les valeurs réelles des facteurs. L'utilisation de ce type de valeurs augmente la difficulté de calcul de la matrice « $[A^T A]^{-1} A^T$ ». Donc, pour faciliter les calculs et généraliser la solution obtenue à d'autres problèmes il est recommandé d'utiliser les valeurs centrées réduites des facteurs à la place de leurs valeurs réelles. Cette transformation connue sous le nom de la transformation de *Yate* est définie par les relations suivantes [71 ,74].

$$x_i^* = 2 \frac{x_i + x_{i0}}{x_{i\max} - x_{i\min}} \quad (\text{II.14})$$

$$x_{i0} = \frac{x_{i\max} + x_{i\min}}{2} \quad (\text{II.15})$$

Où x_i^* ; x_i ; $x_{i\max}$ et $x_{i\min}$ représentent respectivement les valeurs centrées réduites, les valeurs réelles, et les valeurs maximales et minimales de la $i^{\text{ème}}$ variable. Les coefficients du modèle obtenus avec cette méthode sont regroupés dans la table II.4

Le modèle obtenu est représenté mathématiquement par la relation (II.16) et deux surfaces de réponses sont représentées sur la figure II. 4.

$$Y_{cal} = 63.83 - 3.08 n + 9.89 u - 15.17 d \quad (\text{II.16})$$

Table II.4 : Coefficients du modèle linéaire calculés à partir des expériences de la table II. 2

Y_{cal}	Coefficient du modèle
constante	63,83
n	-3,08
u	9,89
d	-15,17

Ce type de graphe peut représenter la réponse du modèle en fonction de deux facteurs à la fois. Le niveau des autres facteurs est fixé généralement à des valeurs constantes. Les points noirs dans cette figure représentent les réponses mesurées du système et les indices indiqués sur chaque point correspondent aux numéros des expériences indiquées dans la table II.5.

Pour analyser la qualité prédictive du modèle obtenu nous allons en premier lieu examiner les résultats fournis par le modèle et les comparer avec les résultats mesurés de la réponse. Ces résultats sont regroupés dans la table II.5.

Table II.5 : Écart entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites par le modèle linéaire

Expérience	n	u	d	Y_{mes}	Y_{cal}	$E = Y_{mes} - Y_{cal}$
N°	[tr/min]	[kV]	[kg/min]	[%]	[%]	[%]
1	60	26	6	78,73	72,19	-6,54
2	100	26	6	74,39	66,03	-8,36
3	60	30	6	87,62	91,97	4,35
4	100	30	6	75,25	85,81	10,56
5	60	26	12	43,15	41,85	-1,31
6	100	26	12	19,48	35,69	16,21
7	60	30	12	58,12	61,62	3,50
8	100	30	12	73,87	55,47	18,41

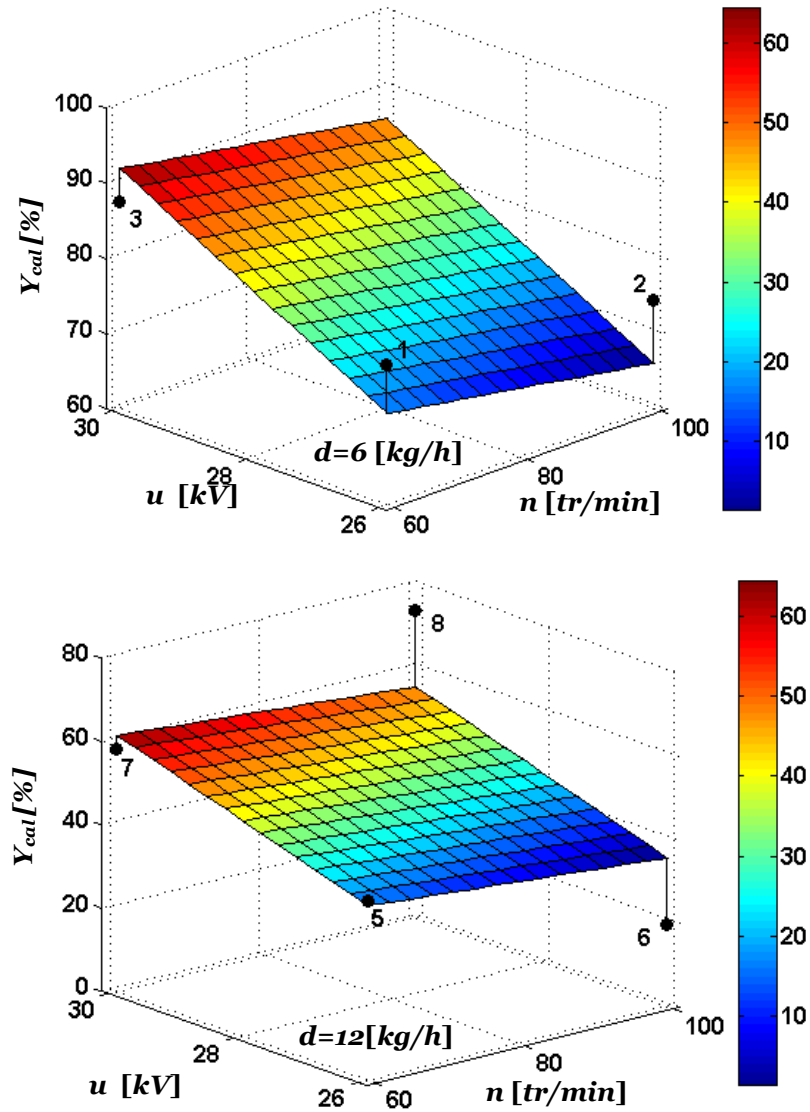


Figure II.4: Surfaces de réponses du modèle linéaire de la récupération du produit non conducteur élaboré à partir des expériences {1-8}

Dans cette table (table II.5), l'erreur E est calculée à partir des expériences exploitées dans le calcul des coefficients du modèle et qui sont appelées expériences de régression ou d'apprentissage. Dans notre étude cette valeur E est définie comme erreur de prédiction.

Le graphe d'adéquation de la figure II.5 est un autre outil qui montre un aperçu de ce type d'erreur. Ce graphe repose sur le principe de la représentation d'un nuage de points qui matérialisent en abscisse la variation de la réponse mesurée et en ordonnée la variation de la réponse calculée à partir du modèle obtenu.

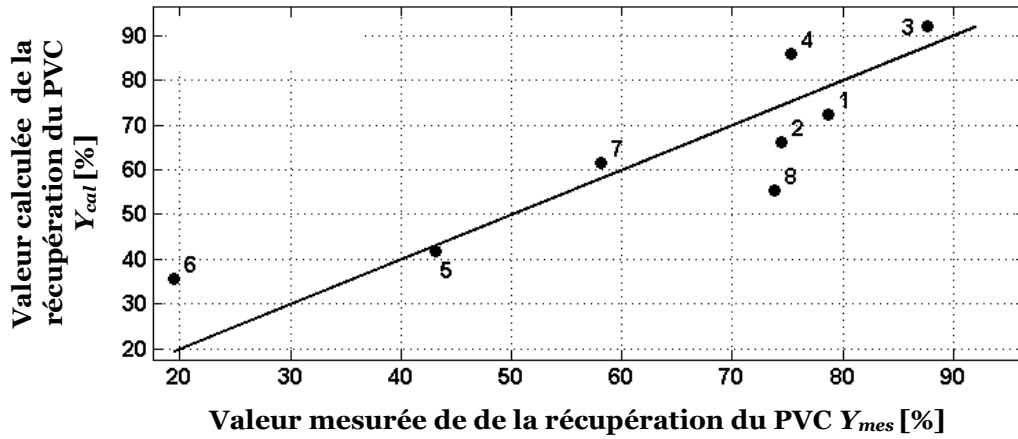


Figure II.5 : *Graphes d'adéquation du modèle linéaire associé aux expériences {1-8}*

Dans ce type de graphe, la représentation de la première bissectrice permet d'évaluer visuellement l'alignement des points. Plus le nuage est proche de cette première bissectrice, plus le modèle décrit convenablement la variation des résultats d'essais. Dans notre cas, le graphe d'adéquation de la figure II.5 montre une dispersion du nuage de points, autour de la première bissectrice, révélatrice d'une incapacité à générer des réponses proches du système réel.

Pour quantifier la qualité prédictive de notre modèle et la comparer à d'autres modèles, nous allons analyser l'écart entre valeur mesurée et valeur prédite. Cette valeur peut être considérée comme étant une variable aléatoire continue qui suit une loi de distribution normale [74]. Cette distribution peut être paramétrée par deux grandeurs à savoir : la moyenne μ (II.17) et l'écart type σ (II.18).

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i \quad (\text{II.17})$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (E_i - \mu)^2} \quad (\text{II.18})$$

La densité de probabilité de la variable aléatoire continue « e » paramétrée par une moyenne μ et l'écart type σ peut être définie par :

$$f(e|\mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{e-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (\text{II.19})$$

Cette forme nous permet d'associer à chaque intervalle défini par $\pm E$ une valeur de probabilité p définie par :

$$p = \int_{-E}^{+E} f(e|\mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-E}^{+E} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{e-\mu}{\sigma}\right)^2\right) de \quad (\text{II.20})$$

La figure II.6 montre la densité de probabilité associée aux valeurs « E » de la table II.5 et la probabilité d'un écart dont la valeur appartient à l'intervalle $\pm 1\%_{PVC}$. L'intervalle défini par $\pm 1\%_{PVC}$ est pris comme valeur de référence pour comparer la qualité des modèles élaborés durant cette étude.

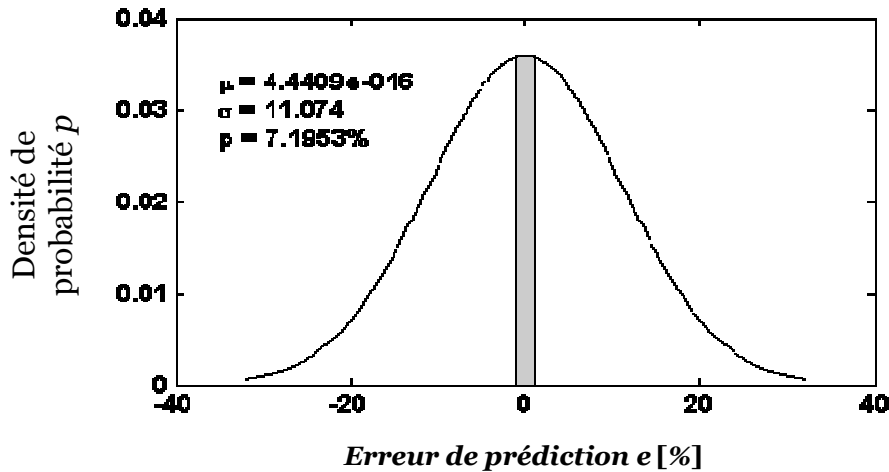


Figure II.6 : Densité de probabilité de l'écart entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites par le modèle linéaire associé aux expériences {1-8}

En calculant la probabilité d'une erreur ($-1\% \leq e \leq 1\%$) qui peut survenir lors de la prédiction de la valeur de la récupération du PVC, nous avons trouvé une valeur de l'ordre de $p = 7.2\%$. Donc, la probabilité que l'erreur $|e| > 1\%$ est de l'ordre de $1-p=92.8\%$. Dans ce cas, on peut dire qu'il est fort probable que notre modèle (II.16) fournisse des valeurs avec une erreur supérieure à 1%. Rappelons ici que, dans cette partie du travail, nous visons le choix d'un modèle qui traduise correctement la variation de la réponse du séparateur à cylindre tournant. Nous sommes donc amenés à choisir un modèle caractérisé par une valeur maximale de p .

Pour augmenter la probabilité des erreurs dans un intervalle étroit autour de valeurs nulles (dans cette étude nous avons pris un intervalle de référence définie par $\pm 1\%$), nous avons choisi un nouveau modèle. Il s'agit d'un modèle polynomial du deuxième degré ou quadratique dont la forme est représentée par (II.21).

$$Y_{cal} = a_0 + a_1n + a_2u + a_3d + a_{11}n^2 + a_{22}u^2 + a_{33}d^2 + a_{12}nu + a_{13}nd + a_{23}ud \quad (\text{II.21})$$

Le modèle possède au total 10 coefficients à déterminer. La base de données de régression devra donc être constituée d'au minimum 10 expériences. Pour réaliser ces

expériences, chaque facteur devra être doté d'au moins 3 modalités. Les modalités choisies pour chaque facteur sont indiquées dans la table II.6. Par ailleurs, ce choix nous permet d'exploiter la totalité des expériences réalisées précédemment (table II.5).

Table II.6 : Modalités des facteurs choisis pour l'élaboration d'un modèle quadratique

Facteur	Modalité		
Vitesse n [tr/min]	60	80	100
Tension u [kV]	26	28	30
Débit d [kg/h]	6	9	12

En appliquant les règles de permutation on peut construire un plan d'expérience caractérisé par 27 expériences dont la distribution dans l'espace de d'étude est représentée par la figure II.7.

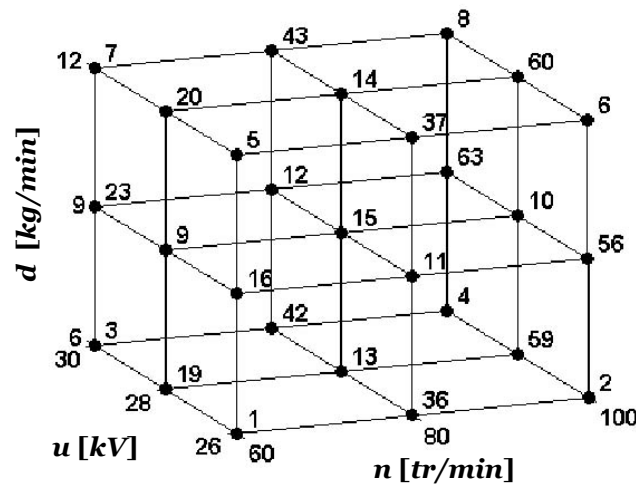


Figure II.7 : Distribution des points expérimentaux utilisés dans l'élaboration d'un modèle quadratique.

Pour ajuster le modèle (II.21) sur l'ensemble des expériences effectuées (figure II.7) nous avons utilisé la méthode des moindres carrés présentée précédemment et nous avons trouvé comme solution l'ensemble des coefficients regroupés dans la table II.7.

Connaissant une estimation des coefficients du modèle du deuxième degré, il est possible d'utiliser ce dernier pour faire une prédiction de la récupération du PVC dans les points expérimentaux. A partir des valeurs mesurées et des valeurs calculées (table II.8) on peut construire le graphe d'adéquation du modèle obtenu.

Table II.7 : Coefficients du modèle quadratique

<i>R_{PVC}</i>	Coefficient du modèle
Cst	75,57
<i>n</i>	-0,84
<i>u</i>	8,33
<i>d</i>	-15,94
<i>n</i> ²	-4,46
<i>u</i> ²	-6,47
<i>d</i> ²	-0,29
<i>nu</i>	2,79
<i>nd</i>	1,91
<i>ud</i>	6,60

Table II.8: Expérience utilisée dans l'élaboration d'un modèle quadratique

Expérience N°	<i>n</i> [tr/min]	<i>u</i> [kV]	<i>d</i> [kg/min]	<i>Y_{mes}</i> [%]	<i>Y_{cal}</i> [%]	<i>E</i> [%]
1	60	26	6	78,73	84,103	-5,373
2	100	26	6	74,39	73,033	1,357
3	60	30	6	87,62	81,979	5,641
4	100	30	6	75,25	82,053	-6,803
5	60	26	12	43,15	35,196	7,954
6	100	26	12	19,48	31,756	-12,276
7	60	30	12	58,12	59,486	-1,366
8	100	30	12	73,87	67,189	6,681
9	60	28	9	66,89	71,954	-5,064
10	100	28	9	74,17	70,271	3,899
11	80	26	9	62,68	60,769	1,911
12	80	30	9	75,49	77,423	-1,933
13	80	28	6	94,11	91,219	2,891
14	80	28	12	57,98	59,333	-1,353
15	80	28	9	73,3	75,568	-2,268
16	60	26	9	57,54	59,941	-2,401
19	60	28	6	93,69	89,513	4,177
20	60	28	12	52,17	53,812	-1,642
23	60	30	9	69,1	71,024	-1,924
36	80	26	6	80,83	83,023	-2,193
37	80	26	12	40,75	37,931	2,819
42	80	30	6	87,42	86,471	0,949
43	80	30	12	66,97	67,792	-0,822
56	100	26	9	60,89	52,686	8,204
59	100	28	6	83,37	84,015	-0,645

60	100	28	12	55.95	55,944	0,006
63	100	30	9	74.49	74,912	-0,422

Dans le graphe d'adéquation du modèle deuxième degré (figure II.8), on remarque que l'alignement des points sur la première bissectrice est amélioré par rapport au modèle linéaire (figure II.5). Cette amélioration est quantifiée par une probabilité $P_{|e|<1\%} = 17.30\%$.

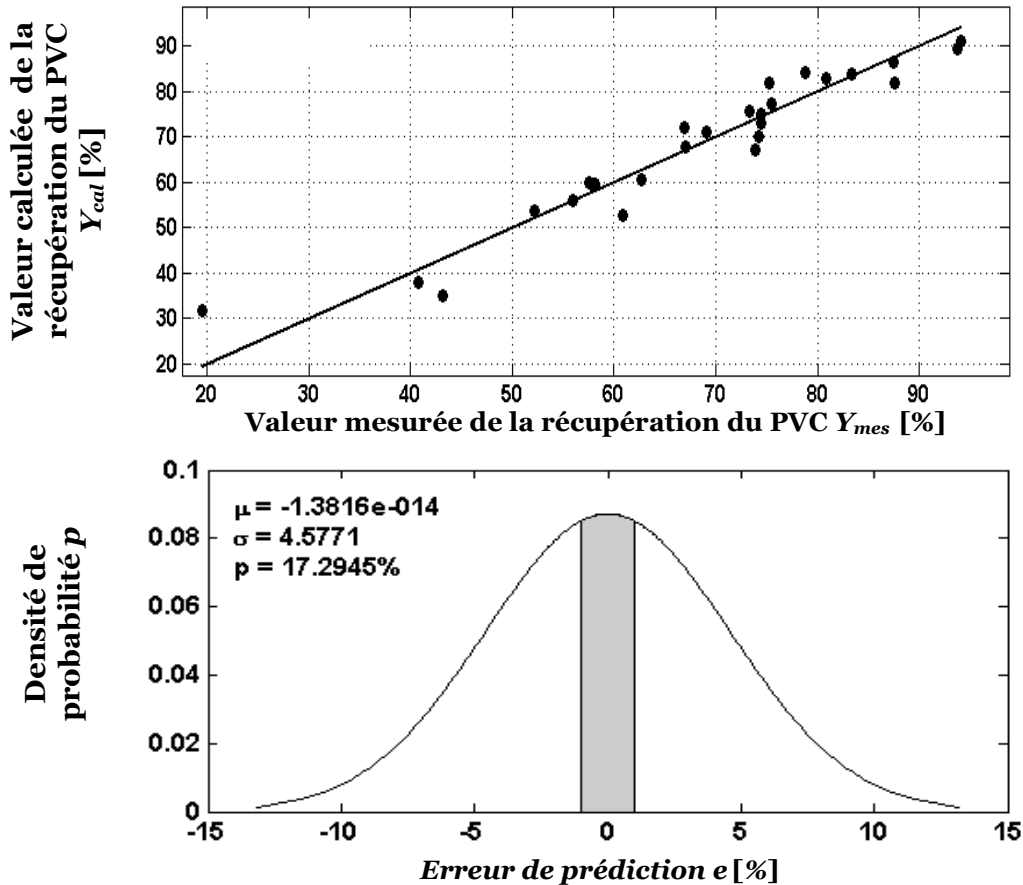


Figure II.8 : Qualité prédictive du modèle quadratique ; (a) : Graphe d'adéquation du modèle quadratique associé aux expériences {1-16,19,20,23,36,37,42,43,56,59,60,63} ; (b) : Densité de probabilité de l'écart entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites associée au graphe d'adéquation.

L'amélioration est-elle due à l'augmentation du nombre d'expériences ou à l'augmentation du degré du polynôme choisi ? Pour répondre à cette question nous avons élaboré un modèle linéaire à partir de l'ensemble des expériences utilisées dans le modèle du deuxième degré. En exploitant l'ensemble de ces expériences, nous avons abouti à un modèle caractérisé par les coefficients regroupés dans la table II.9. Les valeurs mesurées et prédites par le modèle sont disponibles dans l'annexe A.I.2.

Table II.9: Coefficients du modèle linéaire élaboré en utilisant les expériences du modèle quadratique

R_{PVC}	Coefficient du modèle
Constante	68,09
N	-0,84
U	8,33
D	-15,94

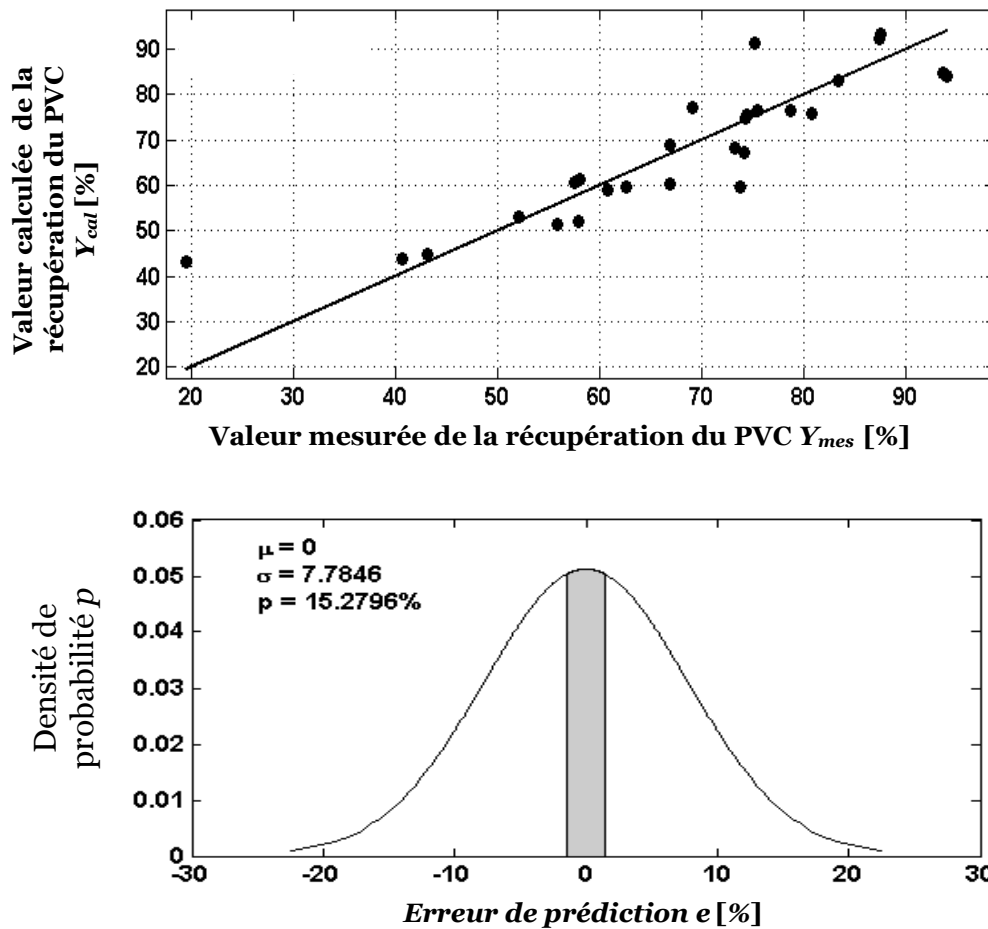


Figure II.9: Qualité prédictive du modèle linéaire élaboré à partir des expériences $\{1-16,19,20,23,36,37,42,43,56,59,60,63\}$. (a) : Graphe d'adéquation du modèle linéaire ; (b) : Densité de probabilité de l'écart entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites associée au graphe d'adéquation.

D'après le graphe d'adéquation du modèle linéaire on remarque que la réponse du modèle est mal ajustée par rapport à la réponse réelle du système. En quantifiant la qualité du modèle sur l'ensemble des expériences nous avons trouvé une probabilité $P_{|e|<1\%} = 15.27\%$.

En examinant les surfaces de réponses du modèle linéaire et du modèle du deuxième degré élaboré à partir du même ensemble expérimental, nous constatons que le modèle du deuxième degré assure un meilleur suivi de la distribution des points expérimentaux dans l'espace d'étude. Bien que l'augmentation du nombre d'expériences contribue à l'amélioration de la qualité du modèle, cette contribution demeure limitée par la capacité du modèle à suivre rigoureusement la distribution des points expérimentaux dans l'espace de recherche.

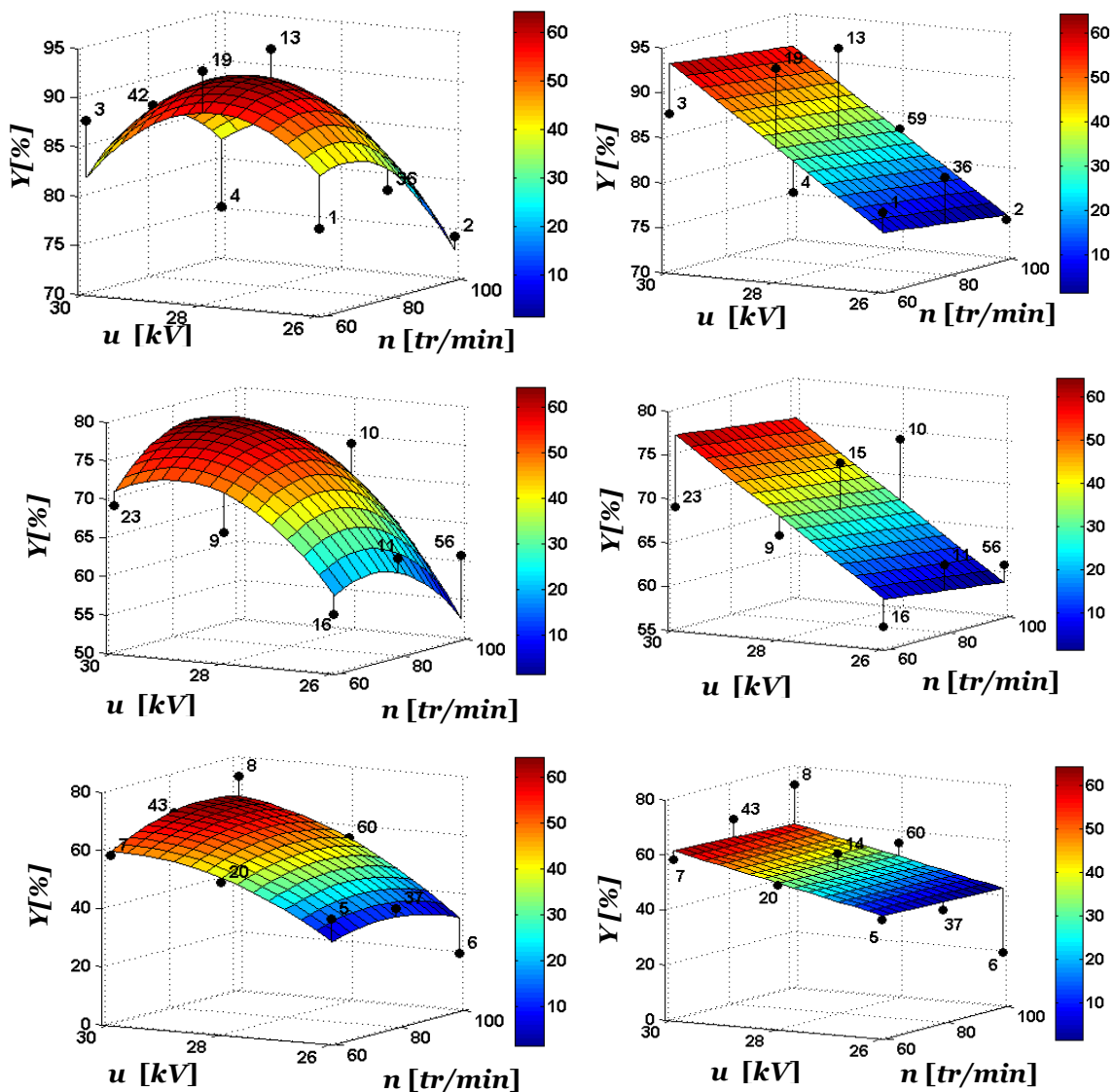


Figure II.10 : Surfaces de réponses des modèles quadratique et linéaire

Pour encore améliorer la qualité prédictive du modèle élaboré nous avons augmenté à nouveau le degré du polynôme utilisé. La forme du polynôme utilisé dans ce cas est donné par :

$$Y_{cal}=a_0+a_1n+a_2u+a_3d+ a_{11}n^2+a_{22}u^2+a_{33}d^2+ a_{12}nu+ a_{13}nd+ a_{23}ud + a_{111}n^3+a_{222}u^3+a_{333}d^3 + \dots + nud \quad (II.22)$$

Le polynôme est caractérisé par 20 coefficients à déterminer. La base de données de régression devra donc être constituée d'au minimum 20 expériences. Pour réaliser ces expériences, chaque facteur doit être doté d'au moins 3 modalités. Puisque nous disposons d'un ensemble de 27 expériences exploitées précédemment dans l'élaboration d'un modèle du deuxième degré, complétons donc ces expériences pour élaborer un modèle du troisième degré avec interactions.

La méthode des moindres carrés est encore mise à l'épreuve pour déterminer les coefficients regroupés dans la table II.10. L'utilisation des valeurs mesurées et prédites par le modèle conduit à la construction du graphe d'adéquation du modèle (figure II.11).

Table II.10 : Coefficients du modèle 3^{ème} degré avec interaction

Y_{cal}	Coefficient du modèle
constante	75,57
<i>n</i>	1,82
<i>u</i>	2,80
<i>d</i>	-8,84
<i>n</i> ²	-4,46
<i>u</i> ²	-6,47
<i>d</i> ²	-0,29
<i>nu</i>	2,79
<i>nd</i>	1,91
<i>ud</i>	6,60
<i>n</i> ³	1,82
<i>u</i> ³	2,80
<i>d</i> ³	-8,84
<i>n</i> ² <i>u</i>	1,09
<i>n</i> ² <i>d</i>	0,25
<i>u</i> ² <i>n</i>	-1,45
<i>u</i> ² <i>d</i>	2,35
<i>d</i> ² <i>n</i>	-5,27
<i>d</i> ² <i>u</i>	3,00
<i>nud</i>	5,93

Le graphe d'adéquation de la figure II.11 révèle une amélioration significative de la réponse du modèle du troisième degré devenue très proche de la valeur mesurée à la sortie du séparateur électrostatique. En examinant la qualité prédictive du modèle nous trouvons que la probabilité de l'erreur dans l'intervalle de référence atteint $P_{|e|<1\%} = 42.95\%$.

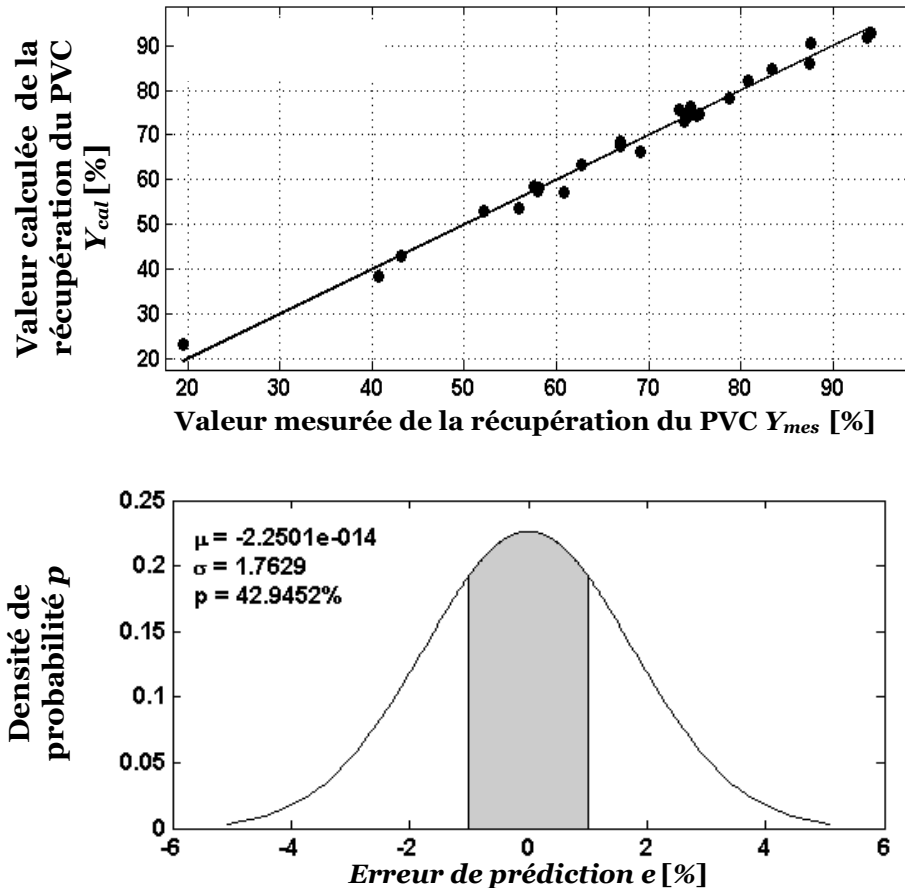


Figure II.11 : Qualité prédictive du modèle du troisième degré élaboré à partir des expériences {1-16,19,20,23,36,37,42,43,56,59,60,63}. (a) : Graphe d'adéquation du modèle linéaire ; (b) : Densité de probabilité de l'écart entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites associée au graphe d'adéquation.

En comparant les surfaces de réponses du modèle quadratique et les surfaces de réponses du modèle de troisième degré on peut remarquer que la formulation mathématique de ce dernier lui permet un meilleur rapprochement des points expérimentaux. Cependant, l'augmentation du degré du polynôme utilisé dans la modélisation du comportement du processus réel augmente le degré de difficulté de la formulation mathématique du polynôme et la réalisation des expériences nécessaires à l'élaboration du modèle. Aussi sommes-nous généralement amenés à choisir entre deux possibilités : la première consiste à modéliser le comportement du

processus sur un espace étroit autour du point de fonctionnement optimal. La deuxième consiste à utiliser d'autres modèles tels que les modèles non linéaires.

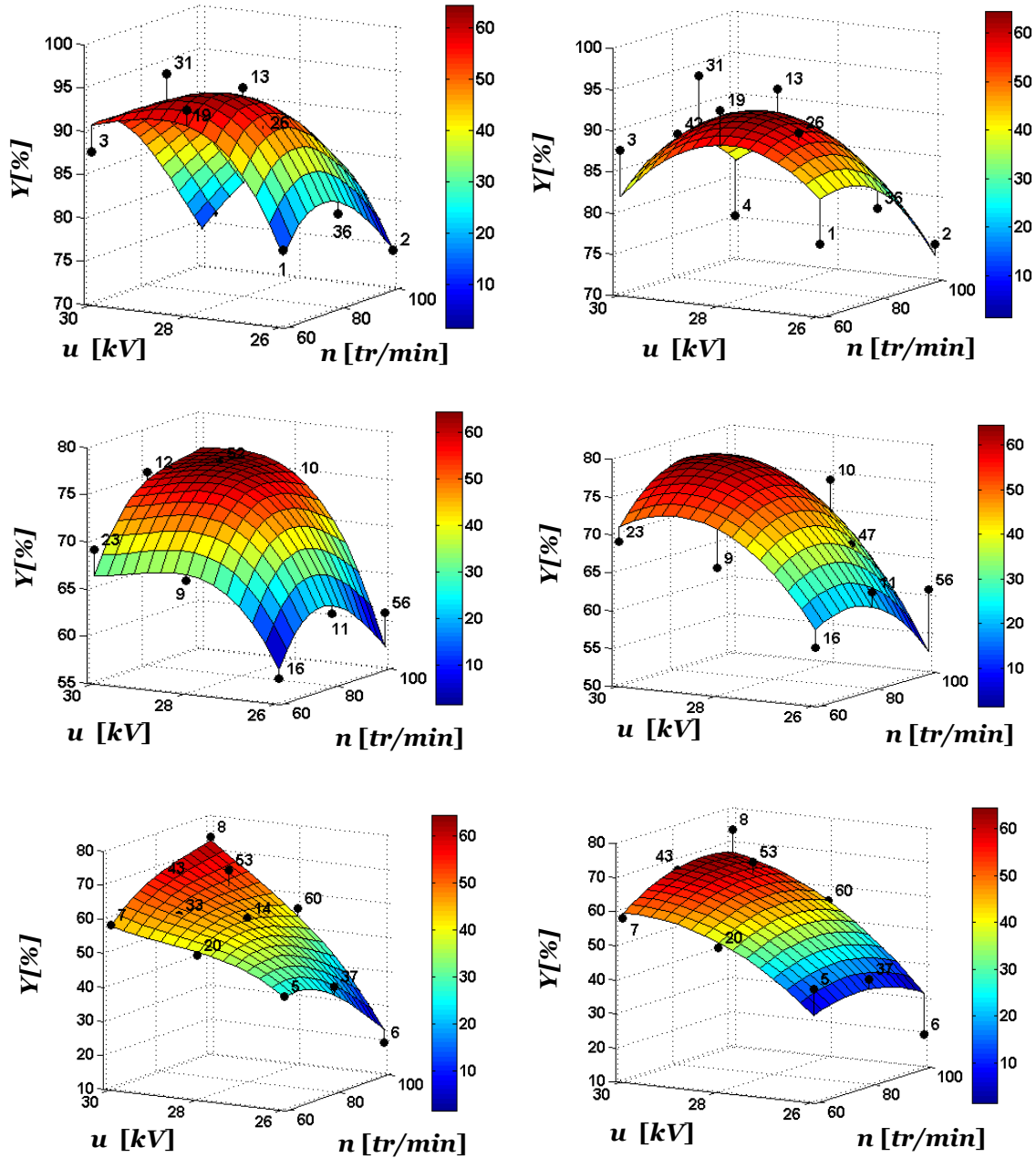


Figure II.12 : Comparaison entre les surfaces de réponses du modèle quadratique et le modèle du troisième degré

II.3 Modèle empirique non linéaire à base de réseau de neurones

Les réseaux de neurones artificiels *RNA* sont des modèles qui s'inspirent de la structure des systèmes nerveux biologiques. Un *RNA* est composé de plusieurs unités de calcul connues sous le nom de *neurones*. Les connexions entre les neurones du réseau sont caractérisées par des valeurs numériques réelles nommées *poids de connexion*.

Une phase d'apprentissage est nécessaire pour déterminer les poids de connexions au sein du réseau pour que ce dernier soit capable d'identifier les liaisons entre les réponses et les facteurs de l'installation étudiée. Dans cette phase on utilise généralement une base de données numérique qui regroupe des informations sur le fonctionnement du système à modéliser dans une zone d'étude bien déterminée.

L'estimation des paramètres du modèle se fait par une minimisation du risque empirique (II.6) ou du risque empirique régularisé (II.7). Dans les deux cas, la base de données expérimentale doit inclure deux sous-ensembles : La base d'apprentissage, à l'aide de laquelle on effectue l'estimation des paramètres du modèle, elle représente généralement 65% de la totalité des expériences effectuées. Les 35% des expériences qui restent, sont utilisées comme base de test, sur laquelle on essaie l'aptitude du réseau à reconnaître des exemples non appris. Cette dernière opération doit donc permettre d'estimer la capacité de généralisation du réseau établi, qui est le critère déterminant pour ce type de modèle.

Il existe actuellement plus de 50 types de réseaux utilisés dans différentes applications [75-76]. Dans le présent travail nous nous intéressons plus particulièrement aux réseaux de type *feed-forward*. La figure.II.12 montre les connexions entre les neurones de cette structure. Le choix de cette structure est basé sur le *théorème de Kolmogorov* [77,80]. Ce théorème représente un support mathématique qui encourage l'utilisation de ce type de structure dans la modélisation des systèmes non linéaires. Le théorème affirme que *n'importe quelle fonction continue multivariées puisse être approximée par la superposition de plusieurs fonctions continues à une seule variable*.

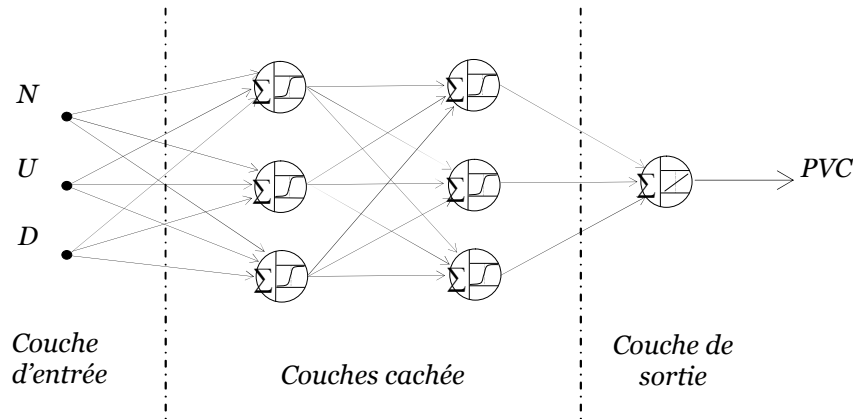


Figure II.13: Modèle du réseau de neurones de type *feed-forward*.

Les travaux de recherches publiés dans l'article [81] donnent plus d'intérêt à l'utilisation *des fonctions sigmoïdes* (II.23) qui sont généralement utilisées comme des fonctions d'activation dans le réseau de neurones. Les deux résultats de recherche peuvent être concrétisés par un simple réseau de type *feed-forward* avec des neurones modélisés par des fonctions sigmoïdes.

$$g(h) = \frac{1}{1 + e^{-\beta h}} \quad (\text{II.23})$$

Selon [77], aucune indication ne permet la détermination exacte du nombre de couches cachées et le nombre de neurone utilisés dans chaque couche pour un problème donné. Par ailleurs, d'autres chercheurs [80] prouvent théoriquement que les réseaux de type *feed-forward* avec deux couches sont capables d'approximer n'importe qu'elle fonction *multivariables*. Ce résultat a limité notre choix entre l'utilisation d'une ou deux couches cachées.

La méthode la plus évidente utilisée actuellement dans la détermination exacte du nombre de couches et du nombre de neurones consiste à appliquer une stratégie de l'essai et l'erreur pour déterminer la structure du réseau le plus performant.

Pour mettre en œuvre cette stratégie nous avons commencé notre recherche avec un réseau de neurones de type *feed-forward* à une couche cachée ; la représentation mathématique de cette architecture est définie par la relation suivante :

$$y = \beta(W_a^{(3)}\sigma_a(W_a^{(2)}\sigma_a(W_a^{(1)}x_a))) \in \mathfrak{R}^m \quad (\text{II.24})$$

Avec :

x_a : Vecteur des valeurs d'entrée : $x_a = [x_0 \ x_1 \ \dots \ x_n]^T \in \mathfrak{R}^{n+1}$; $x_0 = 1$.

$\sigma_a(\cdot)$: Vecteur des fonctions d'activation définie comme une application de \mathfrak{R}^p sur $[-1, 1]^{p+1}$ dans la première couche et de \mathfrak{R}^q sur $[-1, 1]^{q+1}$ dans la deuxième couche;

Où : n représente le nombre d'entrées ; p le nombre de neurones dans la première couche ; q le nombre de neurones dans la deuxième couche ; m le nombre de sortie et $W_a^{(i)}$ la matrice des poids de la $i^{\text{ème}}$ couche définie par :

$$W_a^{(1)} = \begin{bmatrix} w_{10}^{(1)} & w_{11}^{(1)} & \dots & w_{1n}^{(1)} \\ w_{20}^{(1)} & w_{21}^{(1)} & \dots & w_{2n}^{(1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{p0}^{(1)} & w_{p1}^{(1)} & \dots & w_{pn}^{(1)} \end{bmatrix} \quad W_a^{(2)} = \begin{bmatrix} w_{10}^{(2)} & w_{11}^{(2)} & \dots & w_{1p}^{(2)} \\ w_{20}^{(2)} & w_{21}^{(2)} & \dots & w_{2p}^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{q0}^{(2)} & w_{q1}^{(2)} & \dots & w_{qp}^{(2)} \end{bmatrix} \quad W_a^{(3)} = [w_{10}^{(3)} \ w_{11}^{(3)} \ \dots \ w_{1q}^{(3)}]$$

Généralement les neurones de la couche de sortie sont modélisés par une fonction d'activation linéaire dont la forme est définie par $\beta(x) = x$.

Avant que le réseau de neurones ne soit opérationnel il doit d'abord passer obligatoirement par une phase d'apprentissage. Dans cette phase les poids des connexions au sein du réseau sont mis à jour, afin de minimiser l'écart « e » entre les valeurs mesurées expérimentalement Y_{mes} et les valeurs prédites par le réseau Y_{cal} .

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_{cali} - Y_{mesi})^2 \quad (\text{II.25})$$

Plusieurs algorithmes ont été élaborés spécialement pour effectuer cette opération. Dans notre étude nous avons appliqué un algorithme standard de rétro-propagation pour effectuer l'opération de l'apprentissage. Ce type d'algorithme utilise la méthode du gradient comme une méthode d'optimisation pour mettre à jour les poids des connexions au sein du réseau.

Pour élaborer un modèle à base de réseau neuronal nous avons utilisé l'ensemble des 27 expériences réalisées précédemment dans l'élaboration d'un modèle du deuxième degré. Le réseau élaboré est de type *feed-forward* de 24 neurones dans la première et la deuxième couche. L'apprentissage du réseau est assuré par un algorithme standard de rétro-propagation.

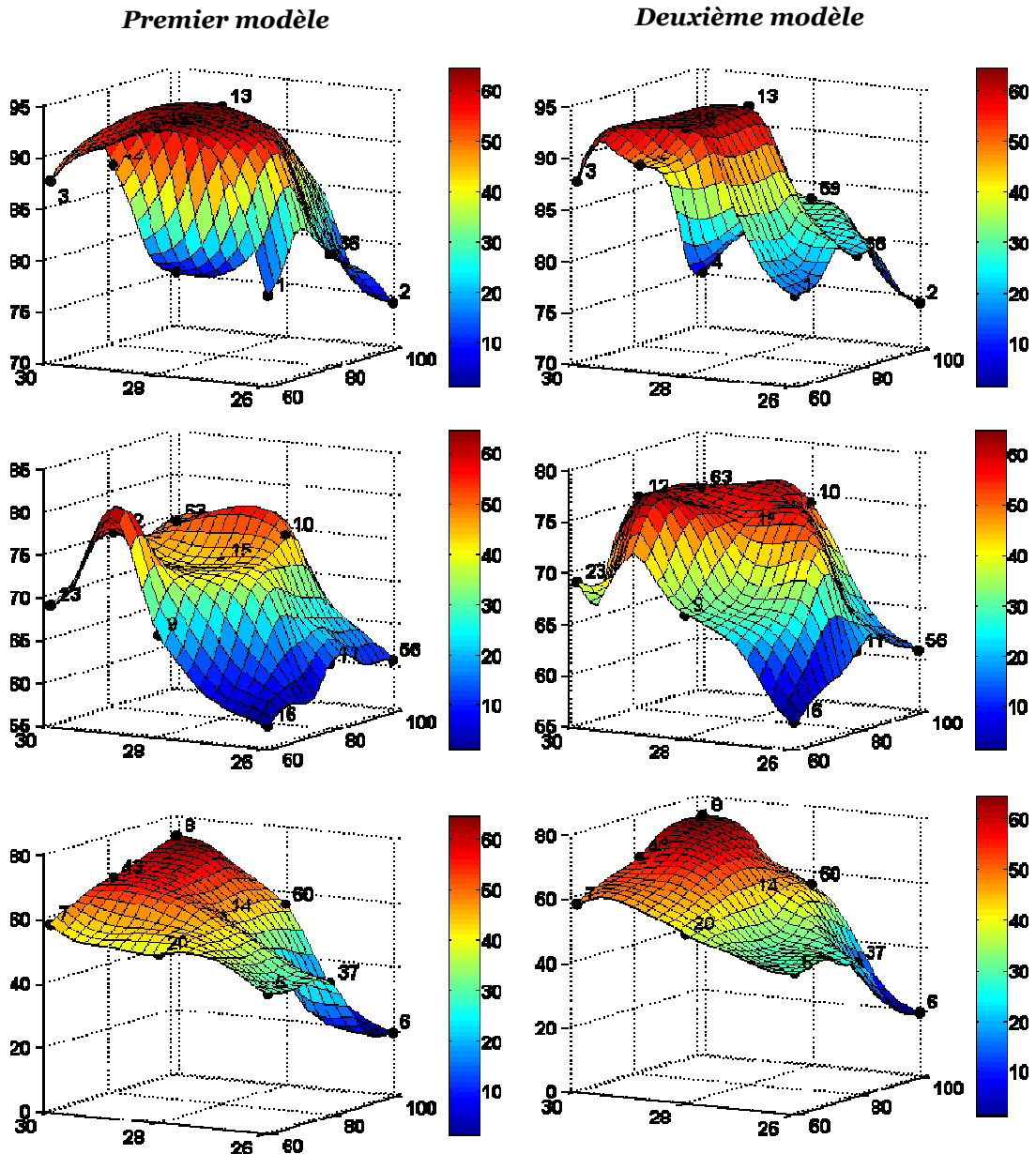


Figure. II.14: Modèles du PVC en fonction de n et u pour différentes valeurs de débit; le modèle est établi par RNA de type feed-forward de 24 neurones dans la première et la deuxième couche cachée ; les poids de connexions entre neurones sont déterminés par un algorithme standard de rétro propagation.

L'ensemble de ces caractéristiques a donné comme résultats plusieurs modèles qui passent par l'ensemble des points expérimentaux mais leurs allures sont très différentes. La figure II.14 montre les différences qui existent entre les réponses de deux modèles parmi l'ensemble des modèles possibles. Tous ces modèles sont capables de prédire les réponses du processus dans les 27 points expérimentaux de la base de données d'apprentissage mais leurs réponses diffèrent dans des points qui n'ont pas été pris en considération lors de la phase d'apprentissage.

Le graphe d'adéquation des deux modèles (figure II.15) indique un alignement parfait des points du graphe sur la première bissectrice. Cela nous indique que les modèles prévoient exactement la réponse du processus réel mais uniquement dans les points expérimentaux de la base d'apprentissage.

Comment sélectionner le modèle qui prévoit la réponse réelle du processus de séparation électrostatique dans tout l'espace de recherche est non pas seulement sur l'ensemble des points expérimentaux ? Pour répondre à cette question nous avons utilisé un autre critère appelé qualité de généralisation du modèle.

La valeur de la probabilité des erreurs des modèles obtenue dans l'intervalle de référence est de $P_{|e|<1\%} \approx 100\%$ (figure II.15). Cette valeur indique que les modèles élaborés sont parfaitement ajustés sur l'ensemble des expériences d'apprentissage traduisant ainsi l'alignement des points du graphe d'adéquation sur la première bissectrice (figure II.15).

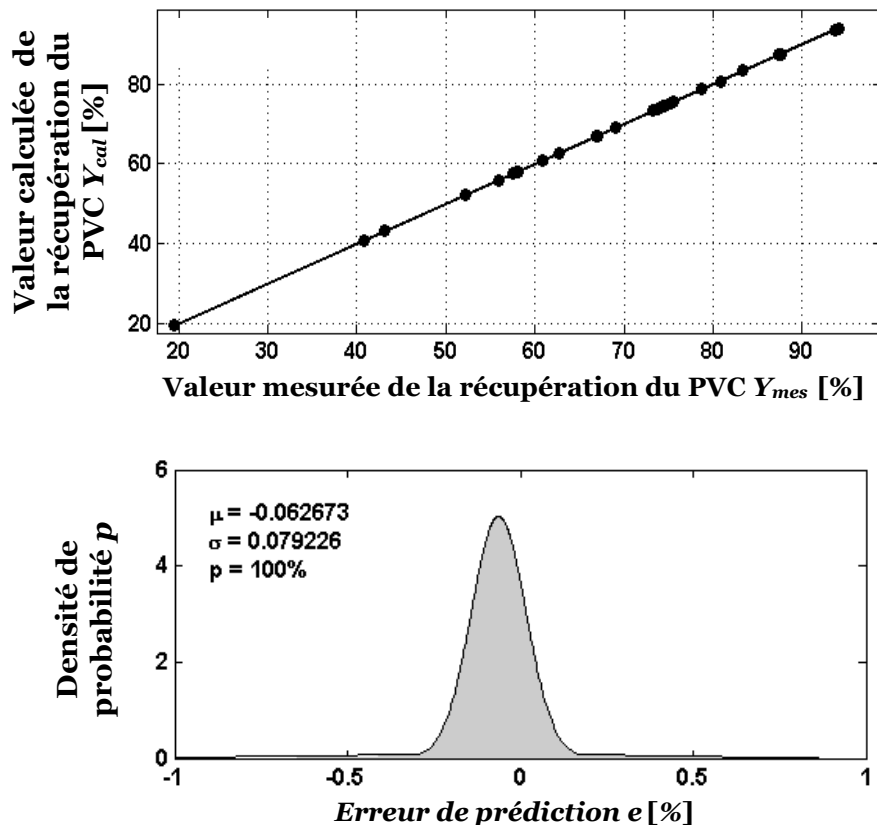


Figure II.15: Qualité prédictive du modèle à base de réseau de neurones élaboré à partir des expériences {1-16,19,20,23,36,37,42,43,56,59,60,63}. (a) : Graphe d'adéquation du modèle ; (b) : Densité de probabilité de l'écart entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites associée au graphe d'adéquation.

Pour sélectionner le modèle qui traduit correctement le comportement du processus de séparation électrostatique, nous avons mesuré la qualité du modèle sur l'ensemble des données de validation qui incluent des points expérimentaux différents par rapport aux points d'apprentissage. La distribution des points de validation par rapport aux points d'apprentissage est représentée sur la figure II.16.

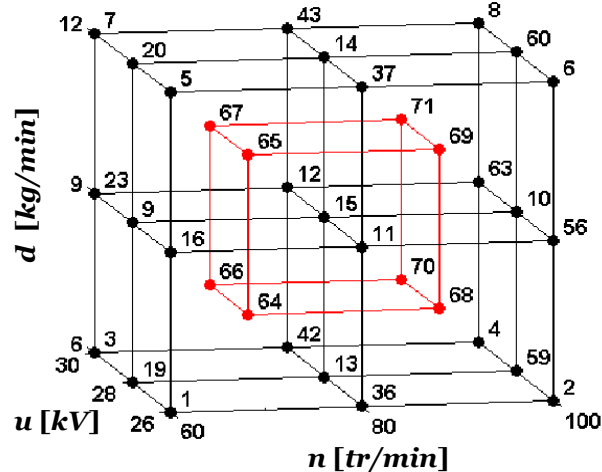


Figure II.16 : Distribution des points expérimentaux utilisés dans l'apprentissage et la validation du modèle à base du réseau neuronal

Chaque point de validation est positionné de façon équidistante par rapport aux points d'apprentissages qui se trouvent dans son voisinage. Cette distribution nous assure que la qualité de généralisation du modèle est mesurée dans des points appartenant à l'espace d'étude et qui se trouvent le plus loin possible par rapport aux points d'apprentissage. L'estimation des performances des modèles sur l'ensemble de ces points fournit une indication sur les capacités de généralisation du modèle à l'intérieur de l'espace d'étude.

La figure II.17 montre le graphe d'adéquation associé à la base de données de validation et les réponses de l'un des modèles élaborés dans les points de validation. Le modèle ainsi obtenu est mal ajusté sur l'ensemble des points de validation. Les positions des points de validation et les écarts entre ces points et les surfaces de réponses de l'un des modèles élaborés sont représentés par la figure II.18.

Pour quantifier la qualité de généralisation du modèle à base de réseau de neurones nous avons calculé la probabilité des erreurs dont la valeur absolue est inférieure à 1%, nous avons trouvé une valeur de l'ordre de $P_{|e|<1\%} = 11.54\%$. Cette valeur indique qu'il est fort probable que l'écart entre la réponse du modèle et la réponse du processus réel soit supérieur à 1% dans l'espace d'étude.

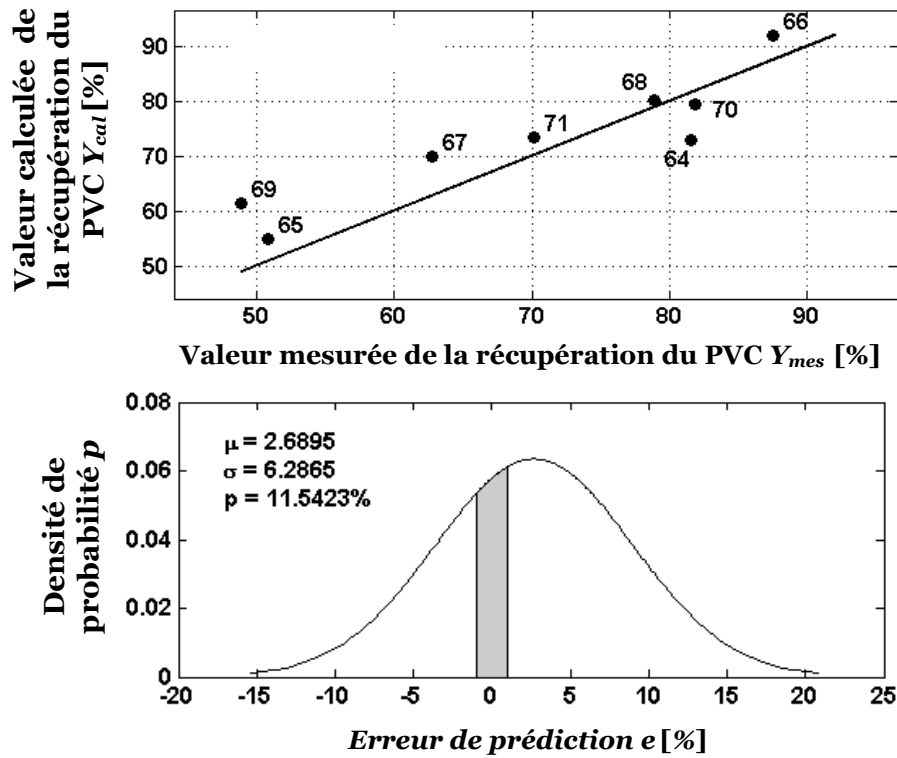


Figure II.17: Qualité de généralisation du modèle à base de réseau de neurone testée sur l'ensemble des expériences {64-71}. (a) : Graphe d'adéquation du modèle associé à l'ensemble des expériences de validation ; (b) : Densité de probabilité de l'écart entre les valeurs mesuré et les valeurs prédites associé au graphe d'adéquation.

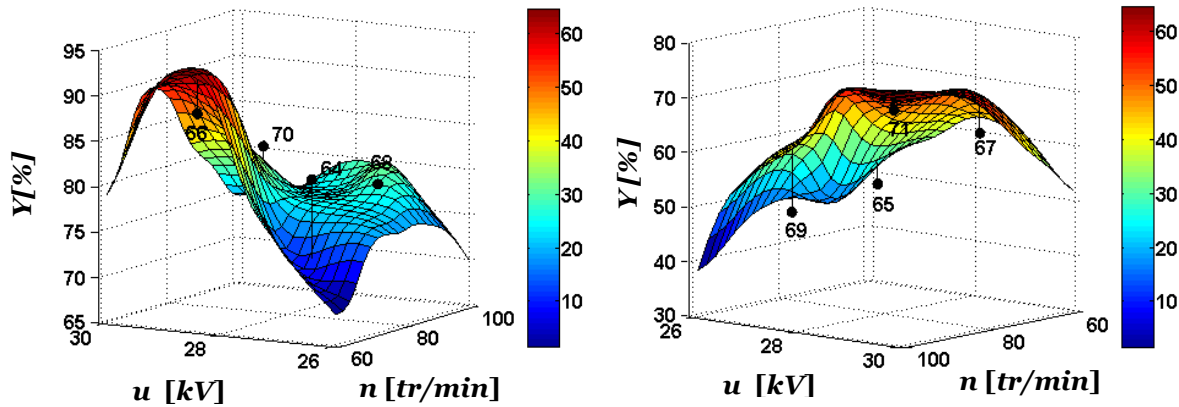


Figure. II.18 : Ecart entre les surfaces de réponse du modèle à base de réseau de neurones et l'ensemble des expériences de validation

Pour augmenter la qualité de généralisation du modèle élaboré nous avons utilisé une autre méthode d'apprentissage. Cette méthode est basée sur la technique de régularisation [81]. Le principe de cette méthode consiste à minimiser une combinaison de la somme des carrés des écarts et la somme des carrés des poids de connexion au sein du réseau. L'utilisation de cette technique a donné comme résultat un modèle dont les réponses sont représentées sur la figure II.19.

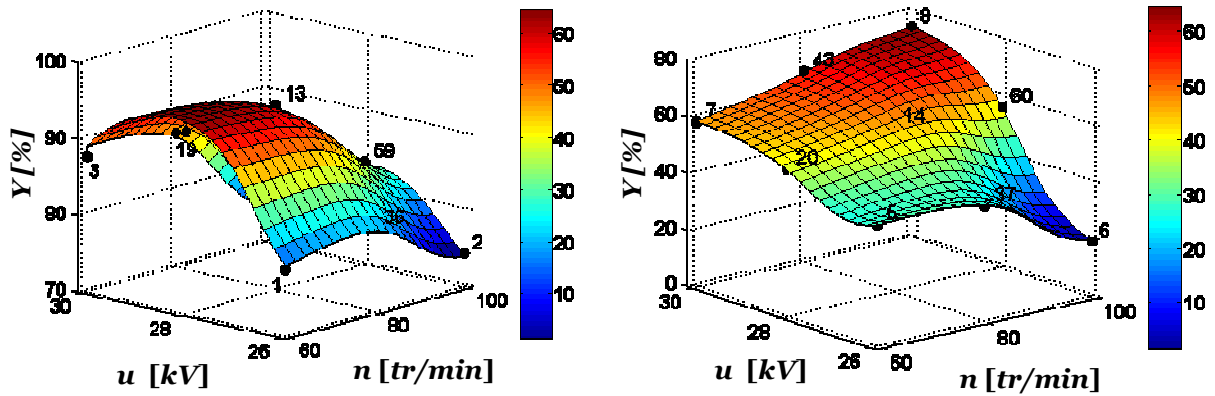


Figure II.19 : Modèle du PVC en fonction de n et u pour différentes valeurs de débit; le modèle est établi par RNA de type feed-forward de 24 neurones dans la première et la deuxième couche cachée ; les poids des connexions entre neurones sont déterminés par une méthode de régularisation.

Le modèle obtenu par des techniques de régularisation est caractérisé par une grande qualité prédictive et par une qualité de généralisation acceptable. La qualité du modèle est représentée graphiquement par les figures II.20 et II.21 .

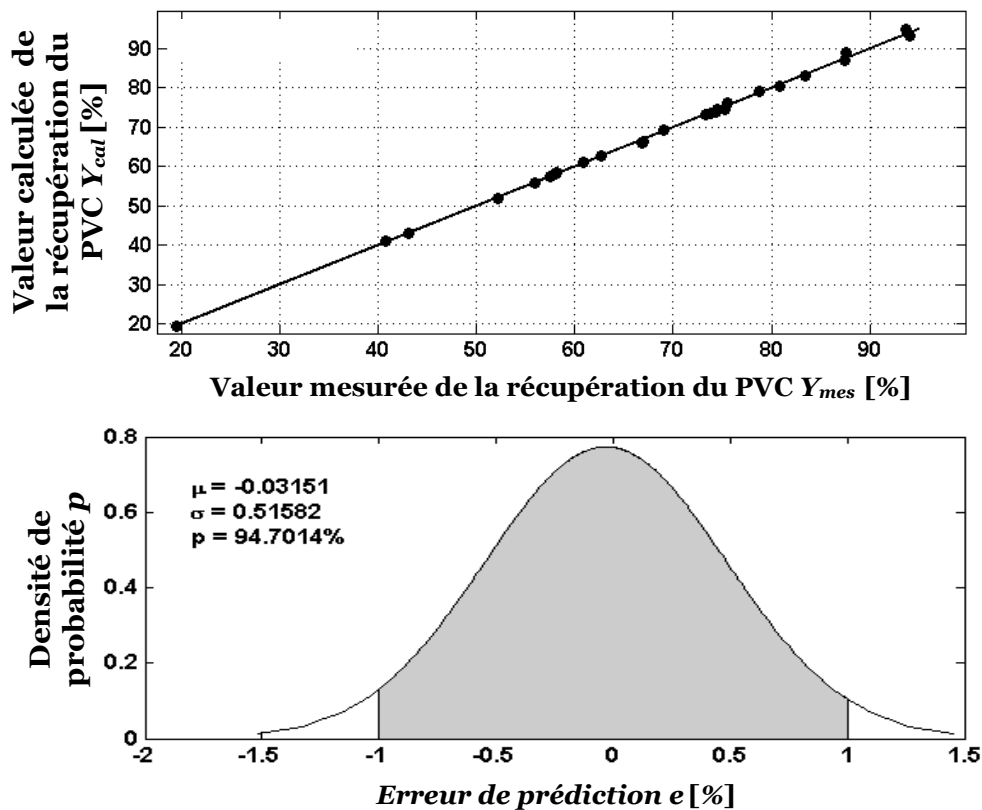


Figure II.20 : Qualité prédictive du modèle obtenue par la méthode de régularisation à partir de l'ensemble des expériences {1-16,19,20,23,36,37,42,43,56,59,60,63}. (a) : Graphe d'adéquation du modèle ; (b) : Densité de probabilité de l'écart entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites associée au graphe d'adéquation.

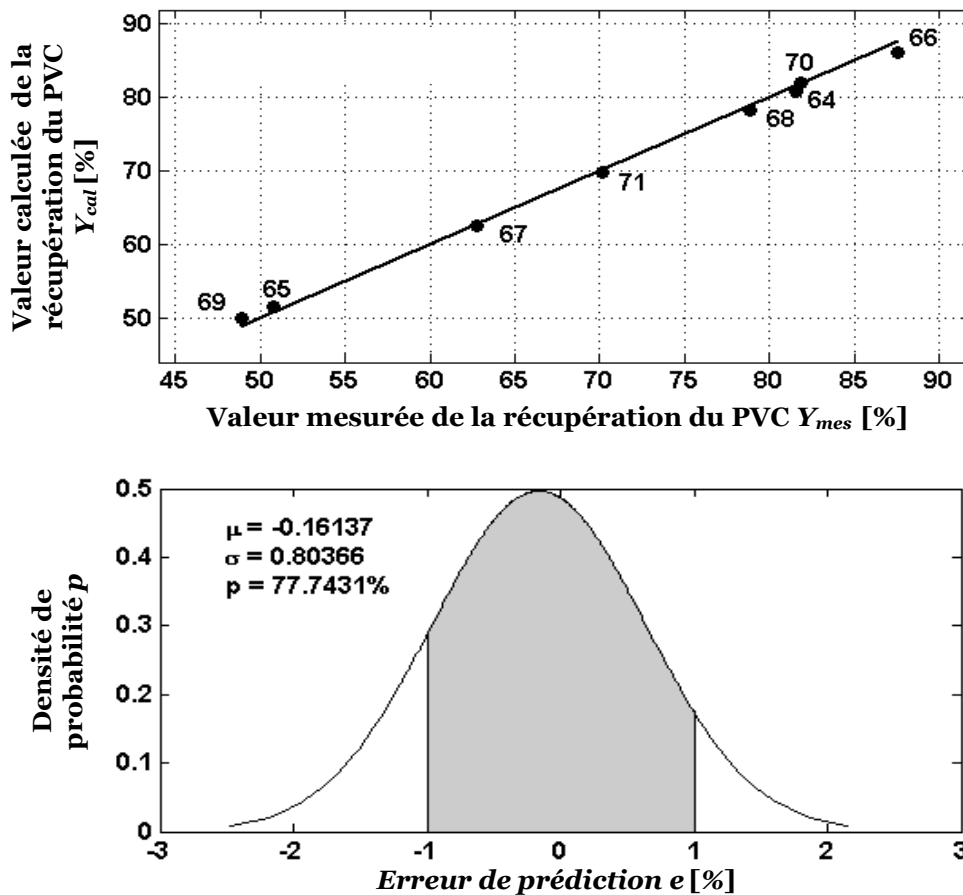


Figure II.21 : Qualité de généralisation du modèle obtenue par la méthode de régularisation testée sur l'ensemble des expériences {64-71} . (a) : Graphe d'adéquation du modèle associé à l'ensemble des expériences de validation ; (b) : Densité de probabilité de l'écart entre les valeurs mesurées et les valeurs prédites associée au graphe d'adéquation.

II.4 Conclusion

La modélisation d'un processus de séparation électrostatique consiste à créer l'image la plus fidèle de son comportement réel. Cette image est limitée, parce qu'elle est basée sur la connaissance inachevée du système et ne peut donc représenter totalement le comportement réel du processus. Cependant, même à partir des connaissances inachevées, le modèle obtenu peut être exploité dans diverses applications dès lors qu'il donne une description suffisamment précise du système.

Les résultats obtenus dans le présent chapitre montrent un avantage notable de l'utilisation des modèles non linéaires dans la modélisation de la qualité d'une séparation électrostatique en fonction des facteurs influents de l'installation.

Chapitre III : Méthodes d'optimisations

Le présent chapitre est consacré à la recherche d'une combinaison entre les facteurs d'installation qui maximisent la quantité de produit non conducteur récupéré à la sortie du séparateur électrostatique. Cette combinaison doit répondre à quelques exigences fonctionnelles qui correspondent généralement à des limitations imposées sur la valeur de chaque paramètre. L'ensemble de ces conditions est appelé contraintes fonctionnelles. Dans ce cas, notre problème peut être formulé mathématiquement par les relations suivantes :

$$\begin{aligned} & \max [Y_{cal}(n, u, d)] \\ & 60 \text{ [tr / min]} \leq n \leq 100 \text{ [tr / min]} \\ & 26 \text{ [kV]} \leq u \leq 30 \text{ [kV]} \\ & 6 \text{ [kg / h]} \leq d \leq 12 \text{ [kg / h]} \end{aligned} \tag{III.1}$$

Le problème (III.1) est un problème d'optimisation avec contraintes [82-85] dont la résolution fait appel à des méthodes spécifiques. La mise en œuvre de ces méthodes d'optimisation aboutie généralement à l'implémentation d'un programme informatique.

III.1 Optimisation du processus de SE

La résolution des problèmes d'optimisations a commencé par l'élaboration de la méthode de *la plus forte pente* [86]. Cette méthode a été appliquée pour la première fois par *A.L. Cauchy (1848)* pour résoudre des problèmes de minimisation *sans contraintes*. Jusqu'à nos jours, la méthode de la plus forte pente a été la base de toutes les méthodes d'optimisations *déterministes*. L'élaboration de cette méthode est devenue possible grâce aux travaux des *I. Newton* et *G. W. Leibnitz* dans le domaine du calcul différentiel. Quelques années plus tard, la résolution des problèmes d'optimisations *avec contraintes* est devenue possible grâce aux contributions de *J. L. Lagrange* qui a proposé la transformation de la fonction mathématique à minimiser par l'introduction d'un autre terme multiplié par un nombre inconnu qui porte son nom « *multiplicateur de Lagrange* » [87,88]. Le développement des calculateurs au XX^{ème} siècle a conduit à de progrès spectaculaires dans le domaine de l'optimisation par le développement de plusieurs méthodes numériques accompagnées d'une littérature massive sur ces techniques [89].

La plus part des programmes de résolution du problème d'optimisation (III.01) sont formés de deux blocs logiquement bien distincts (chapeautés par un bloc-pilote) [90]. L'algorithme d'optimisation qui représente le corps du programme est une suite d'itérations, se déroulant toujours selon le schéma général suivant :

- **Etape 1** (Initialisation) : Une estimation $x_{est} = (n_{est}, u_{est}, d_{est})$ de la solution du problème est donnée.
- **Etape 2** (Corps de l'algorithme d'optimisation) : Connaissant les valeurs en x_{est} de Y_{cal} et éventuellement de leurs gradients, on modifie l'estimation courante x_{est} .
- **Etape 3** (Test d'arrêt et itération) : Si l'estimation x_{est} est jugée suffisamment proche d'un point stationnaire, on stoppe l'algorithme ; sinon, on ré-exécute l'étape 2.

Calculer Y_{cal} et éventuellement son gradient Y_{cal}' à l'étape 2, c'est simuler le comportement du séparateur lorsque ces paramètres sont ajustés à x_{est} . La façon dont x_{est} est ensuite modifiée caractérise l'algorithme d'optimisation considéré.

Pour obtenir l'estimation suivante, certains algorithmes doivent parfois effectuer toute une série d'opérations, y compris faire exécuter le bloc simulation plusieurs fois au cours d'une seule itération, pour différentes valeurs de x .

Durant le déroulement de l'algorithme, un dialogue permanent s'établit donc entre les deux blocs, lesquels ont pu être écrits lors de deux phases différentes, la phase de modélisation pour le bloc simulation et la phase d'optimisation pour le bloc Algorithme d'optimisation. De plus, le tout sera piloté par un « programme principal » d'initialisation (lecture des données, etc.) et de finalisation (exploitation des résultats). La structure générale d'un programme d'optimisation est présentée sur la figure III.01.

Rappelons que dans ce chapitre nous nous intéressons à l'élaboration d'un algorithme d'optimisation susceptible d'être inséré dans une procédure générale incluant les modèles élaborés dans le chapitre précédent. Ce type de modèle est considéré comme une boîte noire associant à chaque valeur de x_{est} une seule valeur de Y_{cal} .

Dans la littérature, on trouve généralement plusieurs méthodes d'optimisations qui peuvent être regroupées en deux grandes catégories appelées méthodes déterministes et non déterministes [91].

Les méthodes déterministes : qualifiées de classiques (telles la méthode du gradient ; gradient conjugué ; Newton ;...), elles n'utilisent aucun concept stochastique. Une méthode déterministe utilise donc toujours le même cheminement pour arriver à la solution optimal. Elles requièrent des hypothèses sur la fonction objective à optimiser, telles que continuité et dérivabilité de la fonction a optimisé en tout point du domaine des solutions. Elles consistent généralement à se focaliser sur un point unique de l'espace de recherche en le déplaçant au cours des itérations dans le but de trouver un extremum. Ces méthodes sont généralement efficaces lorsque l'évaluation de la fonction est très rapide ou lorsque sa forme est connue *à priori*.

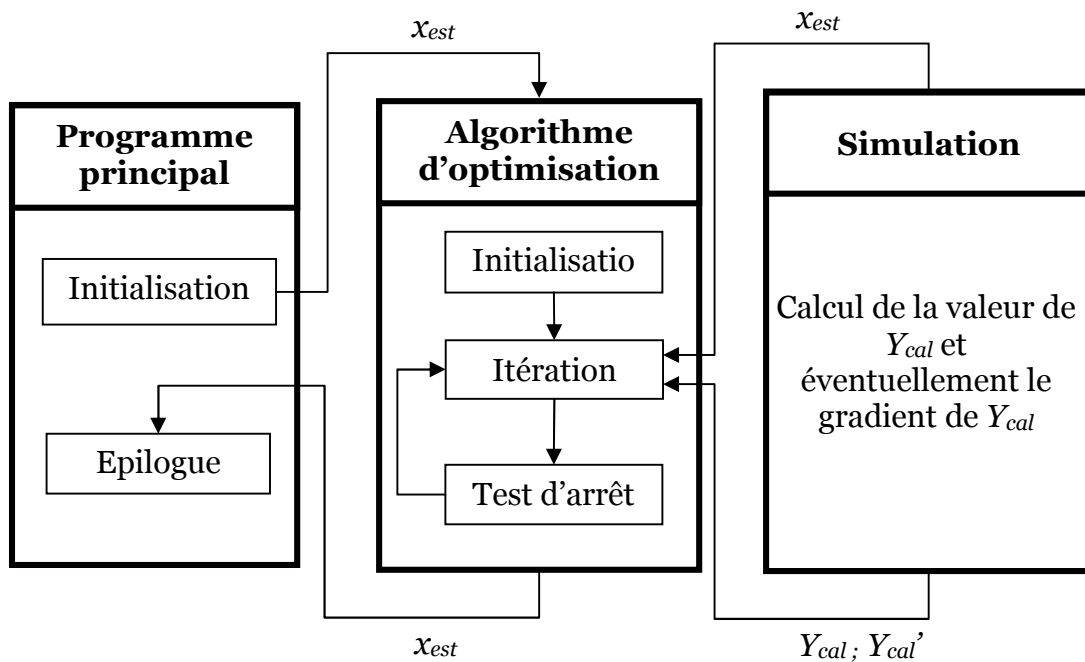


Figure III.1 : Structure générale d'un programme d'optimisation. [90]

Dans la famille des méthodes non déterministes, qualifiées de stochastiques, on parle couramment d'*heuristique* et de *métaheuristiques* [92].

Une *méthode heuristique* est une méthode d'optimisation adaptée à un problème particulier. Ces diverses méthodes travaillent toujours à partir d'une solution initiale en essayant de l'améliorer au maximum en fonction des contraintes du problème étudié (ex : Recherche Tabou). Ainsi, elles ont toutes un point commun : à savoir leurs itérations reposent sur l'amélioration d'une solution unique. Leurs

évolutions vers une solution optimale se fait en testant successivement une solution voisine de la solution courante.

Une *méthode métaheuristique* consiste en une stratégie de choix pouvant piloter une ou plusieurs heuristiques de manière abstraite. Les méthodes métaheuristiques sont ainsi des méthodes à population de solutions (ex : Algorithmes Génétique). Ces méthodes sont aussi considérées comme des méthodes d'*optimisation globale* : elles visent la détermination de l'optimum global de la fonction objectif du problème, en évitant le "piégeage" dans l'un de ses optima locaux.

III.2 Méthodes du gradient

A partir d'une solution initiale, une méthode d'optimisation déterministe utilise toujours le même cheminement pour arriver à la solution optimale du problème; nous pouvons donc déterminer à l'avance les étapes de la recherche. Ces méthodes exigent généralement des conditions sur la fonction objective à optimiser, telles que la continuité et la dérivabilité de la fonction en tout point du domaine de recherche [83,84].

La méthode du *gradient* représente la méthode de base pour toutes les méthodes d'optimisations déterministes. C'est une méthode itérative qui utilise le gradient de la fonction à optimiser « $-\nabla f(x_k)$ » comme une direction de recherche la plus évidente. Il faut noter que, dans chaque itération le gradient de la fonction à optimiser change de valeur. Sa valeur tend vers zéro pendant que le processus de l'optimisation tend vers le minimum de la fonction à optimiser.

Une fois la direction de recherche déterminée, le problème d'optimisation multidimensionnelle peut être traité comme un problème d'optimisation unidimensionnelle [87] :

$$\min_{\alpha > 0} [f(x_k - \alpha_k \nabla f(x_k))] \quad (\text{III.2})$$

Dans ce cas le paramètre qui représente la distance de déplacement α_k suivant la direction de recherche $-\nabla f(x_k)$ doit être déterminé. Ce type de problème peut être résolu analytiquement ou par une méthode d'optimisation unidimensionnelle.

Une fois la direction de recherche et la distance de déplacement trouvées, les coordonnées d'une nouvelle solution peuvent être déterminées par la relation (III.3) [87]. Ce processus est répété jusqu'à ce que les conditions d'arrêts soient satisfaites.

$$x_{k+1} = x_k - \alpha_k \nabla f(x_k) \quad (\text{III.3})$$

En pratique le processus itératif est arrêté lorsque la norme du $\nabla f(x_k)$ tend vers une valeur nulle. L'algorithme de cette méthode utilise très peu de paramètres à savoir : la première conjecture de la solution optimale x_o , la première conjecture de la distance optimale α_0 et une constante positive ξ qui représente la valeur admissible de $\nabla f(x_k)$ [89].

Pour voir l'influence de ces paramètres sur les résultats numériques obtenus nous avons fait une série d'applications numériques. Dans l'ensemble de ces applications nous avons utilisé le modèle polynomial de la récupération du produit non conducteur pour déterminer la combinaison optimale entre la vitesse de rotation du tambour et la valeur de la haute tension qui maximise le critère de performance.

Dans la première application, le programme d'optimisation est exécuté à partir de deux points initiaux différents : $(n_o ; u_o) = (70 \text{ [tr/min] ; } 27 \text{ [kV]})$ et $(n_o ; u_o) = (90 \text{ [tr/min] ; } 27 \text{ [kV]})$. Dans les deux cas nous avons utilisé une valeur de $\xi \leq 10^{-3}$ sur la valeur de la récupération du produit non conducteur. Les résultats obtenus de cette application sont représentés sur la Table III.1 ; la Table III.2 et la figure III.3

Table III.1 : Itérations effectuées par l'algorithme du gradient projeté $(n_o ; u_o) = (70 \text{ [tr/min] ; } 27 \text{ [kV]})$

N° iter	n [tr/min]	u [kV]	Y _{cal} [%]
0	70,00	27,000	89,70
1	70,63	28,361	91,39
2	74,50	27,978	91,63
⋮	⋮	⋮	⋮
11	74,29	28,143	91,68
12	74,29	28,144	91,68

Table III.2 : Itérations effectuées par l'algorithme du gradient projeté $(n_o ; u_o) = (90 \text{ [tr/min] ; } 27 \text{ [kV]})$

N° iter	n [tr/min]	u [kV]	Y _{cal} [%]
0	90,00	27,000	85,55
1	72,79	28,919	90,60
2	76,29	27,874	91,48
⋮	⋮	⋮	⋮
12	74,29	28,144	91,68
13	74,29	28,144	91,68

Les résultats obtenus montrent que le choix d'un critère d'arrêt défini par « $\xi \leq 10^{-3}$ » donne des résultats avec une grande précision : 2 chiffres significatives après la virgule sur la valeur de la vitesse de rotation du tambour et 3 chiffres sur la valeur de la haute tension appliquer à l'électrode couronne. La figure III.2 indique

clairement que la convergence de l'algorithme est obtenue en un nombre limité d'itérations et n'est pas sensible à l'initialisation du programme.

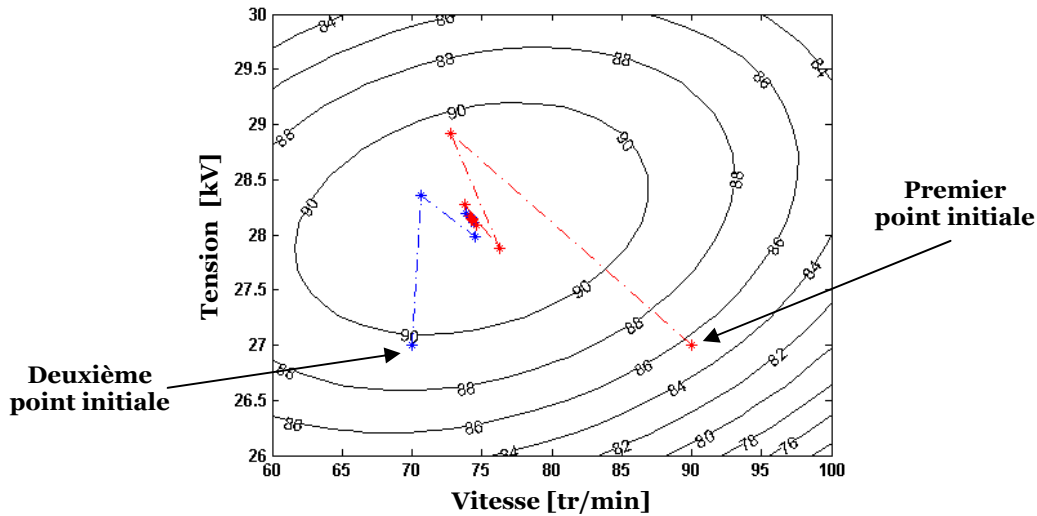
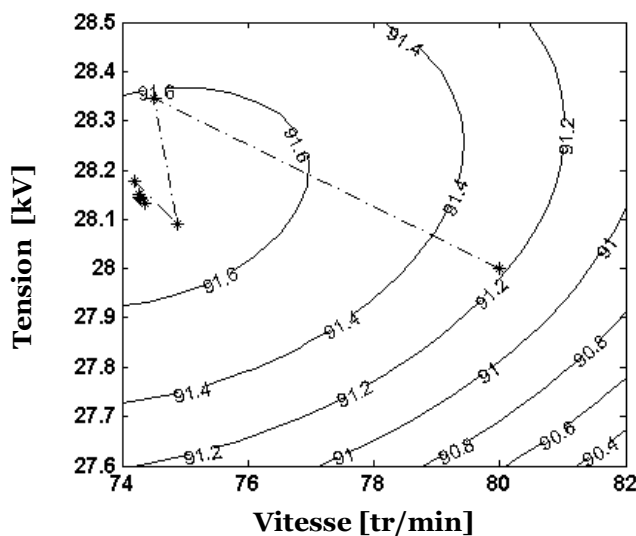


Figure.III.2: Séquences de solutions générées par la méthode du gradient à partir de deux solutions initiales différentes. Application sur la maximisation de la récupération du produit non conducteur

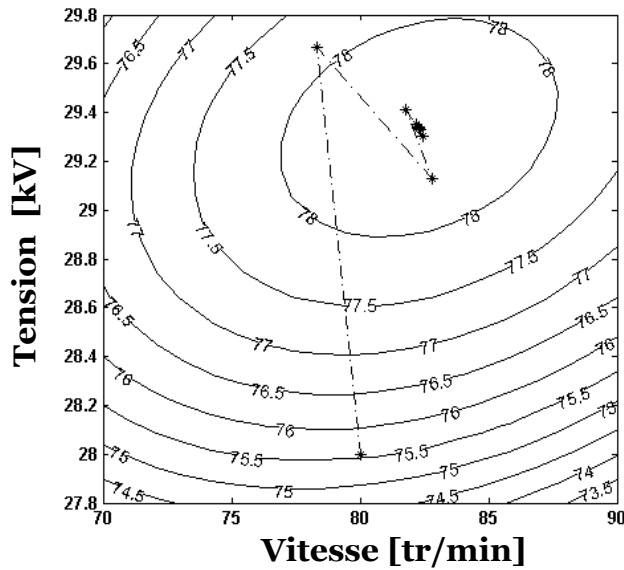
Un deuxième test est effectué pour différentes valeurs du débit du mélange introduit dans le séparateur électrostatique. La position et la valeur du point optimal dans l'espace de recherche se trouvent modifiées par cette variation de la valeur du débit.

Pour calculer le point optimal nous avons choisi une solution initiale ($n_0 ; u_0$) = (80[tr/min] ; 28 [kV]) qui représente le centre de l'espace de recherche. Le résultat de cette application est représenté sur les figures III.3 et III.4.



$d = 6$ [kg/min]			
N° iter	n [tr/min]	u [kV]	rec_{pnc} [%]
0	80	28	91,22
1	74,5	28,346	91,61
2	74,871	28,091	91,67
⋮	⋮	⋮	⋮
12	74,26	28,15	91,68

Figure.III.3: Optimisation du pourcentage de la récupération du produit non conducteur par la méthode du gradient ($d= 6$ [kg/min]).



$d = 9$ [kg/min]			
N° iter	n [tr/min]	u [kV]	rec_{pnc} [%]
0	80	28	75,57
1	78,32	29,67	77,86
2	82,79	29,13	78,23
⋮	⋮	⋮	⋮
13	82,30	29,33	78,31

Figure.III.4: Optimisation du pourcentage de la récupération du produit non conducteur par la méthode du gradient ($d= 9$ [kg/min]).

Dans les figures III.2- III.4 on remarque que la convergence se fait suivant une ligne en zigzag. Dans ce cas le parcours vers le maximum de la fonction à optimiser sera plus long et la vitesse de convergence plus lente. Pour augmenter la performance du programme, il faut choisir la valeur convenable de la première conjecture de la distance de déplacement α_0 . Pour voir l'influence de cette valeur sur le comportement de l'algorithme d'optimisation nous avons fait plusieurs applications avec différentes valeurs de α_0 . Les résultats obtenus sont présentés sur la figure III.5.

Cette figure nous montre que le choix d'une grande valeur de α_0 conduit à des solutions x_{k+1} au-delà des solutions x_k . Cela engendre la convergence vers la solution optimale suivant une ligne en zigzag. Inversement, le choix d'une faible valeur de α_0 produit des solutions x_{k+1} au voisinage de la solution x_k entraînant une convergence plus lente. Entre ces deux valeurs, il existe une valeur optimale de « α_0 » qui permet la minimisation du nombre d'itérations effectuées et donc du temps de calcul.

Lorsque le minimum de la fonction à optimiser se trouve à l'extérieur de la zone d'étude, la méthode d'optimisation peut générer une séquence de solutions non faisables. Dans ce cas il est nécessaire d'utiliser un module capable de gérer les violations des contraintes. Dans notre cas ce type de contraintes est représenté par des limites sur chaque paramètre. Aussi la gestion de la violation de ce type de

contraintes consiste-t-elle à calculer des projections orthogonales des solutions non faisables générées au cours des itérations sur les limites du domaine de recherche.

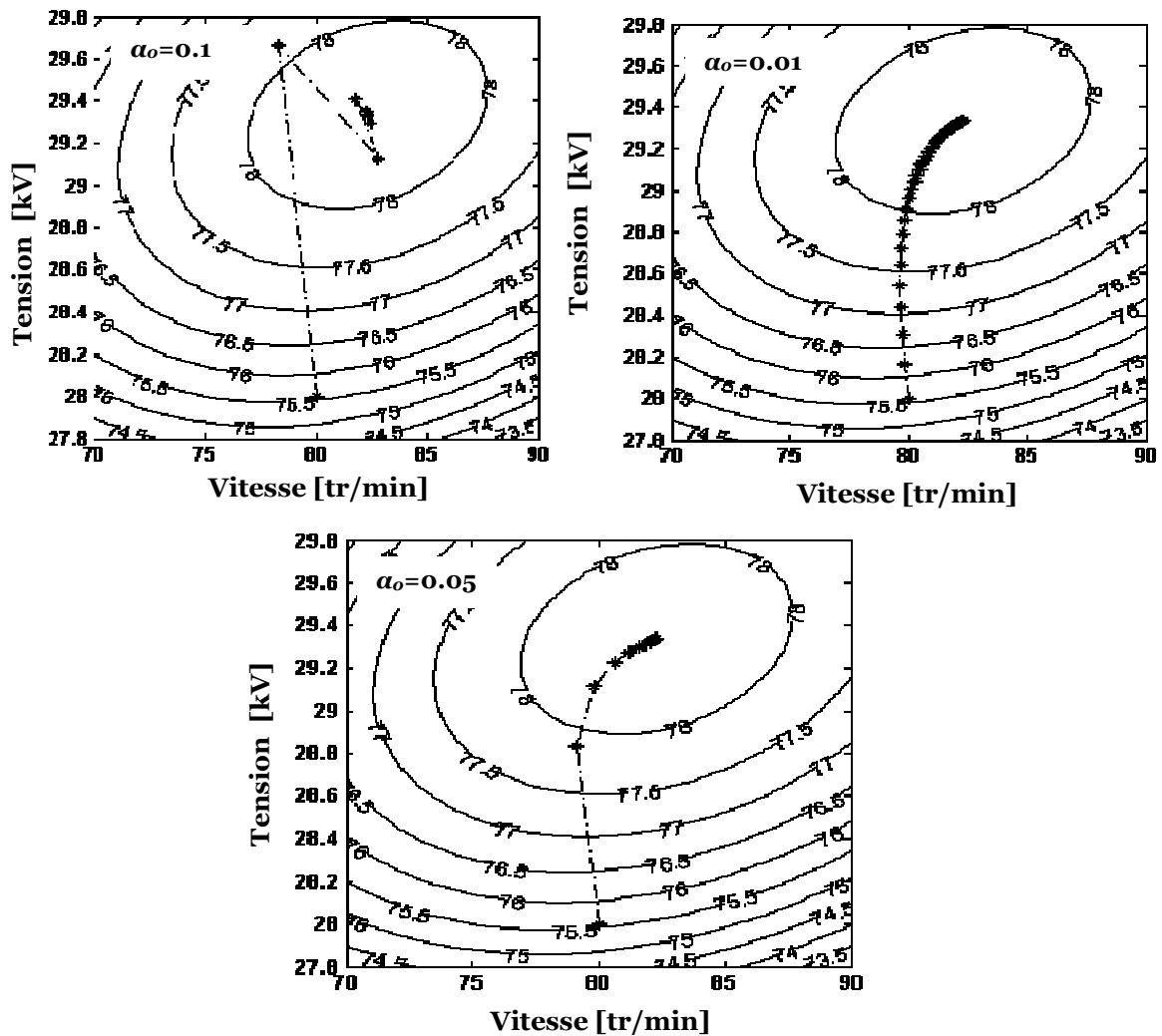


Figure.III.5 : l'influence de la valeur de la première conjecture de la distance de déplacement α_0 sur la convergence de la méthode du gradient

Cette gestion peut être interprétée mathématiquement par la procédure suivante [86, 93,94] :

$$x_t^i = \begin{cases} l_{\text{inf}}^i & \text{si } x_c^i < l_{\text{inf}}^i \\ x_c^i & \text{si } x_c^i \in [l_{\text{inf}}^i, l_{\text{sup}}^i] \\ l_{\text{sup}}^i & \text{si } x_c^i > l_{\text{sup}}^i \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

où x_c^i et x_t^i sont les valeurs du facteur i avant et après la projection.

Dans l'ensemble des calculs effectués auparavant nous avons exploité la forme analytique du gradient pour déterminer la direction de recherche. En pratique, les

méthodes basées sur cette technique exploitent l'information sur la première et parfois la deuxième dérivée de la fonction à optimiser [95,96]. Dans le cas d'un modèle non linéaire, il est difficile d'obtenir cette information avec des méthodes analytiques. Nous faisons généralement recours à des méthodes numériques pour obtenir la valeur du gradient dans chaque itération [87,89,97]. Cette solution engendre un nombre supplémentaire d'opérations d'évaluations.

Pour éviter ce problème on peut exploiter des méthodes qui n'utilisent que l'information sur la valeur de la fonction à optimiser. La méthode du simplexe de *Nelder & Mead* est l'une des méthodes les plus connues dans ce domaine.

III.3 Méthode de Nelder & Mead « NM »

La méthode de *NM* connue sous le nom de la méthode du simplexe est une méthode d'optimisation utilisée généralement dans la résolution des problèmes non linéaires. Cette méthode a été proposée pour la première fois par *J. A. Nelder* et *R. Mead* [99] comme méthode d'optimisation dédiée à la résolution des problèmes multidimensionnels.

Le principe de cette méthode consiste à faire déplacer un *simplexe* dans l'espace de recherche jusqu'à ce que les *sommets* du simplexe entourent le point optimal. A ce moment le simplexe est rétréci autour du point optimal jusqu'à ce que sa taille atteigne la tolérance spécifiée initialement. Au cours de la recherche, la méthode de *NM* exige l'évaluation de la fonction objective dans les sommets générés à chaque itération.

Dans un espace de recherche à deux dimensions un simplexe est représenté par un triangle. Le processus d'optimisation compare les valeurs de la fonction objective dans les trois sommets du triangle. Le mauvais sommet est remplacé par un nouveau sommet, un nouveau triangle est ainsi formé et le processus continue [100,101]. Les opérations de base et l'organigramme de la méthode sont présentés dans l'annexe A.II.1. Les simplexes générés par cette méthode sur l'optimisation du modèle non linéaire de récupération du produit non conducteur sont représentés sur la figure III.6. Dans cette figure on remarque que la méthode de *NM* converge vers une seule solution. La valeur de cette solution dépend fortement de la solution initiale fournie à l'algorithme de la méthode. Le choix d'une solution initiale différente peut conduire à une autre solution optimale telle que représentée sur la figure III.7.

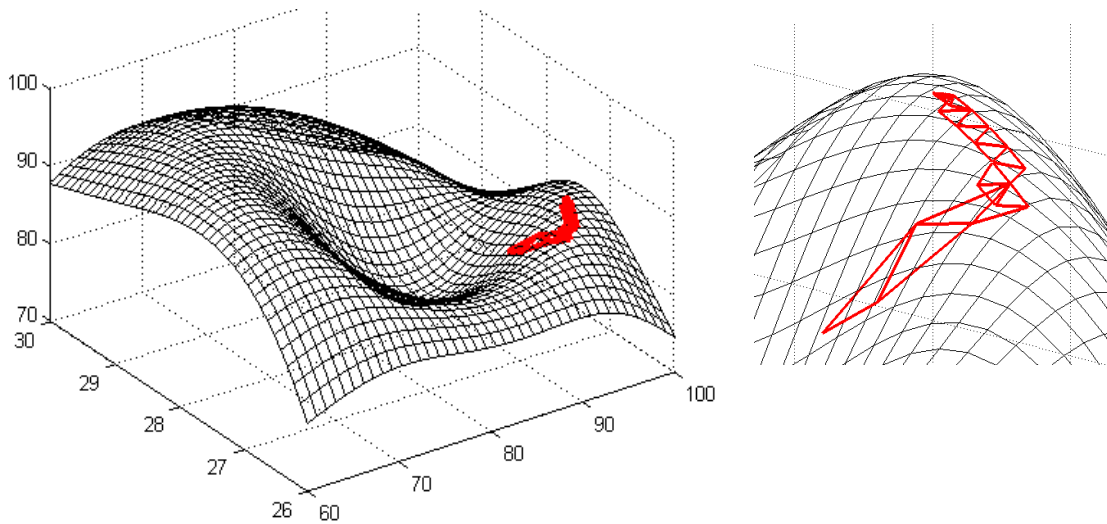


Figure III.6 : Surface de réponse de la récupération du produit non conducteur en fonction de u et n pour $d=6$ [kg/h] ; Simplexes générés par la méthode de NM à partir d'une solution initiale $(u, n) = (27.5$ [kV] 90 [tr/min])

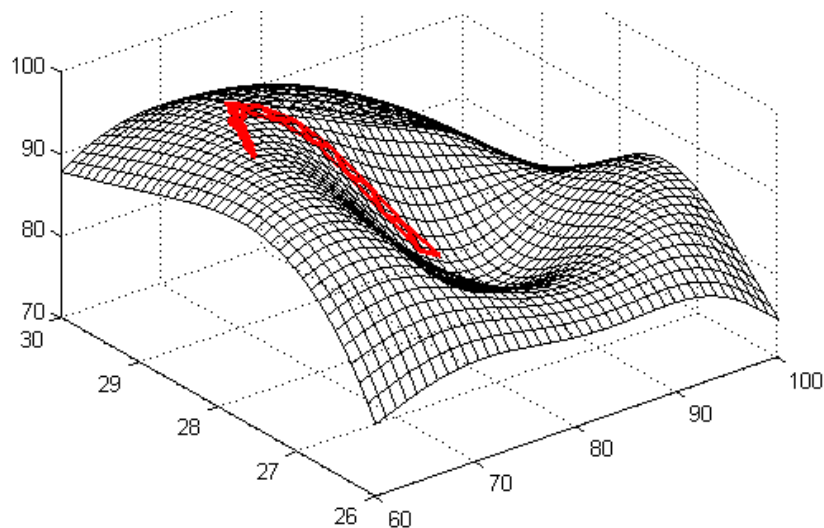


Figure III.7 : Evolution de la solution trouvée par la méthode de Nelder-Mead Les courbes de niveau représentent la rec_{pvc} en fonction de n et u pour une valeur fixe du débit $d=6$ [kg/h]

Donc, pour trouver la solution globale du problème, la méthode de *NM* nécessite d'être exécutée plusieurs fois avec différentes solutions initiales dans l'espoir de localiser plusieurs minimums locaux. Dans ce cas la meilleure solution peut être considérée comme étant la solution globale du problème.

Pour atteindre l'optimum global du problème on peut utiliser d'autres méthodes d'optimisations capables de converger simultanément vers plusieurs solutions locales pour, localiser une solution globale. Les algorithmes génétiques sont des algorithmes d'optimisations particulièrement bien adaptés à notre problématique.

III.4 Méthode des Algorithmes Génétiques

Le concept des algorithmes génétiques est directement dérivé du théorème de l'évolution naturelle. Ce théorème affirme qu'après plusieurs générations, les espèces biologiques évoluent selon le principe de la sélection naturelle pour exécuter certaines tâches remarquables. Actuellement, le principe de l'évolution naturelle est régulièrement utilisé dans la résolution de plusieurs problèmes d'optimisation. Cette idée a été présentée pour la première fois par *I. Rechenberg* [102] en 1966. Une décennie plus tard, *J. Holland* [103] a présenté le premier concept d'un algorithme génétique et *Jong* [104] a tiré profit des AG pour résoudre des problèmes d'optimisation. Depuis, les AG ont beaucoup évolué et l'immense majorité des applications concernent des problèmes d'optimisation.

Un AG fera évoluer un ensemble de solutions, appelé population, aléatoirement initialisées, dans le but de guider efficacement la détermination de bonnes solutions dans l'espace de recherche. Cette procédure est pilotée par trois opérateurs qui sont appliqués successivement pendant deux phases : la phase de coopération qui fait appel aux opérateurs de sélection et de croisement et la phase d'adaptation individuelle qui fait appel à l'opérateur de mutation pour générer de nouveaux gènes [105-107]. La figure III.8 présente l'organigramme d'un algorithme génétique standard. (*L'annexe A.II.3 fournit davantage de détails sur les opérateurs génétiques*)

Pendant la phase de coopération, les solutions sont comparées puis combinées entre elles pour produire de nouvelles solutions qui héritent des caractéristiques prédominantes contenues dans les solutions de la population courante. Les AG utilisent un codage des éléments de l'espace de recherche et non pas les éléments eux-mêmes. Dans cette étape l'algorithme associe à chacun des points de l'espace de recherche (*individu*) une structure de données, appelée *chromosome* [91].

Cette structure regroupe l'information liée à chaque individu. La figure III.9 montre la structure d'un individu utilisée dans l'optimisation de la récupération du produit non conducteur dans un séparateur à cylindre tournant. La première forme « *phénotype* » permet à l'algorithme d'établir l'interactivité avec la fonction à optimiser, tandis que la deuxième « *génotype* » est exploitée par des opérateurs génétiques pour effectuer la recherche d'une solution optimale.

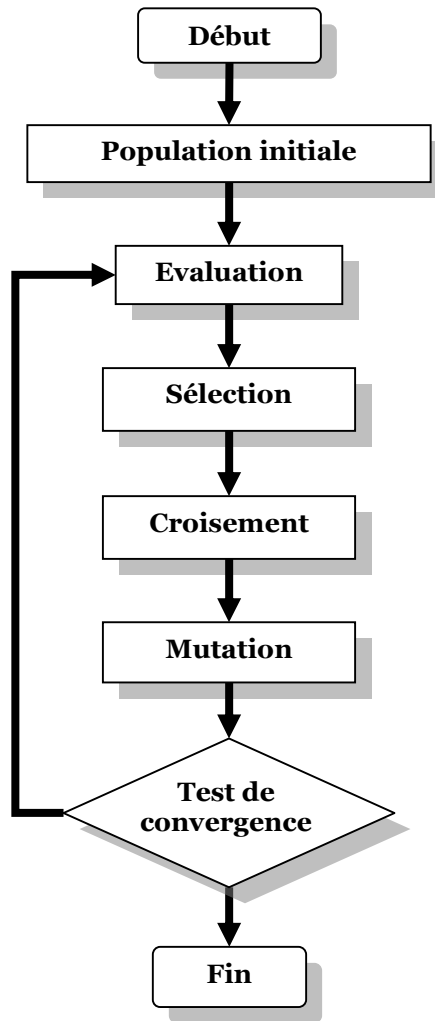


Figure.III.8 : Organigramme d'un algorithme génétique [100]

Phénotype		
<i>n</i> [tr/min]	<i>u</i> [kV]	<i>d</i> [kg/h]
↕	↕	↕
Gène 01	Gène 02	Gène 03
Génotype (chromosome)		

Figure.III.9 : Représentation des deux formes d'un individu

La résolution d'un problème d'optimisation par algorithme génétique commence généralement par la création d'une population d'individus. La taille de cette population a une influence significative sur le comportement de l'algorithme génétique.

Une population suffisamment représentative conduit à une meilleure exploration de l'espace de recherche. L'augmentation du nombre d'individus de cette population est gourmande en mémoire utilisée et en temps de calculs. La convergence de l'algorithme vers une solution optimale est plus alors lente [91].

Le nombre d'individus est choisi par tâtonnement afin d'avoir un bon compromis entre temps de calcul et qualité de la solution. Pratiquement, une population d'environ 100 à 150 individus est fréquemment utilisée, mais ce nombre peut être changé selon la puissance de la machine de calcul disponible. [100,107]

La taille des individus dépend du nombre de facteurs de la fonction à optimiser et de la résolution adoptée pour chaque facteur [100]. Cette dernière qualité qualifie l'algorithme génétique en tant que méthode d'optimisation apte à résoudre des problèmes combinatoires. De plus elle permet de résoudre des problèmes d'optimisation avec contraintes définies par simples limites sur chaque facteur ; elle est donc particulièrement bien adaptée à notre problème.

L'ajustement des paramètres génétiques est un problème délicat. Dans la pratique, les performances de l'algorithme sont mesurées pour différentes combinaisons possibles entre les valeurs de chaque paramètre pour avoir finalement les optimaux de l'algorithme.

Pour déterminer la combinaison optimale entre les paramètres de l'algorithme, nous avons utilisé la méthode proposée par *Schaffer* [108]. Dans cette méthode, les paramètres de l'algorithme génétique sont discrétisés comme suit :

- la taille de la population $N_{pop} = 10, 20, 30, 50, 100,$
- la probabilité de croisement $P_c = 0.6, 0.65, 0.75, 0.80, 0.85, 0.90, 0.95 ;$
- Le taux d'individus remplacé par une nouvelle progéniture dans chaque génération $G = 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9,$
- La probabilité de mutation $P_m = 0.005, 0.01, 0.015, 0.02, 0.025, 0.030, 0.035, 0.04, 0.045, 0.05.$

La prise en compte de l'ensemble des paramètres conduit à un total de 1750 combinaisons possibles. Chaque combinaison est exécutée 100 fois L'exécution de l'algorithme à plusieurs reprises nous montre que celui-ci converge vers la même solution après quelques générations. Le chemin, vers cette solution n'est pas toujours

le même (figure III.10). Cela est dû à l'aspect stochastique de l'algorithme qui est très utile pour explorer l'espace de recherche et identifier l'optimum global du modèle. Mais qui représente en même temps le problème principal face à l'ajustement des paramètres de ce type d'algorithmes.

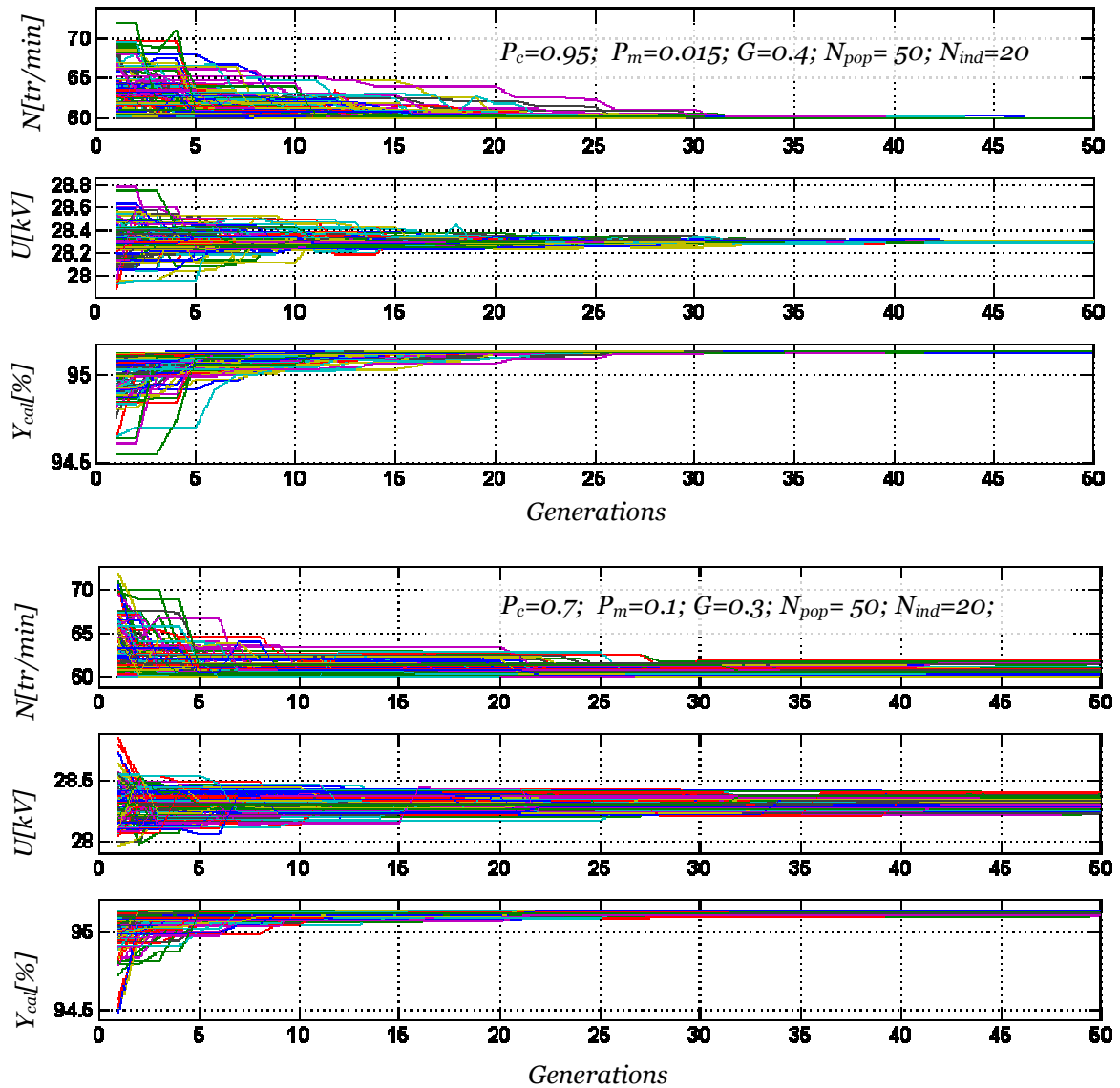


Figure.III.10 : Influence de la valeur des paramètres sur la convergence de l'algorithme génétique

La figure III.10 montre les résultats de deux combinaisons différentes. L'analyse de l'ensemble de ces résultats nous a permis d'obtenir une combinaison qui assure une convergence rapide de l'algorithme. La solution obtenue est représentée dans la table III.3.

Tableau. III.3 : Paramètres optimaux de l'algorithme génétique

Type de codage	Code Gray
Initialisation	Aléatoire
Stratégie de sélection	L'élitisme
Type de sélection	Proportionnel
Type de croisement	A un seul point
Taille de l'individu	$N_{\text{ind}} = 20$ bits
Taille de la population	$N_{\text{pop}} = 50$
Probabilité de croisement	$P_c = 0.95$
Probabilité de mutation	$P_m = 0.015$
Taux d'individus remplacé par une nouvelle progéniture dans chaque génération	$G = 0.4$

Le critère d'arrêt est un autre paramètre qui est ajusté en fonction des autres paramètres. Plusieurs critères d'arrêt sont possibles. Par exemple, on peut arrêter l'algorithme après un nombre de générations qui assure une exploration convenable de l'espace de recherche [100]. L'algorithme peut aussi être arrêté lorsque la population n'évolue plus suffisamment rapidement ou encore lorsque la fonction à optimiser dépasse un seuil fixé au départ.

Une fois le critère d'arrêt défini, notre algorithme d'optimisation sera prêt pour être exploité dans l'optimisation du modèle de la récupération du produit non conducteur dans un séparateur électrostatique.

Dans cette application nous avons exploité le modèle non linéaire à base de réseaux de neurones élaboré dans le deuxième chapitre. Pour optimiser ce modèle nous avons commencé par la génération d'une population initiale d'une façon aléatoire. Cette population est représentée par une matrice dont les éléments sont des nombres binaires.

L'évolution de l'ensemble de solutions initiales et l'information génétique associée à cette solution est représentée dans la figure III.11. Les points noirs dans cette figure indiquent la distribution des solutions initiales dans l'espace de recherche. A « la 30^{ème} génération » les individus de la population se concentrent autour de la meilleure solution représentée par le point bleu. Les individus de cette population occupent des positions adjacentes. Ils possèdent donc presque la même

information génétique ce qui se traduit par l'apparition d'une forme plus régulière dans la matrice de l'information génétique.

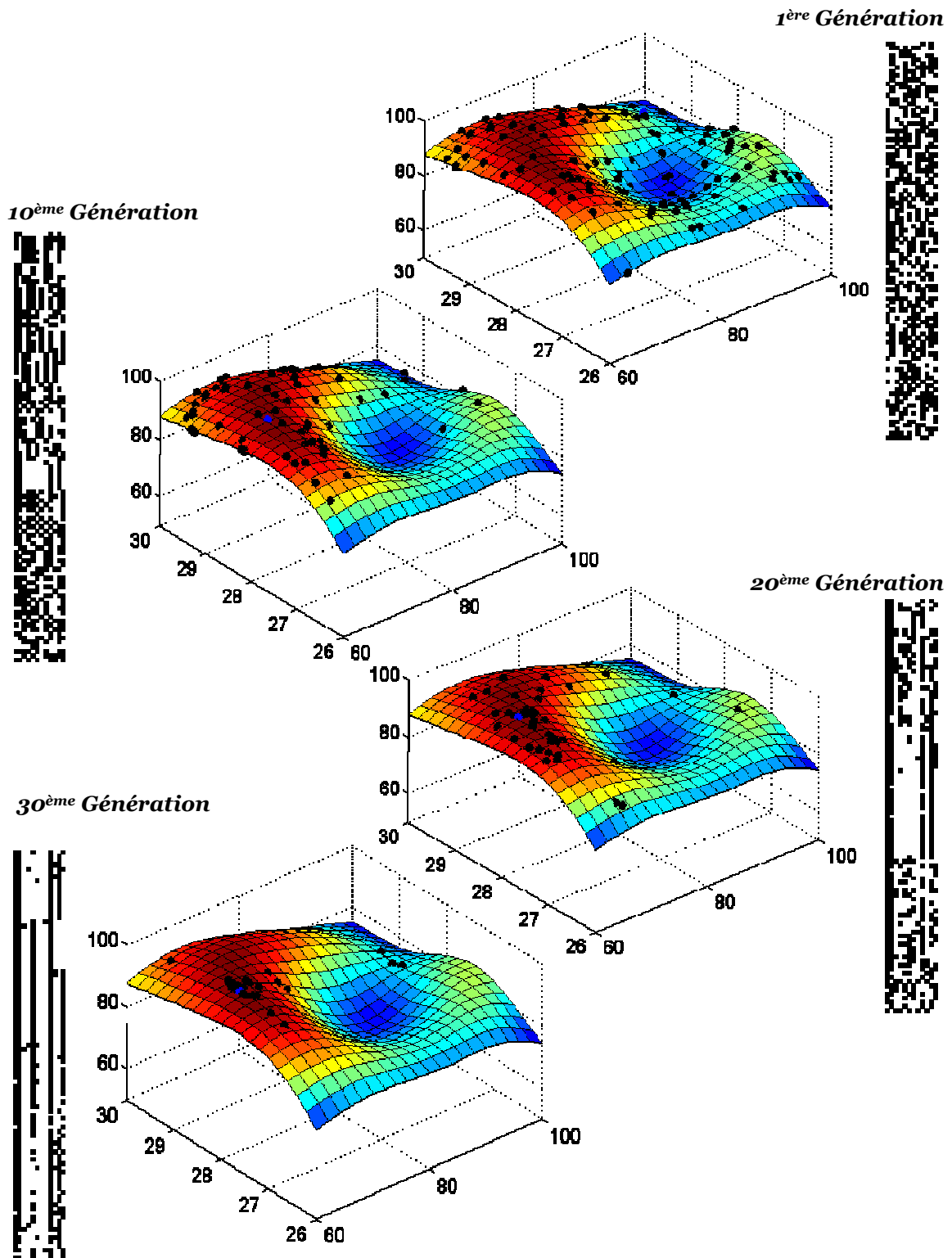


Figure III.11 : Evolution de l'information génétique de la population au cours des générations

III.5 Conclusion

L'utilisation d'une méthode déterministe permet la détermination d'une seule solution optimale. Cette solution peut être déterminée avec une grande précision qui est parfois inapplicable eu égard les contraintes qui existent sur la résolution du matériel utilisé dans la pratique.

A partir d'une estimation de la solution optimale, la méthode d'optimisation déterministe aboutit à une seule solution optimale qui peut être une solution locale. Donc, dans la plus part des cas la méthode peut rater l'optimum global. Pour éviter ce problème, l'algorithme de la méthode doit être exécuté plusieurs fois à partir de différentes solutions initiales. Dans chaque exécution la solution optimale est déterminée par l'exploitation de la valeur de la fonction objective et de la première dérivée de cette fonction dans différents point de l'espace de recherche. Cette méthode est donc moins bien adapté à l'optimisation des modèles type boîte noire.

Pour pallier ces inconvénients, nous avons été amenés à utiliser la méthode des algorithmes génétiques qui plus adaptée à notre problème. Elle peut générer des solutions faisables sans passer par un test de faisabilité et un processus de projection. Après un certain nombre de générations la méthode donne une approximation satisfaisante de la solution globale.

Chapitre IV : Stratégies de contrôle - commandes d'un séparateur électrostatique

Nos travaux s'inscrivent dans le cadre de l'amélioration des processus de séparation électrostatique utilisés dans le traitement des DEEE. Dans cette étude, nous visons l'amélioration de la qualité du produit non conducteur récupéré à la sortie d'un séparateur électrostatique à cylindre tournant.

Ce chapitre est consacré à l'utilisation d'une méthode d'optimisation capable d'exploiter le modèle du séparateur électrostatique pour générer des consignes de réglage permettant d'atteindre la meilleure efficacité de séparation en régime de fonctionnement continu.

Nous envisageons dans le futur l'exploitation de cette méthode dans le pilotage d'une installation réelle exposée à des perturbations non contrôlables. Mais avant de passer à la concrétisation de la méthode sur une installation réelle nous allons procéder à une simulation sur un modèle du séparateur à cylindre tournant.

IV.1 Systèmes élémentaires d'un séparateur à cylindre tournant

Le séparateur électrostatique est une installation qui peut être divisée en plusieurs sous-systèmes indépendants. Chaque système élémentaire peut être ajusté d'une façon indépendante par rapport aux autres sous-systèmes. La plupart des systèmes élémentaires peuvent être considérés comme des systèmes à une seule entrée et une seule sortie. Dans cette étude nous avons pris en considération la présence de trois sous-systèmes :

Le premier sous-système est représenté par le vibrotransporteur. Cette structure est considérée en tant que processus électromécanique qui assure la continuité de l'alimentation du processus de séparation en produit granulaire à traiter. Sous l'effet d'une vibration suffisamment forte du plateau, le produit granulaire peut décoller de la surface de ce dernier. Temporairement, les granules du matériau transportés sont en chute libre puisqu'elles quittent instantanément le plateau. Pendant cette séquence, il n'y a plus de frottement entre le plateau et le produit granulaire qui se trouve en suspension.

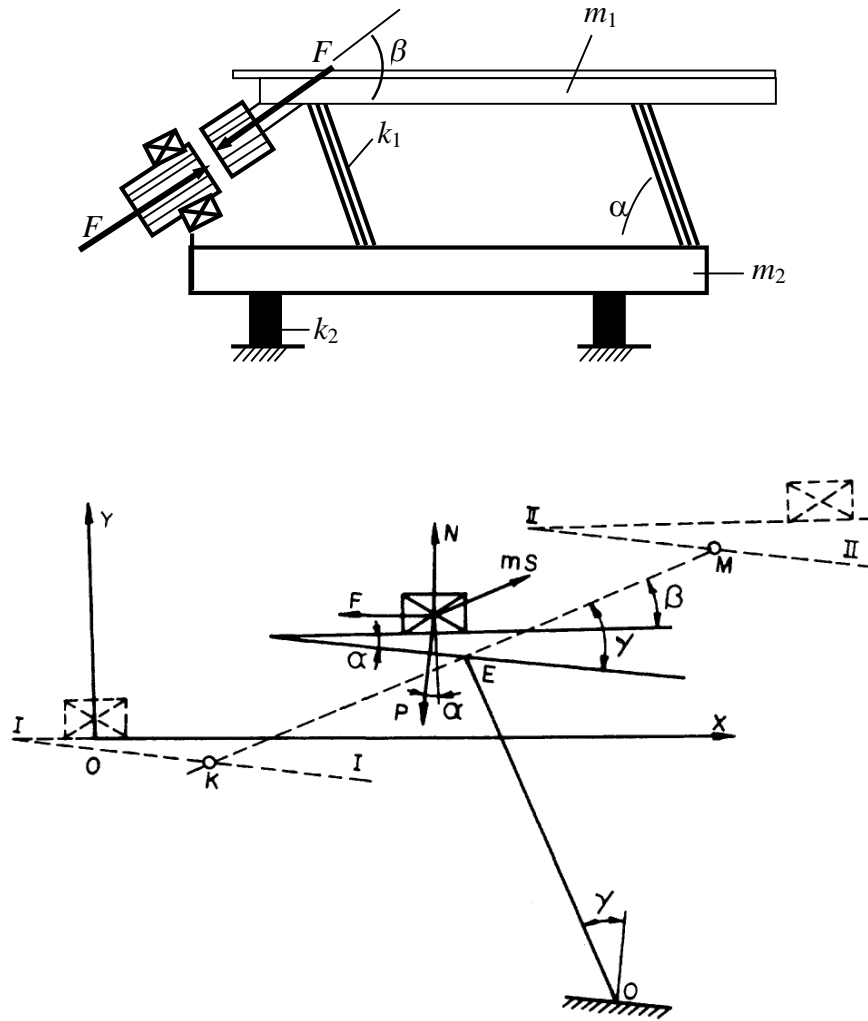


Figure IV.1: Schéma illustratif décrivant le principe de fonctionnement du vibrotransporteur

Dans la deuxième séquence le plateau est accéléré vers le sens inverse. En contact avec le plateau le produit se déplace dans le même sens de ce dernier. Les deux séquences permettent aux particules du mélange de se déplacer horizontalement d'une façon cyclique. Dans ce type de processus le déplacement ainsi que le débit du produit transporté peut être contrôlé par la fréquence et/ou l'amplitude de l'alimentation de l'électroaimant.

Le deuxième sous-système est représenté par le cylindre tournant et son moteur d'entraînement. Cette structure est considérée elle aussi comme étant un dispositif électromécanique dont le rôle consiste à introduire le mélange à séparer dans les zones de décharge couronne. Ce sous-système, schématisé sur la figure IV.2., peut être modélisé par deux masses tournantes couplées mécaniquement. La première

masse représente le rotor du moteur d'entraînement et la deuxième représente le cylindre tournant du séparateur électrostatique.

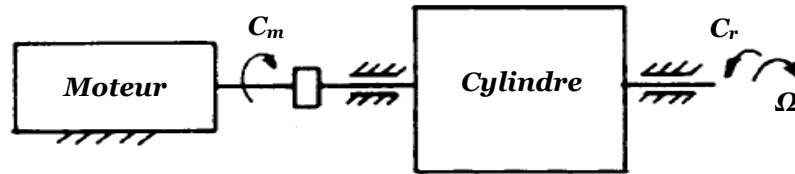


Figure IV.2 : Schéma descriptif du système d'entraînement des particules dans un séparateur à cylindre tournant.

Dans une installation réelle, la structure représentée par le moteur d'entraînement et le cylindre peut être commandée électriquement en fonction de la vitesse de rotation du cylindre qui représente l'un des facteurs d'intérêt dans notre étude. La boucle de commande conventionnelle pour ce type de structure est représentée sur la figure IV.3.

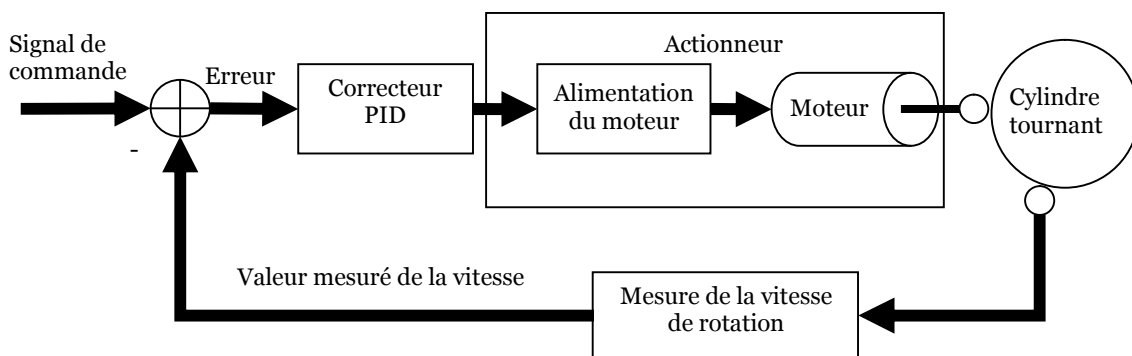


Figure IV.3 : Schéma fonctionnel de la boucle d'asservissement de la vitesse de rotation du cylindre tournant

Dans le cas d'un moteur asynchrone il est recommandé d'utiliser un variateur de fréquence qui intègre dans le même boîtier : l'alimentation du moteur ; le correcteur PID et une interface de communication avec d'autres contrôleurs.

Actuellement il existe dans le commerce des variateurs de fréquences conçus pour fournir plusieurs informations sur le système à réguler telles que : la tension ; le courant ; la fréquence du système à réguler. Ce type de variateur peut traiter les données des capteurs de vitesse pour fournir la valeur mesurée de la vitesse de rotation du système à réguler. La figure IV.4 montre un modèle commercial de ce type de variateur de fréquence.



Figure IV.4: Variateur de fréquence (Siemens model Sinamics V20)

Le troisième sous-système élémentaire de l'installation est représenté par la source haute tension et le système d'électrodes. Ce système constitue une structure purement électrique dont le rôle consiste à générer une décharge couronne destinée au chargement des particules d'un mélange granulaire. Cette décharge est générée entre une électrode à faible rayon de courbure et le cylindre tournant relié à la terre. Dans une installation de laboratoire, l'électrode couronne est alimentée par une source haute tension *DC*.

Actuellement, il existe une gamme très vaste de sources hautes tensions commercialisées sous forme d'un boîtier qui intègre : des protections contre l'arc électrique, des systèmes de régulation dont la précision peut atteindre les 0.005% de la valeur de la haute tension désirée, une interface homme-machine pour l'ajustement manuel des paramètres de la source, des micro-contrôleurs et des liaisons type RS232 ; USB ; Ethernet pour dialoguer avec d'autres contrôleurs. La figure IV.5 montre un modèle commercial de ce type de sources.



Figure IV.5 : Source haute tension DC (Glassman modèle Fj)

IV.2 Modèles utilisés dans la simulation

Le contrôle du fonctionnement du séparateur électrostatique est numériquement simulé par le modèle non linéaire de la récupération du produit non conducteur élaboré dans le deuxième chapitre. Ce modèle prédit la valeur de la récupération du produit non conducteur en fonction de la vitesse de rotation du cylindre électrode, de la valeur de la haute tension appliquée à l'électrode couronne, et du débit du produit à séparer.

En pratique, la variation de l'un des facteurs cités précédemment se fait d'une façon continue ; par exemple pour passer d'une vitesse de 60 [tr/min] à une vitesse de 80 [tr/min] le sous-système représenté par le moteur d'entraînement et le cylindre tournant doit passer par des valeurs intermédiaires.

Donc pour simuler le comportement réel du séparateur électrostatique nous devons prendre en considération la dynamique de chaque système élémentaire. Dans l'installation réelle la stabilisation de la réponse de chaque système élémentaire à une valeur cible, exige un temps non négligeable (ordre de grandeur pour chaque système élémentaire ou limite supérieure la plus grande en écrivant par exemple pouvant atteindre xx ms ou s). Dans notre application, la valeur cible est imposée au système élémentaire par un algorithme d'optimisation qui exploite le modèle stationnaire de l'installation. Cette valeur (*valeur optimale*) est appliquée à l'entrée des sous-systèmes élémentaires sous forme d'un signal échelon.

En pratique, la réponse des sous-systèmes élémentaires de l'installation à un signal d'excitation sous forme échelon ne présente pas d'oscillations autour de la valeur finale. Ce comportement peut être modélisé par l'équation (IV.1). L'évolution de la réponse du modèle en fonction du temps est représentée sur la figure IV.6.

$$y(t) = M(1 - e^{-t/\tau}) \quad (\text{IV.1})$$

où τ représente la constante de temps, temps nécessaire pour que la réponse du système atteigne 63% de la valeur cible.

Chaque sous système peut être caractérisé par sa constante de temps. Cette valeur peut être déterminée expérimentalement en mesurant l'évolution de la réponse d'un système réel à une excitation échelon. Dans notre étude cette valeur est considérée comme un autre paramètre de simulation destiné à examiner le comportement du système dans plusieurs régimes de fonctionnement.

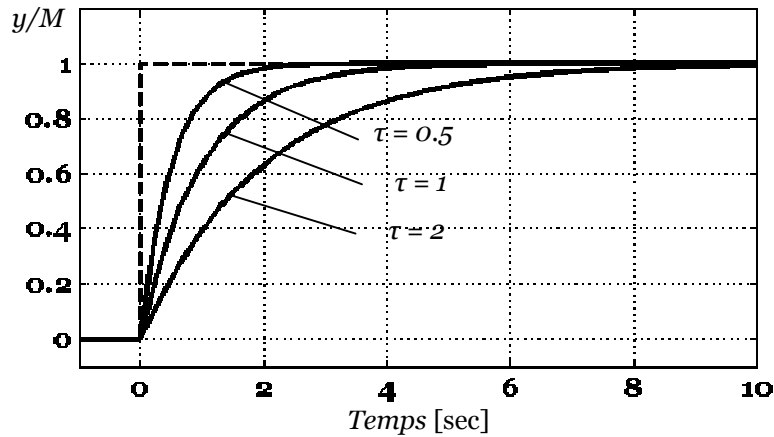


Figure IV.6 : Réponse temporelle d'un système de premier ordre excité par un signal échelon.

Nous pouvons conclure que le modèle utilisé dans cette simulation inclut dans sa structure le modèle expérimental de la récupération du produit non conducteur. Ce modèle est utilisé pour simuler la qualité d'une séparation en régime stationnaire en fonction de trois facteurs : la vitesse de rotation du cylindre électrode; la valeur de la haute tension appliquée à l'électrode couronne et le débit de matière à séparer.

Pour construire notre modèle de simulation, nous avons supposé que la réponse temporelle de la qualité de séparation est instantanée par rapport à une variation au niveau de l'un des facteurs. Aussi le comportement dynamique du séparateur est lié uniquement au comportement dynamique des facteurs de l'installation.

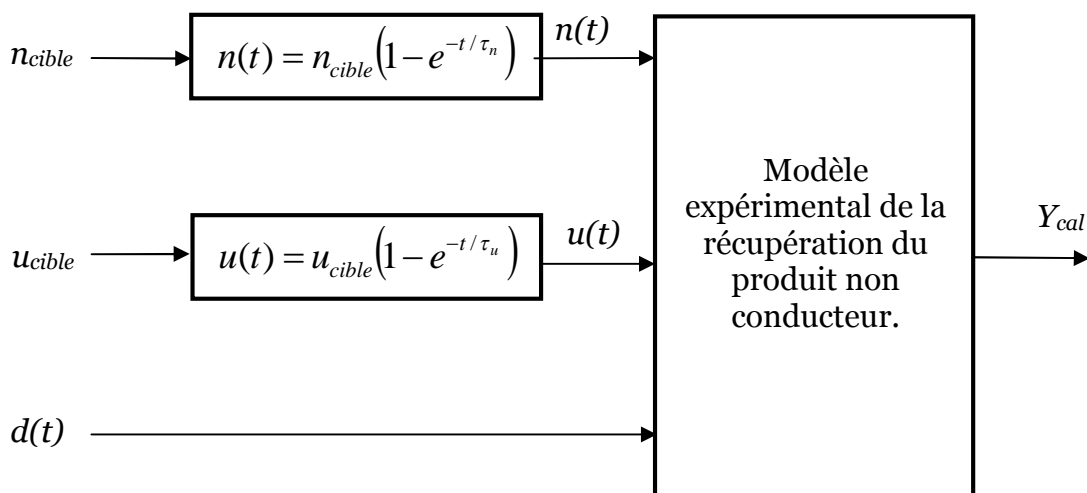


Figure IV.7 : Schéma-bloc du modèle de séparateur électrostatique utilisé dans la simulation.

Chaque sous-système contrôlable de l'installation est simulé par un modèle dynamique du premier ordre à une seule entrée et une seule sortie. Chaque modèle est paramétré par un temps de réponse « τ » lié à la réponse temporelle du système modélisé. L'entrée et la sortie d'un modèle dynamique sont représentées respectivement par la valeur optimale imposée par un contrôleur et par la réponse temporelle du modèle à cette valeur. Les facteurs incontrôlables et les sorties des modèles dynamiques sont injectés à l'entrée du modèle stationnaire. La figure IV.7 montre le schéma du modèle utilisé dans la simulation de la récupération du produit non conducteur. Changer ci-dessous l'indice *dési* par *cible*

Pour étudier l'influence de la constante de temps de chaque sous-système nous avons fait une simulation qui représente le passage de l'installation d'un point de fonctionnement vers un autre. Dans cette simulation nous avons choisi deux points de fonctionnement différents situés à deux extrémités de l'espace de recherche (figure IV.8). Le premier point (*point de départ*) est représenté par les coordonnées P_d : ($n=100$ tr/min ; $u = 26$ kV) le deuxième point (*point final*) est représenté par les coordonnées P_f : ($n=60$ tr/min ; $u = 30$ kV) ;

Le passage du point P_d vers le point P_f peut être effectué par une procédure d'ajustement manuelle ou automatique. La procédure manuelle consiste à modifier le niveau d'un facteur à la fois. Donc pour passer de $P_d \rightarrow P_f$ on doit appliquer l'une des séquences suivantes :

1^{ère} séquence :

P_d ($n=100$ [tr/min] ; $u = 26$ [kV])

→ P_{s1} ($n=60$ [tr/min] ; $u = 26$ [kV])

→ P_f ($n=60$ [tr/min] ; $u = 30$ [kV])

2^{ème} séquence :

P_d ($n=100$ [tr/min] ; $u = 26$ [kV])

→ P_{s2} ($n=100$ [tr/min] ; $u = 30$ [kV])

→ P_f ($n=60$ [tr/min] ; $u = 30$ [kV])

Pour simuler la réponse du processus dans les deux cas, nous avons supposé que l'ajustement du deuxième facteur se fait après la stabilisation du premier facteur à ± 5 % de la valeur cible. Dans les deux séquences d'ajustement nous avons supposé que le temps de réponse des deux systèmes est identique et égale à 0.1 sec. Le résultat de cette simulation est représenté sur la figure IV.9.

L'analyse de la valeur moyenne de la récupération du produit non conducteur au cours de l'ajustement dans les deux séquences indique que la deuxième séquence garde la récupération du produit non conducteur à une valeur plus élevée que celle de la première séquence.

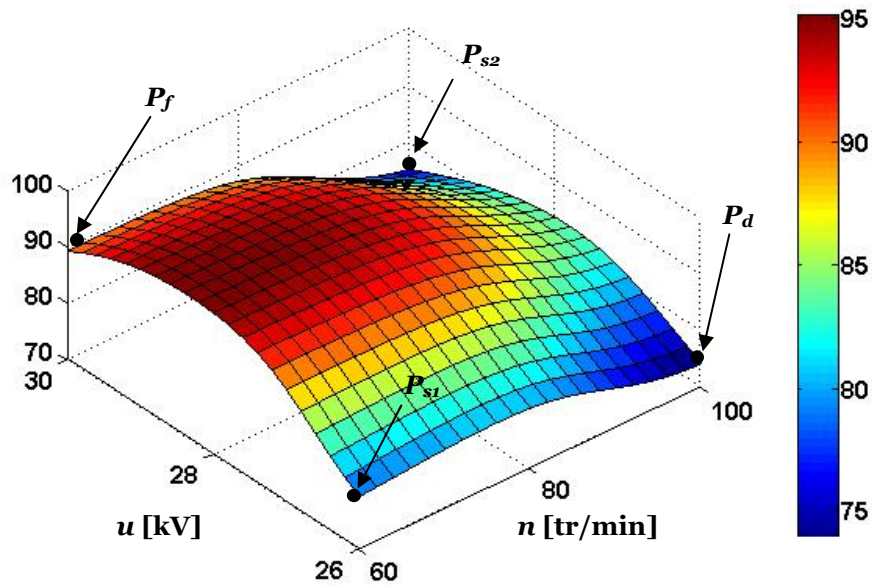


Figure IV.8: Position des points appartenant aux séquences d'ajustement manuelle

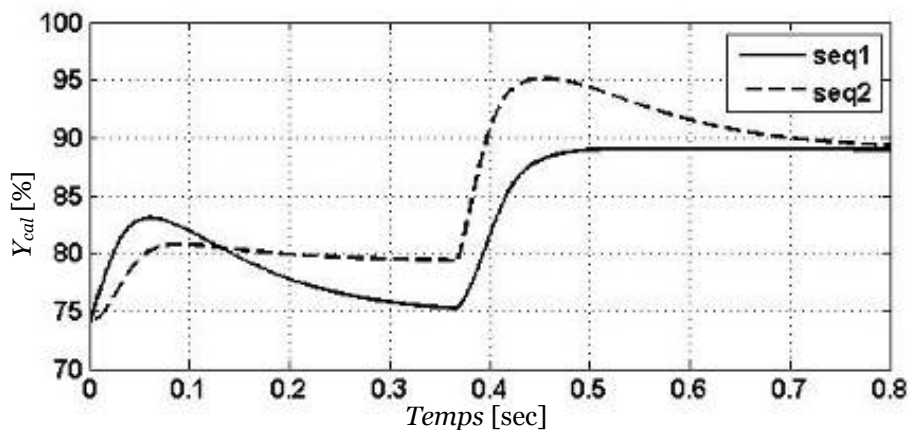


Figure IV.9 : Récupération du produit non conducteur dans deux séquences d'ajustement manuelles différentes

La deuxième possibilité d'ajustement consiste à utiliser un contrôleur qui peut ajuster simultanément les deux facteurs. Le résultat de cette procédure est représenté sur la figure IV.10.

Dans cette simulation nous avons testé trois possibilités: dans la première, la réponse du tambour est plus lente par rapport à la réponse du système haute tension. ($\tau_n > \tau_u$); dans la deuxième application nous avons supposé que les deux systèmes possèdent la même constante de temps ($\tau_n = \tau_u$); dans la troisième application nous avons supposé que la réponse du tambour est plus rapide que celle du système haute tension ($\tau_n < \tau_u$).

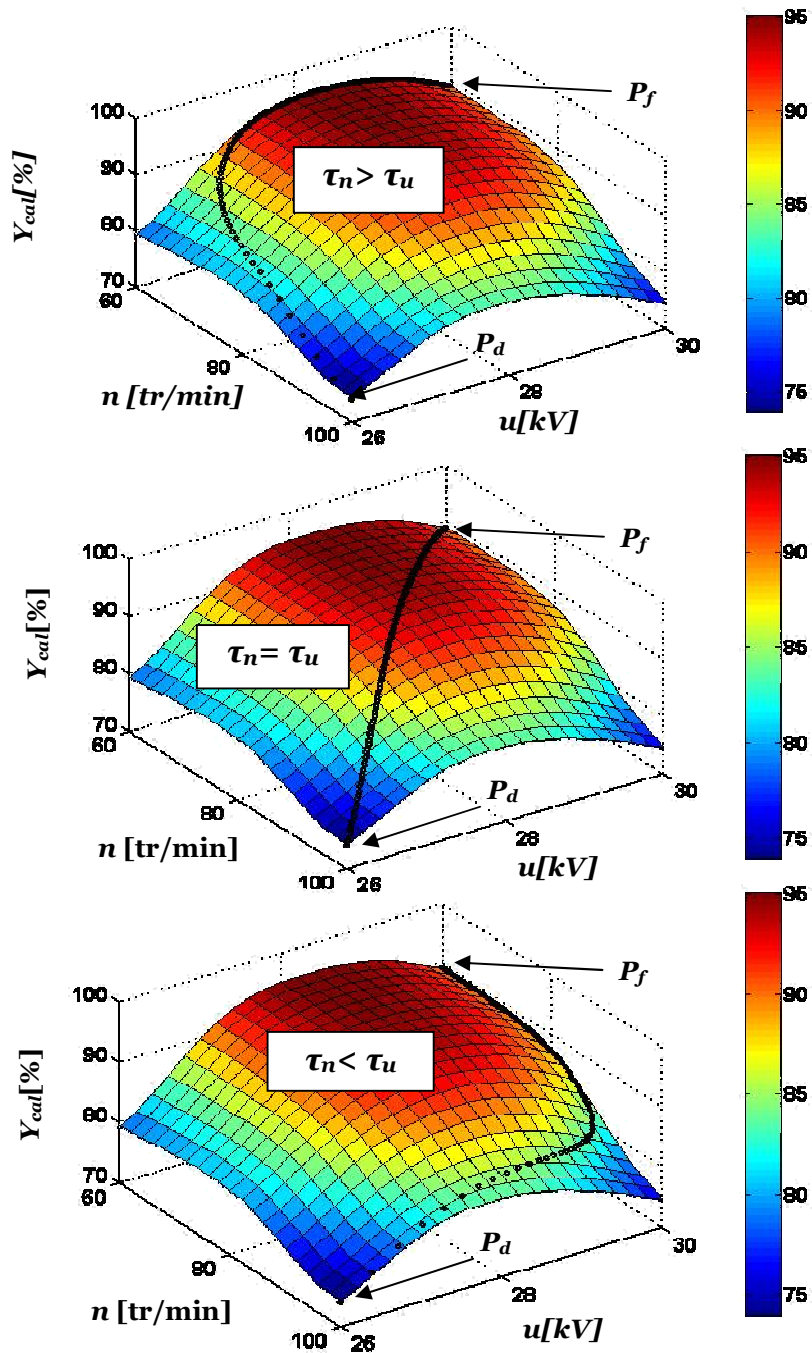


Figure IV.10 : Régime transitoire entre deux points de fonctionnement P_d et P_f en fonction de la réponse des sous-systèmes de l'installation τ_n et τ_u .

La figure IV.11 montre que l'évolution de la récupération du produit non conducteur au cours du passage d'un point de fonctionnement à un autre dépend du comportement dynamique des systèmes élémentaires de l'installation. Dans les trois cas le processus démarre du point P_d , il suit trois chemins différents pour attendre le point final P_f . Le temps de réponse de chaque système élémentaire impose le chemin vers le point final P_f .

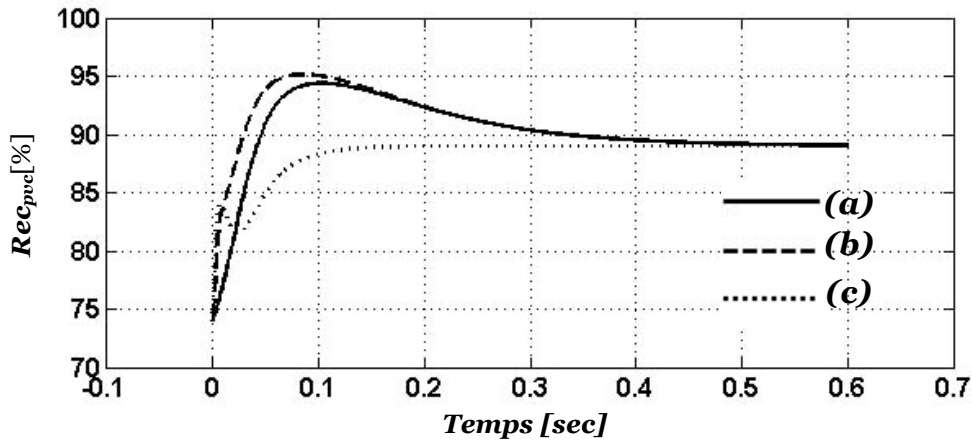


Figure IV.11 : Evolution de la récupération du produit non conducteur au cours du passage du point de fonctionnement P_d ($n=100$ [tr/min] ; $u = 26$ [kV]) vers un autre point P_f ($n=60$ [tr/min] ; $u = 30$ [kV]) ; (a) : $\tau_n = \tau_u = 0.1$ sec ; (b) : $\tau_n = 0.01$ sec ; $\tau_u = 0.1$ sec ; (c) : $\tau_n = 0.1$ sec ; $\tau_u = 0.01$ sec ; $dt = 0.001$ [sec].

IV.3 Simulation d'une variation du débit

Le débit du matériau est l'un des facteurs dont le contrôle est important dans l'optimisation du processus de séparation électrostatique. Ce facteur a été qualifié dans plusieurs travaux expérimentaux [5-7,23,41-42,59,], comme l'une des variables de contrôle qui exerçant une influence significative sur la récupération du produit non conducteur. A cet effet, et afin de simuler le fonctionnement du système de contrôle dans des situations compliquées, nous avons considéré les variations du débit comme étant une source de perturbation non contrôlable. La réponse du modèle de simulation à des valeurs constantes du débit est représentée sur la figure IV.12.

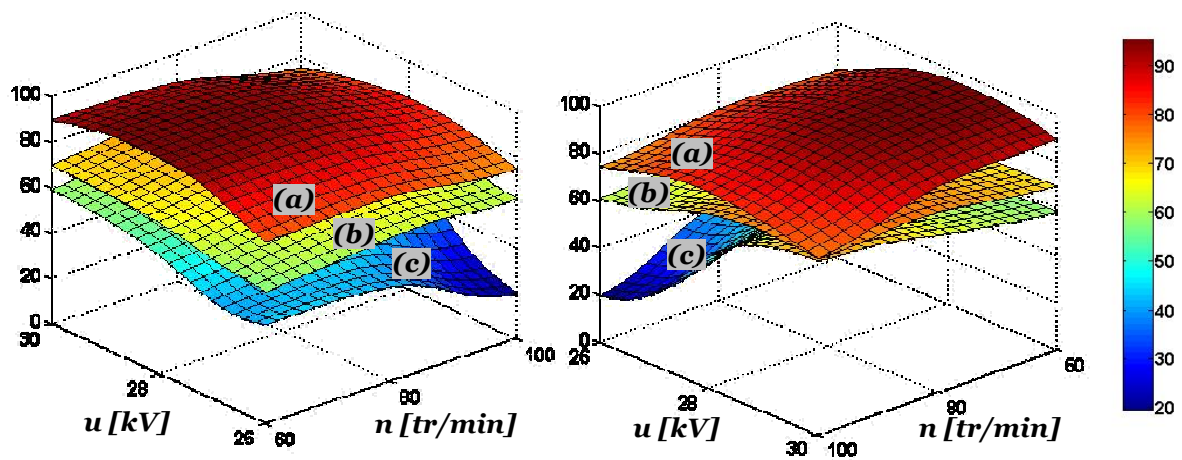


Figure IV.12 : Récupération du produit non conducteur en fonction de la vitesse de rotation du cylindrer et de la valeur de la haute tension appliquée à l'électrode couronne pour : (a) $d=6$ kg/h ; (b) : $d=9$ kg/h ; (c) : $d=12$ kg/h

Cette figure nous montre que l'augmentation du débit engendre une diminution de la récupération du produit non conducteur dans tout l'espace de recherche définie en fonction de la vitesse de rotation du cylindre et de la valeur de la haute tension. Cette diminution varie d'un point à un autre, par exemple elle est maximale dans les régions caractérisées par une grande vitesse et une faible valeur de tension.

Si on examine la variation du produit non conducteur dans le point $(n,u)=(100\text{tr/min},26\text{kV})$ on constate que la récupération du produit est plus sensible à la variation du débit dans la plage $9 \text{ kg/h} < d < 12 \text{ kg/h}$. La figure IV.13 nous montre la variation de la récupération du produit non conducteur en ce point. La variation de la récupération du produit non conducteur est insensible à la variation du débit dans les régions caractérisées par une grande vitesse et une valeur de tension élevée (Figure IV.12).

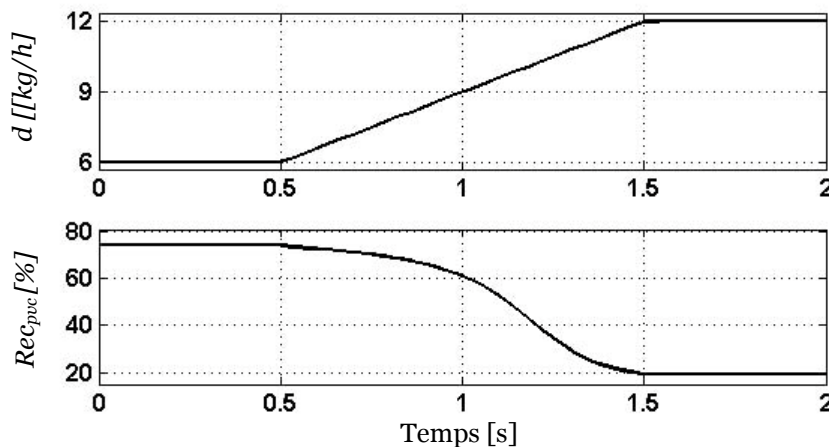


Figure IV.13 : Réponse du séparateur électrostatique dans le point $(n=100\text{tr/min } u=26\text{kV})$ à une variation imposée du débit

On examine maintenant l'influence de la valeur du débit sur le point de fonctionnement optimal de l'installation. Une fluctuation du débit engendre un déplacement du point de fonctionnement optimal dans l'espace de recherche comme indiqué sur les figures IV.14 -IV.16.

En analysant la réponse du séparateur représentée sur la figure IV.14, on peut constater que pour des faibles valeurs de débit la récupération maximale du produit non conducteur peut être obtenue en bordure de l'espace de recherche caractérisé par de faibles valeurs de vitesses et des valeurs de tensions moyennes. La valeur de la récupération dans ce cas est aux alentours de 95%.

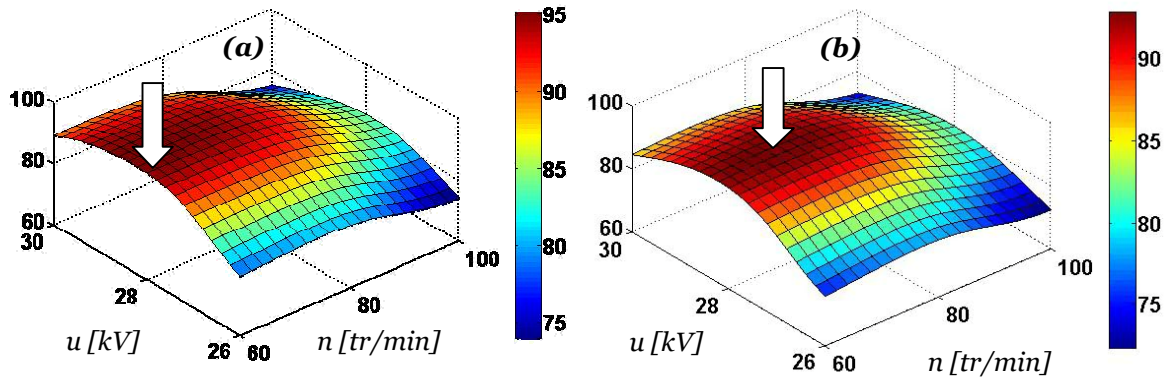


Figure IV.14 : Déplacement du point de fonctionnement optimal en fonction du débit ;
(a) : $d=6$ kg/h, (b) : $d=6.75$ kg/h

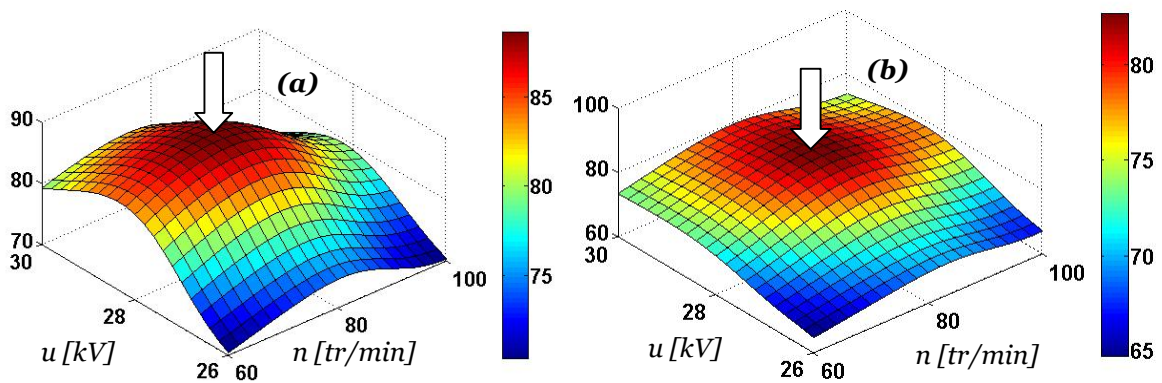


Figure IV.15 : Déplacement du point de fonctionnement optimal en
fonction du débit ; (a) : $d=7.5$ kg/h ; (b) : $d=8.25$ kg/h

Cette situation nous indique que la détermination du point de fonctionnement optimal du séparateur exige l'utilisation d'une méthode d'optimisation avec contraintes (c'est-à-dire une méthode capable de gérer les contraintes représentées par les limites supérieure et inférieure de chaque facteur).

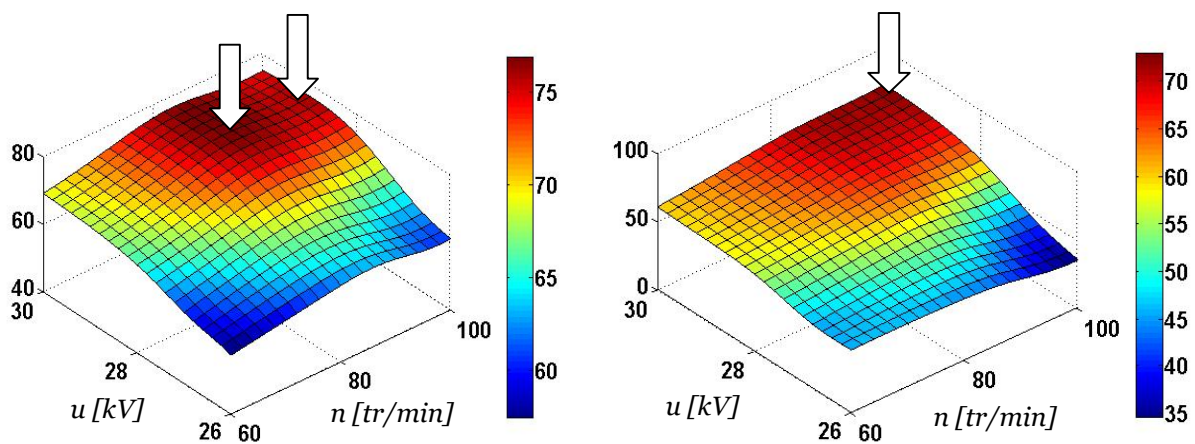


Figure IV.16 : Déplacement du point de fonctionnement optimal en
fonction du débit (a) : $d=9$ kg/h ; (b) : $d=10.75$ kg/h

L'analyse de la figure IV.16 montre que le déplacement du point de fonctionnement optimal peut être accompagné par l'apparition de plusieurs points optimaux qualifiés de solutions locales du processus. Dans cette situation, il est nécessaire d'utiliser une méthode d'optimisation globale comme indiqué précédemment. Ce type de méthode est capable de converger vers tous les points optimaux en même temps et donc d'identifier la solution globale à partir de l'ensemble des solutions locales.

D'après les résultats des simulations présentées précédemment, on constate que l'ajustement manuel des facteurs de l'installation peut échouer dans le cas où le processus serait exposé à une source de perturbation telle que la variation du débit. Aussi, envisageons-nous l'utilisation d'un contrôleur capable d'ajuster les facteurs de l'installation de façon systématique.

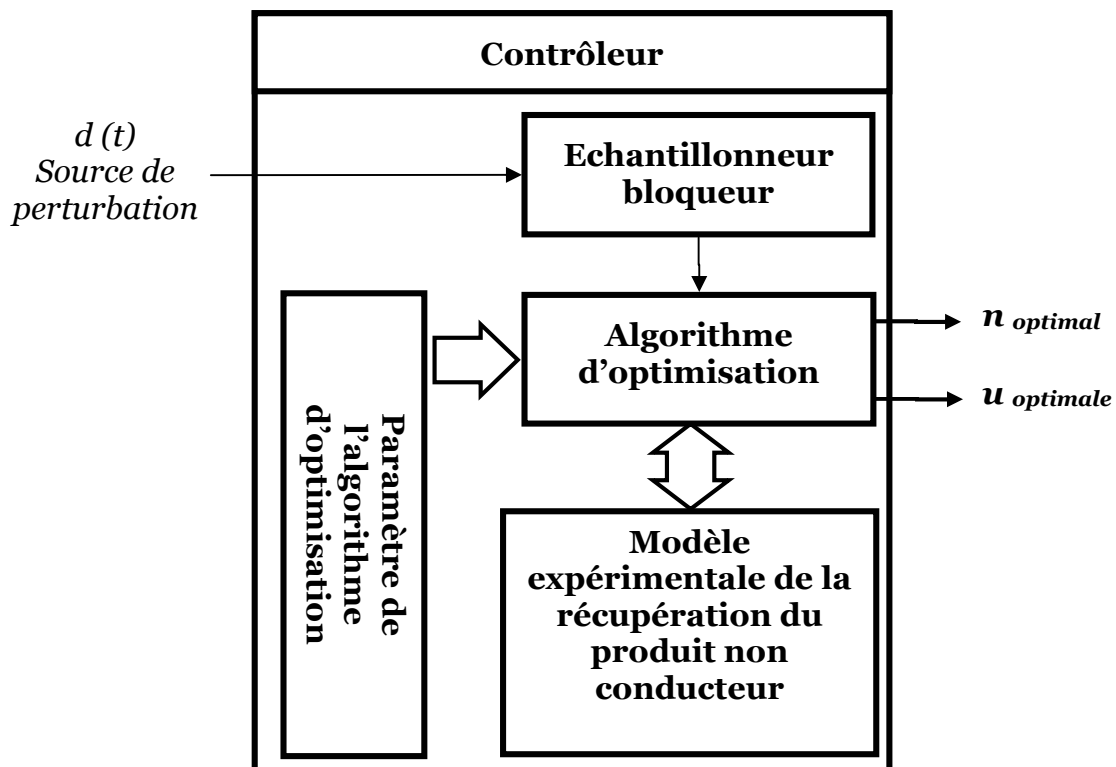


Figure IV.17 : Schéma bloc du contrôleur utilisé dans la simulation.

Le contrôleur proposé dans cette étude utilise la valeur mesurée de la perturbation pour générer les valeurs optimales de la vitesse de rotation du cylindre de la haute tension appliquée à l'électrode couronne. Cette solution est appliquée à l'entrée de l'installation contrôlée (dans notre cas l'installation contrôlée est représentée par le modèle de simulation du séparateur électrostatique)

Ce contrôleur inclut dans sa structure un échantillonneur bloqueur dont le rôle consiste à discrétiser le signal continu et à présenter le signal résultant sous forme d'une valeur constante à l'entrée de l'algorithme d'optimisation pendant une période du cycle de contrôle. La période d'échantillonnage est retenue comme un des paramètres de simulation.

IV.4 Contrôle du processus de séparation électrostatique.

Nous présentons dans ce paragraphe les résultats des simulations effectuées sur le modèle du séparateur électrostatique soumis à différents régimes de fonctionnement. La période de simulation est fixée à 500 s.

IV.4.1 Scénario 1 : Passage en mode d'ajustement assuré par le contrôleur en régime de fonctionnement stationnaire ($d = 6 \text{ kg/h}$)

Dans la première simulation, nous supposons que le processus de séparation est pré-ajusté manuellement sur le point de fonctionnement qui représente le centre du domaine de recherche. $(n,u) = (80 \text{ tr/min}, 28 \text{ kV})$. À partir de l'instant $t = 50 \text{ s}$ l'ajustement des facteurs de l'installation est assuré par le contrôleur. Cette valeur ($t=50 \text{ s}$) est choisie/fixée de façon arbitraire.

Stratégie 1 : (*Temps de cycle constant ; Initialisation aléatoire du processus d'optimisation au début de chaque cycle*)

En premier lieu, nous allons utiliser une méthode de contrôle cyclique. Le cycle de contrôle est ainsi caractérisé par un temps bien déterminé. Pour fixer la période du cycle de contrôle nous allons considérons que : $\Delta t = \{\text{le temps de la mesure du débit du matériau à séparer} + \text{le temps de calcul de la solution optimale « } (n_{opt}, u_{opt}) \text{ »} + \text{la durée de stabilisation du séparateur à la valeur } (n_{opt}, u_{opt})\}$ doit être inférieure à la durée du cycle. (Figure IV.18)

Le déroulement d'un cycle de contrôle se fait comme indiqué sur la Figure IV.18. Ainsi au début de chaque cycle on doit:

- 1- t_0 mesurer le débit du matériau à séparer ;
- 2- t_1 , l'algorithme génétique reçoit la valeur mesurée du débit et démarre le calcul de la solution optimale (n, u) ,
- 3- t_2 , la mesure du débit est mise à l'arrêt,
- 4- t_3 , l'AG fournit la solution optimale (n, u) ,
- 5- t_4 , les réponses des systèmes élémentaires se stabilisent à la valeur optimale.

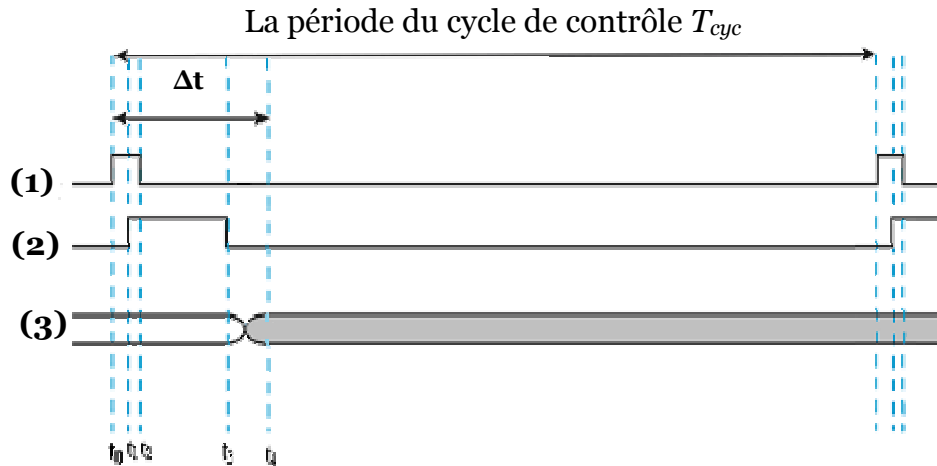


Figure IV.18 : Le diagramme temporel d'un cycle de contrôle. **(1)** : Mesure de la vitesse de rotation, **(2)** : Calcul de la valeur optimale par l'AG avec N générations, **(3)** : Apparition des valeurs optimales au niveau du séparateur [23]

Les résultats des simulations réalisées avec cette méthode sont représentés sur la figure IV.19. L'état initial du processus de séparation correspond à la période $[0 \text{ s} ; 50 \text{ s}]$. Dans cette période les valeurs de la haute tension et de la vitesse de rotation du cylindre sont respectivement ajustées à 28 kV et à 80 tr/min. A partir de $t=50 \text{ s}$, la prise en charge de l'ajustement des paramètres de l'installation est assurée par un contrôleur.

Au début de chaque cycle, le contrôleur applique une solution optimale à l'entrée du séparateur déterminée par la méthode des algorithmes génétiques. Le nombre de générations effectué par l'algorithme d'optimisation dans chaque cycle de contrôle est considéré comme un paramètre de simulation. Dans la première application nous avons fixé ce paramètre à une seule génération.

Le passage du séparateur d'un point de fonctionnement vers un autre est régi par le comportement dynamique des sous-systèmes contrôlés. Ce comportement est observé au niveau de la courbe des facteurs (Figure IV.19.a-b). Dans cette courbe on remarque que la modification de la valeur d'un facteur passe généralement par un régime transitoire. Dans cette simulation nous avons supposé que les deux sous-systèmes cylindre-tournant et source HT possèdent la même constante de temps $\tau_n = \tau_u = 1 \text{ s}$.

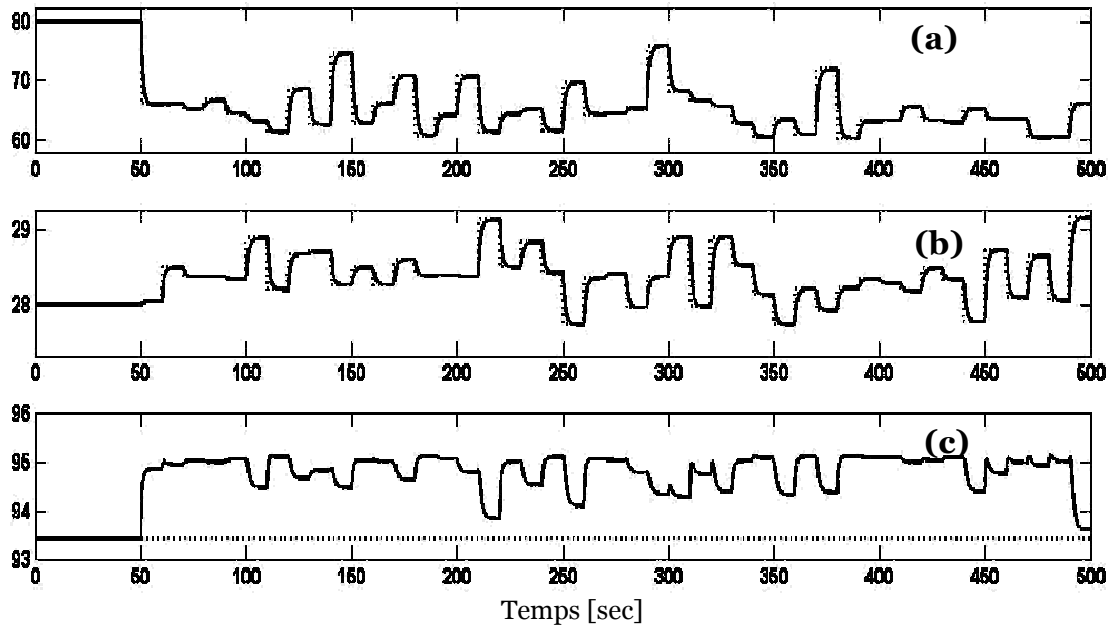


Figure IV.19 : Passage du processus de séparation à un mode d'ajustement assuré par contrôleur ; $d=6\text{kg/h}$, $T_{cyc} = 10 [\text{sec}]$, $NG = 1$, $\tau_n = 1 [\text{sec}]$, $\tau_u = 1 [\text{sec}]$, (a) vitesse optimale, (b) tension optimale, (c) : récupération du pvc.

La représentation de l'évolution du point de fonctionnement du processus dans l'espace de recherche est représentée sur la figure IV.20. La dispersion des solutions obtenues est principalement due au nombre insuffisant de générations effectuées par l'algorithme génétique pour déterminer le point de fonctionnement optimal de l'installation.

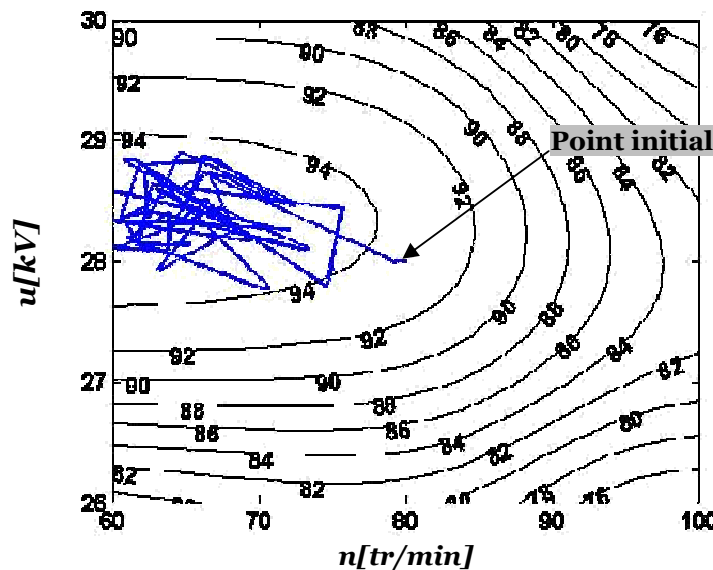


Figure IV.20 : Evolution des valeurs des facteurs d'un processus contrôlé dans l'espace de recherche, Stratégie 1, $T_{cyc} = 10 [\text{sec}]$, $NG = 1$, $\tau_n = 1 [\text{sec}]$, $\tau_u = 1 [\text{sec}]$

L'augmentation du nombre de générations atténue sensiblement la dispersion et conduit le processus à rapprocher du point de fonctionnement optimal. Les figures IV.21 montrent les résultats obtenus pour un nombre de générations $NG=1$, 10 et 30 générations.

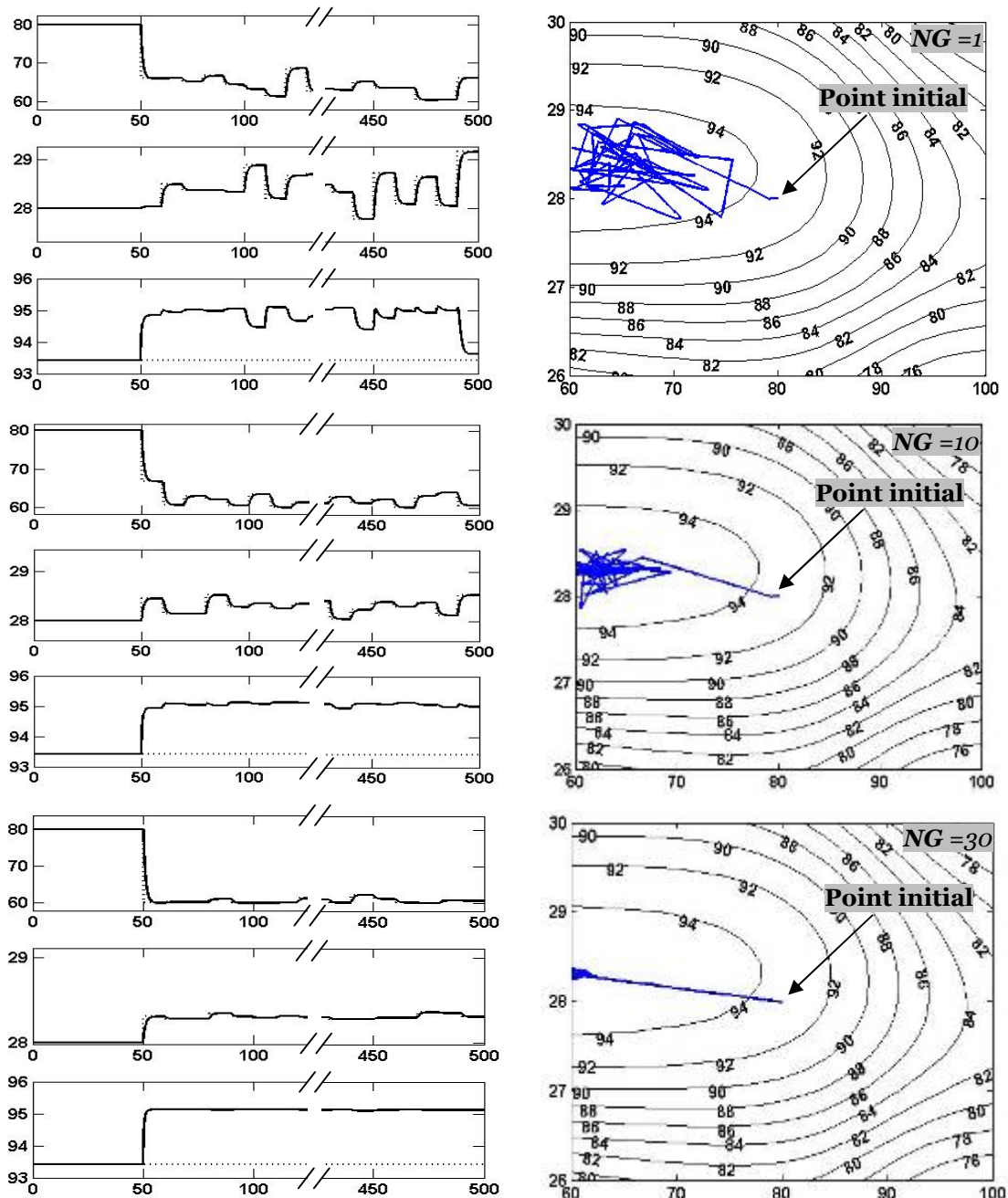


Figure IV.21 : L'évolution de la valeur des facteurs d'un processus contrôlé dans l'espace de recherche ; Stratégie 1 ; $T_{cyc} = 10 [s]$; $\tau_n = 1 [s]$; $\tau_u = 1 [s]$

Stratégie 2 : (Temps de cycle constant ; Initialisation aléatoire du processus d'optimisation une seule fois au début du contrôle)

Dans cette stratégie, l'algorithme d'optimisation est initialisé de façon aléatoire une seule fois au début du contrôle. L'optimisation se fait alors d'une façon continue à partir du point de départ $t=50$ s. Au début de chaque cycle de contrôle, la meilleure solution obtenue par l'algorithme d'optimisation est appliquée à l'entrée du séparateur électrostatique. Les résultats de cette méthode sont représentés sur la figure IV.22.

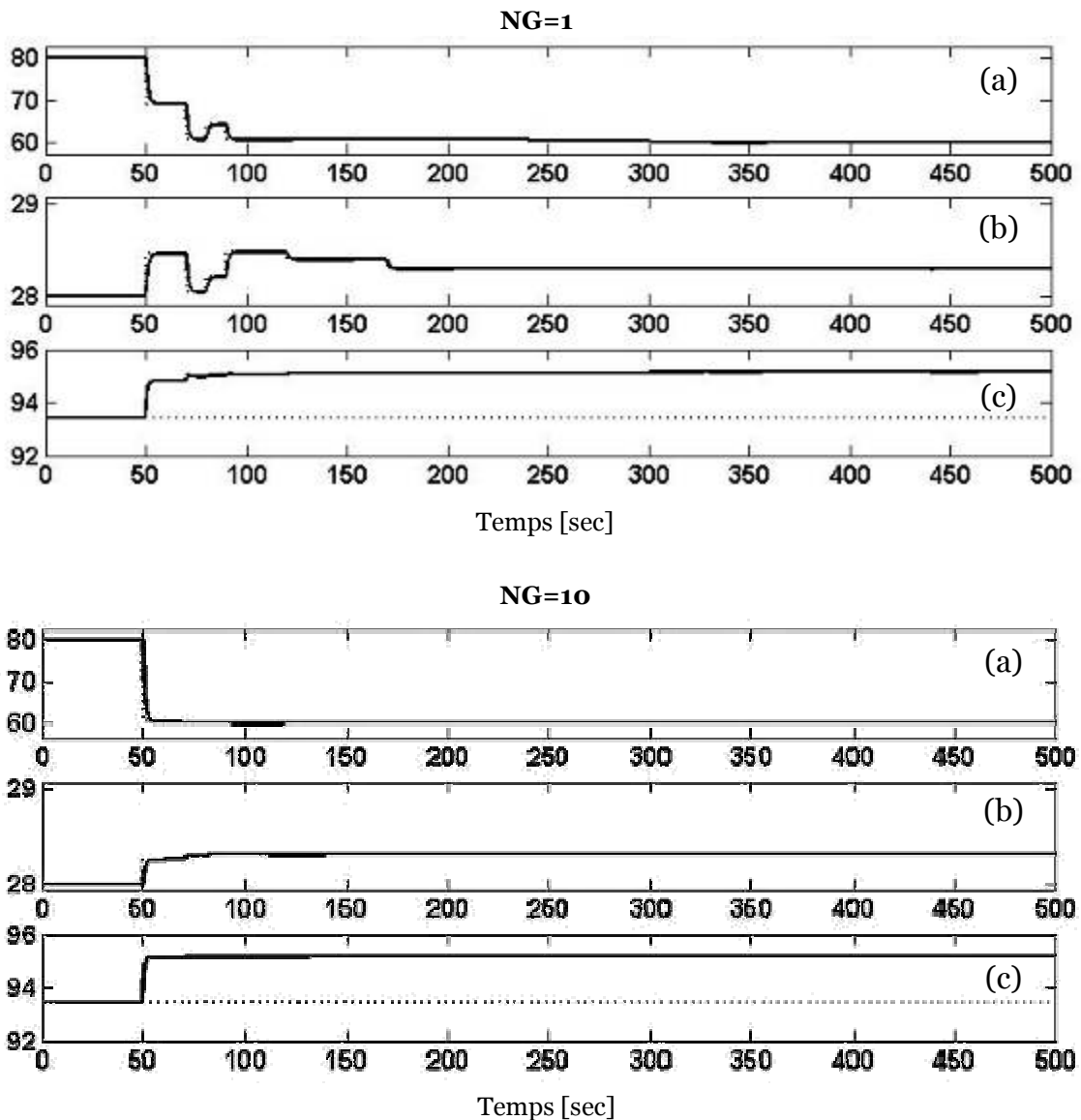


Figure IV.22 : Evolution des valeurs des facteurs d'un processus contrôlé dans l'espace de recherche, Stratégie 2, $T_{cyc} = 10$ [sec], $\tau_n = 1$ [sec], $\tau_u = 1$ [sec], (a) vitesse optimale, (b) tension optimale, (c) : récupération du pvc

Les résultats de ces simulations montrent tout l'intérêt de l'utilisation des solutions trouvées dans le cycle N comme des solutions initiales dans le cycle $N+1$. L'utilisation de cette technique diminue considérablement les fluctuations des

facteurs autour du point optimal (figure IV.22). Elle réduit aussi le nombre de générations effectuées par l'algorithme d'optimisation dans chaque cycle de contrôle, et in fine les temps de calcul.

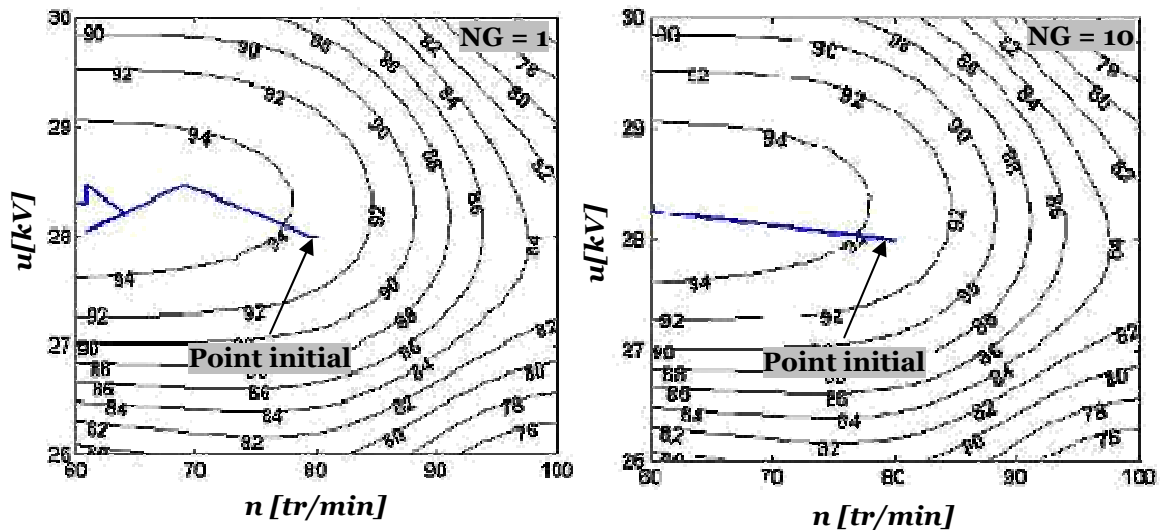


Figure IV.23 : Evolution des valeurs des facteurs d'un processus contrôlé dans l'espace de recherche, Stratégie 2, $T_{cyc} = 10$ [s], $\tau_n = 1$ [s], $\tau_u = 1$ [s]

IV.4 .2 Scénario 2 : Régime de fonctionnement perturbé

Nous présentons ici les résultats des simulations effectuées sur le modèle du séparateur électrostatique soumis à une perturbation du débit. La perturbation est représentée par une augmentation suivie d'une diminution de la valeur du débit. La forme mathématique de cette perturbation est définie par l'équation (IV.2). La forme de cette perturbation est représentée par la figure IV.24.

$$d(t) = \begin{cases} 6 & 0 \leq t < 50 \\ 6 + 0.03(t - 50) & 50 \leq t < 250 \\ -0.03(t - 650) & 250 \leq t < 450 \\ 6 & 450 \leq t < 500 \end{cases} \quad (IV.2)$$

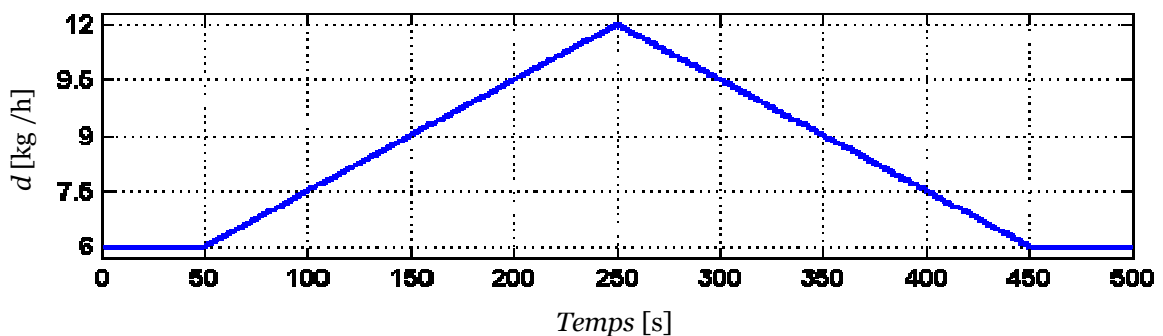


Figure IV.24 : Forme de la perturbation du débit

Au début de chaque cycle de contrôle une valeur mesurée de la perturbation constitue l'entrée de l'algorithme d'optimisation pendant le cycle de contrôle. Pour assurer cette opération, nous avons utilisé un modèle d'un échantillonneur bloqueur dont la période d'échantillonnage est identique au temps de cycle. La figure IV.25 montre la forme du signal mesuré obtenue pour différentes valeurs de T_{cyc} . Dans cette figure on remarque que l'utilisation d'un $T_{cyc} = 2$ s décrit très fidèlement l'allure de la perturbation.

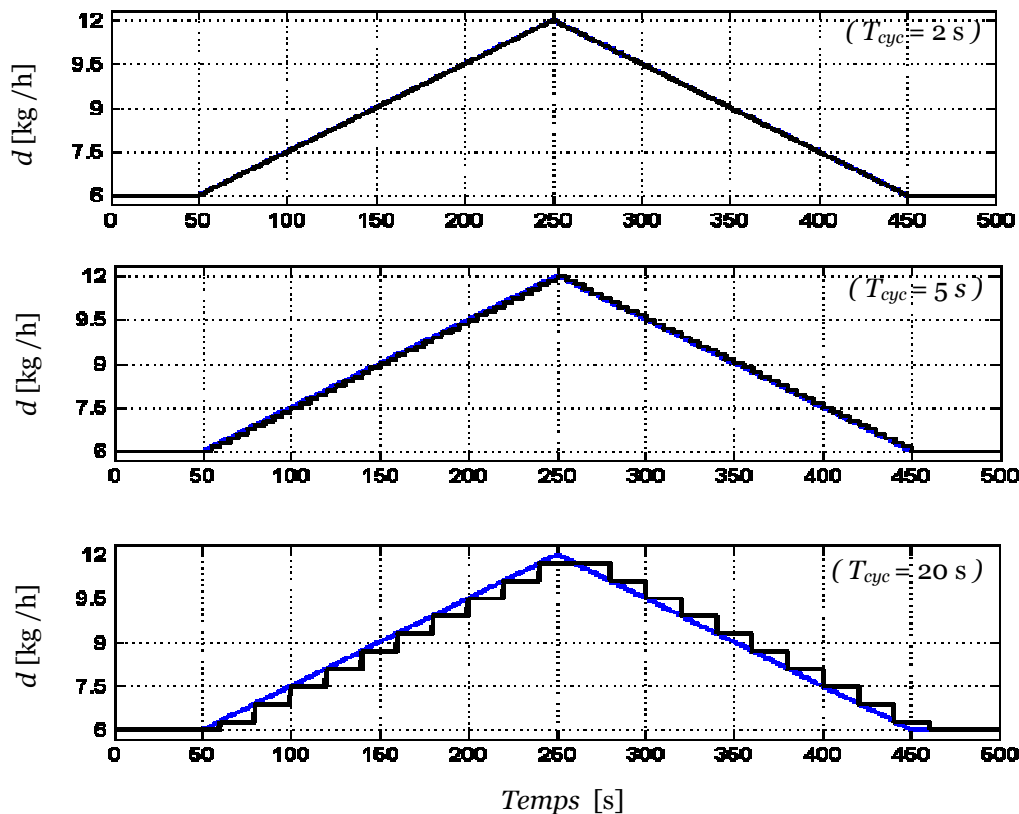


Figure IV.25 : Forme de la valeur mesurée de la perturbation en fonction de la période du cycle

Stratégie 1 : (Temps de cycle constant et Initialisation aléatoire du processus d'optimisation au début de chaque cycle)

Dans le deuxième scénario nous utilisons la stratégie 1 exploitée dans le premier scénario en modifiant le temps de cycle. Nous fixons le temps de cycle à 2 [sec] et le début du contrôle à $t=150$ [sec]. Les résultats de cette simulation sont présentés dans les figures IV.26 et 27.

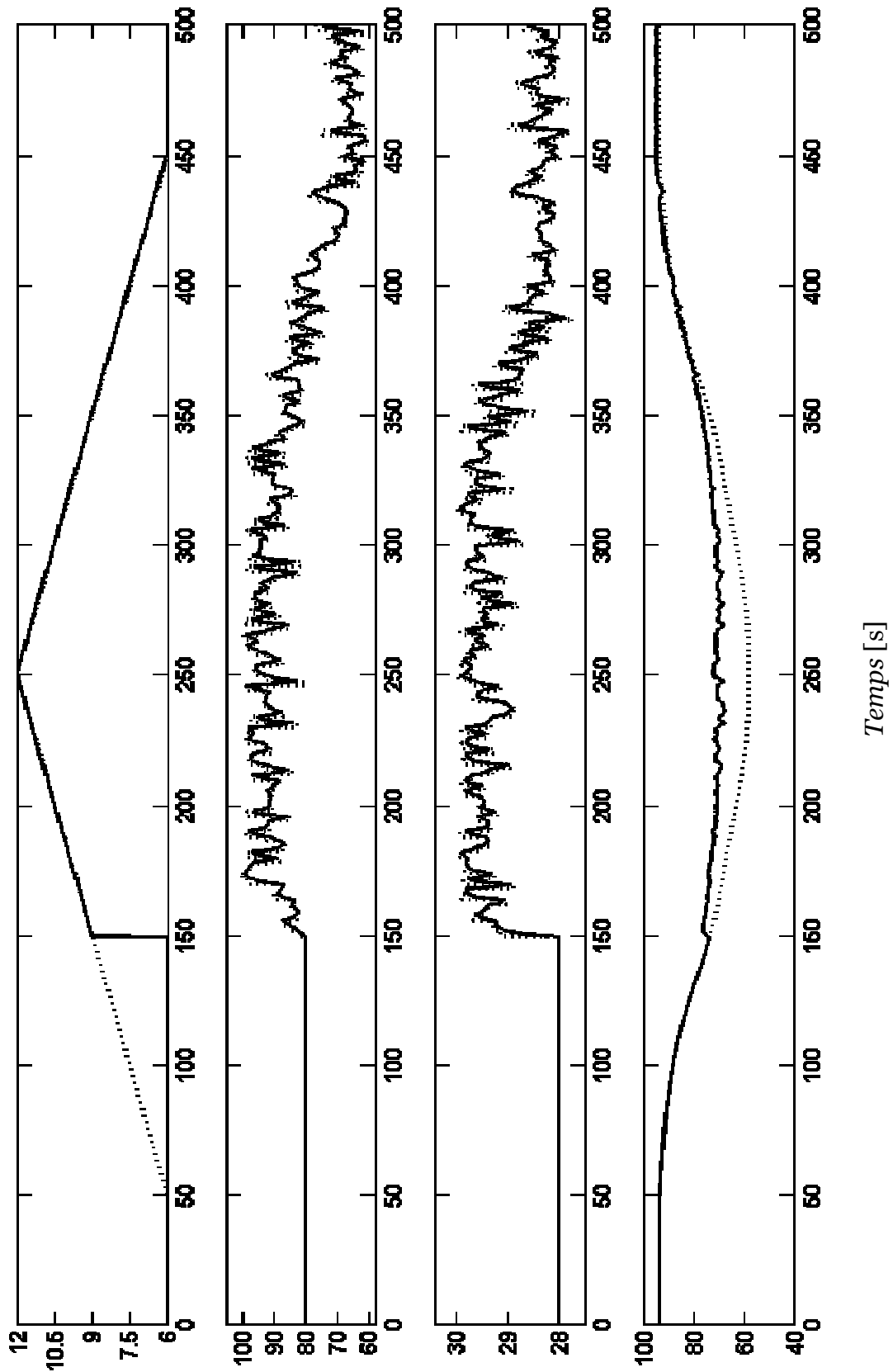


Figure IV.26 : Evolution des valeurs des facteurs d'un processus contrôlé dans l'espace de recherche, Stratégie 1, $T_{cyc} = 2[s]$, $NG = 1$, $\tau_n = 1[s]$, $\tau_u = 1[s]$, (c) vitesse optimale, (d) tension optimale, (e) : récupération du pvc.

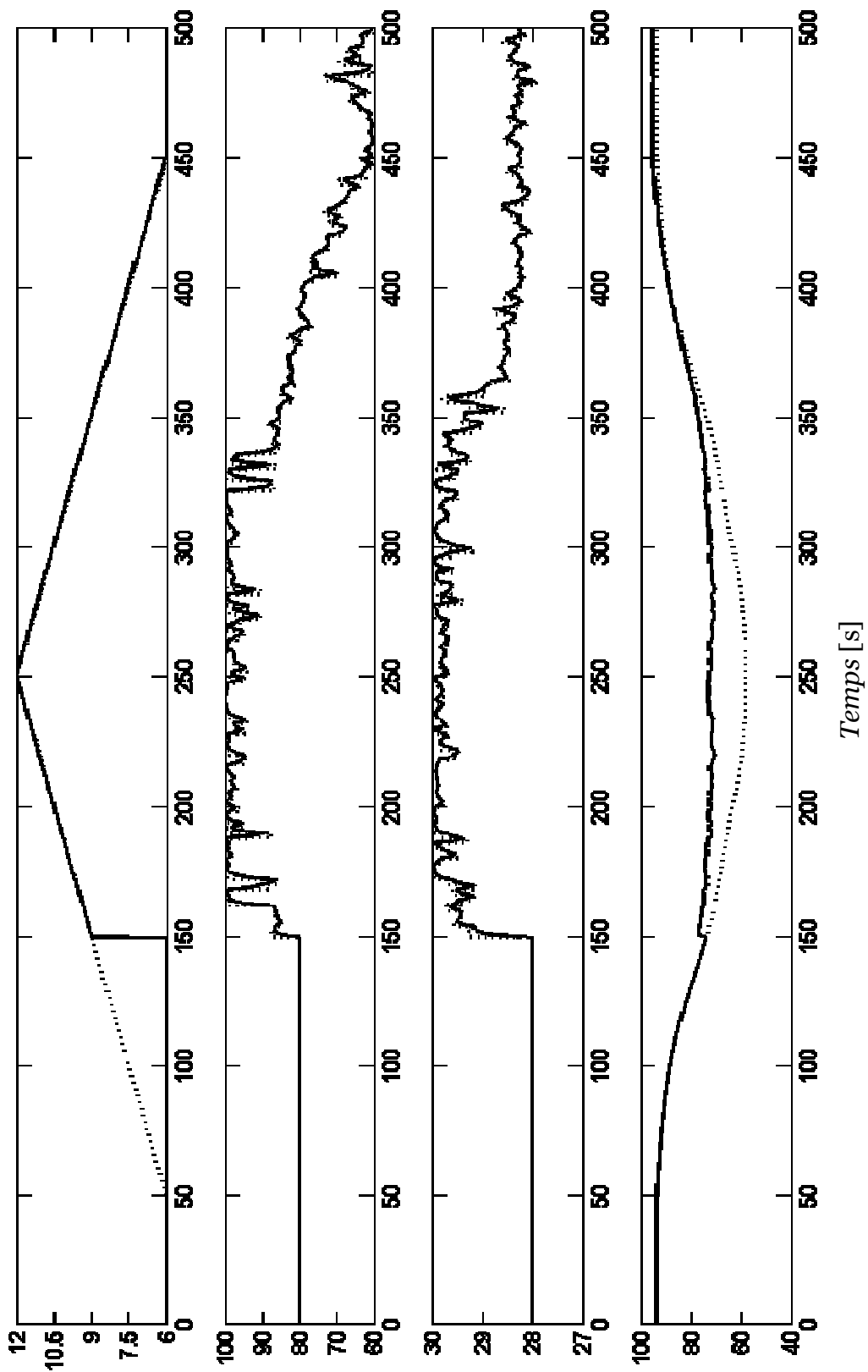


Figure IV.27 : Evolution des valeurs des facteurs d'un processus contrôlé dans l'espace de recherche, Stratégie 1, $T_{cyc} = 2$ [s], $NG = 10$, $\tau_n = 1$ [s], $\tau_u = 1$ [s], (c) vitesse optimale, (d) tension optimale, (e) : récupération du pvc

Ces figures comparent les récupérations du produit non conducteur dans un processus de séparation dont les facteurs sont ajustés au point de fonctionnement qui représente le centre de l'espace de recherche, et un processus dont les facteurs sont ajustés de façon cyclique par un contrôleur.

Sur la figure IV.26.a, la valeur de la perturbation présentée à l'entrée de l'algorithme d'optimisation au début de chaque cycle de contrôle est presque identique à la valeur instantanée de la perturbation. Cette valeur (*valeur mesurée de la perturbation*) est exploitée par l'algorithme d'optimisation pour définir les valeurs optimales de la tension et de la vitesse de rotation.

Le nombre insuffisant de générations et les initialisations aléatoires de l'ensemble des solutions initiales au début de chaque cycle de contrôle interrompent la convergence de l'algorithme d'optimisation. Cela s'est traduit par la fluctuation des facteurs autour de la solution optimale. L'augmentation du nombre de générations effectuées dans chaque cycle de contrôle a conduit l'algorithme d'optimisation à s'approcher du point optimal au cours de son déplacement dans l'espace de recherche (Figure IV.27). Cela a diminué considérablement les fluctuations des facteurs de l'installation sans pour autant éliminer le problème.

Stratégie 2 : (*Temps de cycle constant ; Initialisation aléatoire du processus d'optimisation une seule fois au début du contrôle*)

Le fait d'abandonner la méthode d'initialisation aléatoire au début de chaque cycle de contrôle, permet à l'algorithme d'optimisation d'utiliser les solutions trouvées dans le cycle N comme des solutions initiales pour déterminer le point optimal dans le cycle N+1. L'algorithme d'optimisation garde ainsi la diversité des solutions potentielles autour du point optimal. Il devient alors apte à détecter rapidement les déplacements du point optimal dans cette zone.

La simulation de cette méthode a donné des résultats remarquables avec le même nombre de générations utilisées dans la simulation précédente. Le résultat obtenu est représenté sur la figure IV.28. Cette figure nous montre :

- Une diminution considérable des de la fluctuation au niveau de la valeur optimale de la tension appliqué à l'électrode couronne et la vitesse de rotation du tambour ;

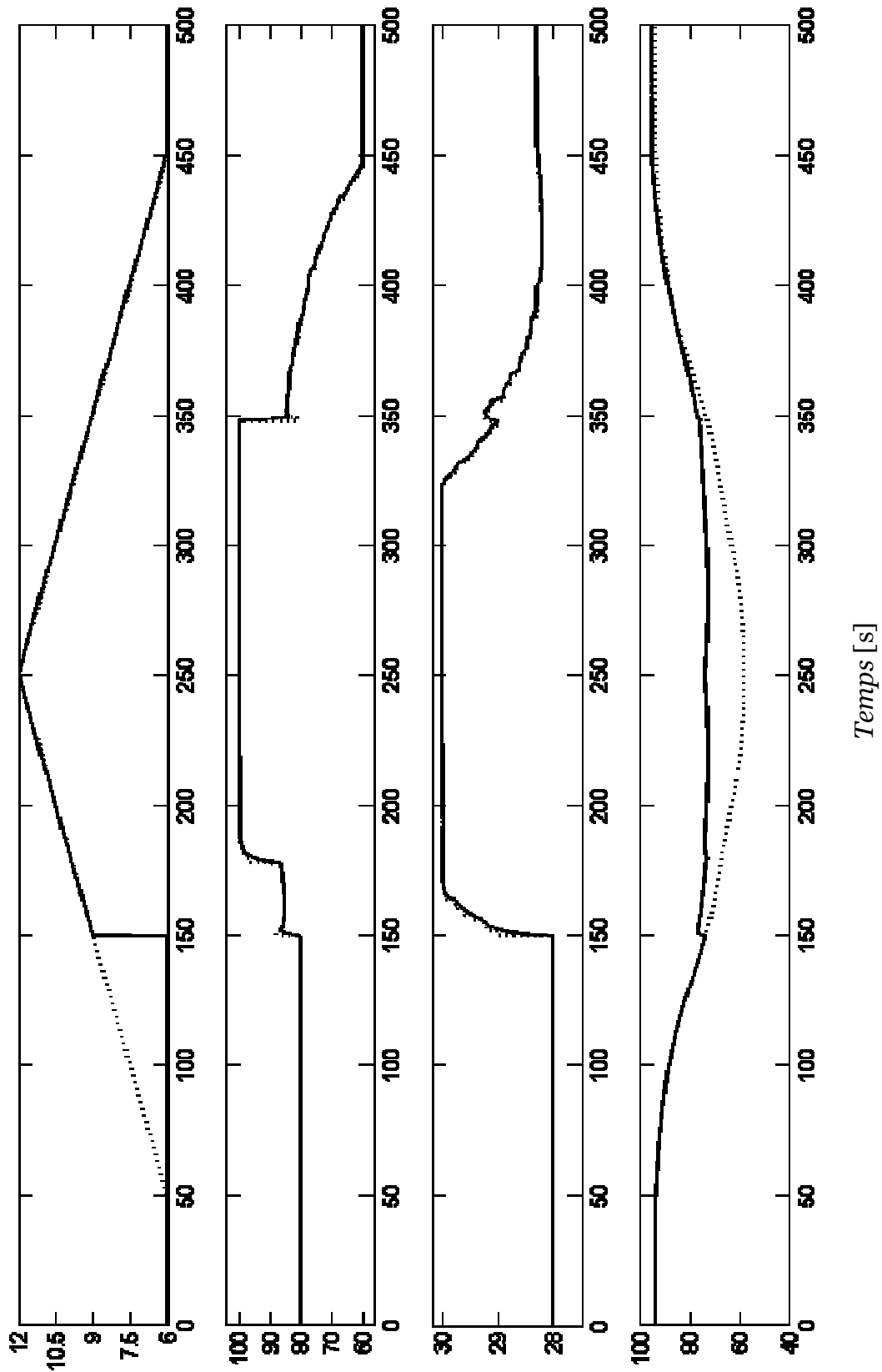


Figure IV.28 Evolution des valeurs des facteurs d'un processus contrôlé dans l'espace de recherche, Stratégie 1, $T_{cyc} = 2$ [s], $NG = 10$, $\tau_n = 1$ [s], $\tau_u = 1$ [s], (c) vitesse optimale, (d) tension optimale, (e) : récupération du pvc

- Une convergence du processus de séparation vers son point de fonctionnement optimal en quelque cycle de contrôle ;
- Un suivi de l'évolution de la position du point optimal avec une précision acceptable (caractérisé par une variation presque continue des facteurs entre $t=350$ s et $t=450$ s) ;
- La détection des solutions globales (apparition des variations brusque au niveau de la valeur des facteurs à $t=350$ s) ;
- Un gain au niveau de la récupération du produit non conducteur de l'ordre de 20% pour un débit de 12kg/h.

Suite aux résultats de simulations obtenues, on peut dire que la stratégie de contrôle peut être considérée comme l'un des paramètres les plus importants qui doivent être pris en considération lors de la mise des systèmes de contrôle sur site.

IV.5 Conclusion

Les résultats des simulations présentées dans cette partie du travail ont mis en évidence l'importance de l'utilisation d'une méthode d'optimisation dans l'ajustement des facteurs d'un séparateur électrostatique à cylindre tournant. Dans le cas du régime de fonctionnement continu le choix de la période du cycle de contrôle constitue une étape majeure dont dépend la réussite du processus de contrôle. En régime de fonctionnement perturbé, la période du cycle doit être choisie de façon à réduire l'écart entre la valeur instantanée et la valeur mesurée de la perturbation. Avec une méthode d'optimisation telle que la méthode des algorithmes génétiques la détermination de la position du point de fonctionnement optimal peut être obtenue avec une précision acceptable. La qualité de cette approximation peut être améliorée de façon considérable en exploitant les informations obtenues dans les cycles de contrôle précédents.

Conclusion générale

Les travaux de recherche présentés dans cette étude ont portés sur l'exploitation des systèmes de contrôle dans l'amélioration de la qualité des produits récupérés à la sortie des processus de séparation électrostatique. Au début de cette étude, nous avons présenté une vue générale sur la position des processus de séparation électrostatique dans les chaînes de tri des DEEE. Une des conclusions la plus importante à retenir de cette partie du travail est représentée par le point suivant : La qualité des produits récupérés à la sortie des processus de tri est liée généralement au degré de dissociation des particules hétérogènes.

Actuellement, il existe plusieurs installations qui sont exploitées dans la réduction de la taille de ce type de déchet. Le choix approprié des machines de réductions permet d'atteindre les tailles et les degrés de dissociation désiré avec un minimum d'énergie.

Le tri du produit granulaire obtenu se fait généralement en fonction des paramètres spécifiques des particules du mélange. Le tri des mélanges en fonction de leurs conductivités électriques est assuré généralement par les processus de séparation électrostatique. Ce type de processus est considéré en tant que processus multifactoriel. Pour augmenter la qualité des produits récupérés à la sortie de ce type de processus on passe généralement par une étude systématique de la liaison fonctionnelle qui relie la qualité du produit et les facteurs de l'installation. La précision des résultats de cette étude est fortement liée à la précision du modèle de la liaison fonctionnelle.

Dans cette étude nous avons présenté une comparaison entre deux modèles expérimentaux différents : un modèle polynomial (modèle linéaire) et un modèle non linéaire (à base de réseaux de neurones). La conclusion la plus importante à retenir de cette partie du travail est représenté par le point suivant : les modèles linaires peuvent prédire le comportement des processus de séparation électrostatiques autour d'un point de fonctionnement optimal avec une précision acceptable. La qualité prédictive des modèles peut diminuer considérablement lorsque la plage de variation des facteurs est relativement grande. Dans ce cas il est envisageable d'exploiter des modèles non linéaires. Le modèle optimal qui représente généralement le meilleur

rapport entre la qualité prédictive et la qualité de généralisation peut être obtenu par l'application d'une méthode de régularisation appropriée.

La valeur optimale des facteurs peut être obtenue par l'optimisation du modèle de l'installation. L'application de la méthode des AG nous a donné la possibilité de définir la solution globale qui satisfait les contraintes imposées sur les valeurs des variables de contrôle de l'installation.

L'utilisation d'une stratégie de contrôle basée sur l'exploitation des modèles non linéaires de l'installation et une méthode d'optimisation globale a donné des résultats prometteurs. La validation de l'ensemble des résultats de simulation obtenue exige une application en temps réel de la méthode de contrôle proposée dans cette étude. La réalisation de cette étude exige le développement des processus capables de mesurer en temps réel la qualité d'une séparation électrostatique.

Les perspectives de cette étude peuvent être centrées autour de la mise en œuvre de la méthode de contrôle sur site. Pour atteindre ce but on peut envisager une étude qui vise :

- 1- Développement des processus de mesure de la qualité des produits récupérés à la sortie d'un séparateur électrostatique en temps réel ;
- 2- Identification expérimentale des modèles dynamiques des sous-systèmes de l'installation.

Références

- [1] L.I. Blake, L.N. Morcher, (1901) '*Process of electrical separation of conductors from non-conductor*', Lucian I. Blake and Lawrence N. Morscher, United States Patent Office, USA668791.
- [2] C.H. Huff. (1904) '*Apparatus for electrostatic separation of substances of diverse electric susceptibilities*', Charles H Huff, United States Patent Office, USA801380 .
- [3] Carpco Res & Engineering Inc , (1964) '*High tension separator*', Carpenter James H, United States Patent Office, US3370703 A.
- [4] Al. Iuga, S. Vlad, M. Mihailescu, L. Dascalescu, (2004) '*A laboratory plate/screen-type electrostatic separator for granular mixtures: design, engineering, and application*'. *Part. Sci. Technol.* 22, 275-283.
- [5] L. Dascalescu, R. Morar, Al. Iuga, A. Samuila, V. Neamtu, (1998) '*Electrostatic separation of insulating and conductive particles from granular mixes*', *Part. Sci. Technol.* 16, 25-42.
- [6] A. Tilmatine, K. Medles, S.E. Bendimerad, F. Boukholda, L. Dascalescu, (2009) '*Electrostatic separators of particles: Application to plastic/metal, metal/metal and plastic/plastic mixtures*', *Waste Management* 29, 228–232.
- [7] K. Medles, L. Dascalescu, A. Tilmatine, A. Bendaoud M. Younes, (2007) '*Experimental Modeling of the Electrostatic Separation of Granular Materials*', *Particulate Science and Technology*, 25:2, 163-171, DOI: 10.1080/02726350701257816.
- [8] J.K. Lee, J.H. Shin, (2002) '*Triboelectrostatic separation of PVC materials from mixed plastics for waste plastic recycling*'. *Korean J. Chem. Eng.* 19, 267–272.
- [9] J. Li, Z. Xu, Y. Zhou, (2007) '*Application of corona discharge and electrostatic force to separate metals and nonmetals from crushed particles of waste printed circuit boards*' , *Journal of Electrostatics* 65 ,p.233–238.
- [10] H.S. Jeon, C.H. Park, B.G. Cho, J.K. Park, (2009) '*Separation of PVC and rubber from covering plastics in communication cable scrap by tribo-charging*'. *Sep. Sci. Technol.* 44, 190–202.
- [11] A. Benabboun, A. Tilmatine, Y. Brahami, S.E. Bendimerad, M. Miloudi, K. Medles, (2014) '*Experimental Investigation of Electrostatic Separators of Plastic Particles using Different Charging Devices*', *Separation Science and Technology*,vol 49,pp. 464–468.
- [12] L. Calin , A. Mihalcioiu, Al. Iuga, L. Dascalescu, (2007) "*Fluidized bed device for plastic granules triboelectrification*", *Part.Sci.& Technol.*, vol.25, p. 205-211.
- [13] I.I. Inculet, G.S.P. Castle, J.D. Brown, (1998) '*Electrostatic separation of plastics for recycling*'. *Part. Sci. Technol.* 16, 91-100.

- [14] Y. Brahami, A. Tilmatine, R. Ouiddir, A. Bendaoud, K. Medles, L. Dascalescu, (2015) '*Modeling of a New Triboelectrostatic Separation Process for Micronized Plastics*', IEEE trans, Ind, Appl. 51, p.4145-4150
- [15] A.M. Benhafssa, K. Medles, M.F. Boukhoulda, A. Tilmatine, S. Messal, L. Dascalescu, (2015) '*Study of a Tribo-Aero-Electrostatic Separator for Mixtures of Micronized Insulating Materials*', IEEE Trans. Ind. Appl., 51, 4166-4172
- [16] R. Morar, A. Iuga, L. Dascalescu , A. Samuila, (1993) '*Factors which influence the insulation-metal electro separation,*' *J. Electrostat.*, vol. 30, pp. 403- 412.
- [17] V. Neamtu, Al. Iuga, R. Morar, I. Suarasan, L. Dascalescu, (1993) '*Influence of high-voltage polarity on insulation-metal electro separation,*' *J. Electrostat.*, vol. 30, pp. 423-432.
- [18] L. Dascalescu, A. Samuila, A. Iuga, R. Morar, I. Csorvasy, (1994) '*Influence of material superficial moisture on insulation-metal electro separation,*' *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 30, pp. 844-852.
- [19] M. Mihailescu, A. Samuila, A. Urs, R. Morar, Al. Iuga, L. Dascalescu, (2002) '*Computer-assisted experimental design for the optimisation of electrostatic separation processes,*' *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 38, no. 5, pp. 1174–1181.
- [20] L. Dascalescu, A. Tilmatine, F. Aman, M. Mihailescu, (2004) '*Optimisation of Electrostatic Separation Processes Using Response Surface Modelling*' *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol.40, pp. 53-59.
- [21] K. Medles, A. Tilmatine, F. Miloua, A. Bendaoud, M. Younes, M. Rahli, L. Dascaluscu, (2007) '*Set Point Identification and Robustness Testing of Electrostatic Separation Process,*' *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 43, pp. 618-626.
- [22] M. Younes, A. Tilmatine, K. Medles, L. Dascalescu, (2008) '*Fuzzy Control of an Electrostatic Separation Process,*' *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 44, pp. 09-14.
- [23] O. Dahou, K. Medles, S. Touhami, M.F. Boukhoulda, A. Tilmatine, L. Dascalescu, (2011) '*Application of genetic algorithms to the optimization of a roll-type electrostatic separation process*' *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 47, pp 2218-2223.
- [24] H.M. Veit, A.M. Bernardes, (2015) '*Electronic Waste : Generation and Management* ', (H.M. Veit, and A.M . Bernardes, Eds), pp 3-12, Springer, NY.
- [25] M. Goosey, (2012) '*Waste electrical and electronic equipment (WEEE) handbook: The materials of WEEE* ', (V. Goodship and L. N. Stevels, Eds), pp 123-144, Woodhead,UK.
- [26] K. Makenji , M. Savage, (2012) '*Waste electrical and electronic equipment (WEEE) handbook : Mechanical methods of recycling plastics from WEEE* ', (V. Goodship and L. N. Stevels, Eds), pp 212-238, Woodhead,UK.
- [27] A.C. Kasper, N. Cristina, F. Juchneski , H.M. Veit, (2015) '*Electronic Waste : Mechanical Processing*', (H.M. Veit, and A.M . Bernardes, Eds), pp 19-38, Springer, NY.
- [28] A.C. Kasper, A.P. Gabriel, E.L.B. de Oliveira, N.C. de Freitas Juchneski , H.M. Veit, (2015) '*Electronic Waste : Electronic Waste Recycling*', (H.M. Veit, and A.M . Bernardes, Eds), pp 87-127, Springer, NY.

- [29] W. Schubert, J. Tomas, (2007) '*Liberation of valuables embedded in particle compounds and solid waste*'. Hand book Powder Technol. 12 . pp 989–1017.
- [30] S. Zhang, E. Forsberg, (1999) '*Intelligent Liberation and classification of electronic scrap*', Powder Technol. 105. pp 295–301.
- [31] H. Masuda, K. Higashitani, H. Yoshida, (2007) '*Powder technology : handling and operations, process instrumentation, and working hazards*'. Taylor and Francis Group.
- [32] K. Freegard, G. Tan, S. Frisch, (2007) '*Final Report : WEEE Plastics Separation Technologies*', Axion recycling Ltd.
- [33] Phoenix Technologies, L.P. (2004) '*Granulator*', T. S. Hart, J. L. Ritchie, United States Patent Office, US 6749138 B2.
- [34] J.E. Lawver, W.P. Dyrenforth, (1973) '*Electrostatics and Its Applications*' A.D. Moore, Ed., pp. 221-249, Wiley, New York.
- [35] C.B. Gill, (1991) '*Materials Beneficiation*' Springer, Berlin.
- [36] M. Goosey, R. Kellner, (2003) '*Recycling technologies for the treatment of end of life printed circuit boards (PCBs)*'. *J. Circuit World* 29, 33-37.
- [37] S. Vlad, Al. Iuga, L. Dascalescu, (2000) '*Modelling of conducting particle behaviour in plate-type electrostatic separators*'. *J. Phys. D : Appl. Phys.*, 33, 127-133.
- [38] S. Vlad, Al. Iuga, L. Dascalescu, (2003) '*Numerical computation of conducting particle trajectories in plate-type electrostatic separators*'. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 39, 66-71.
- [39] A. Younes , H. Sayah , M. Younes , A. Samuila , L. Dascalescu, (2010) '*Behavior of Conducting Particles in a New Electrostatic Separator with Two High-Voltage Electrodes*', *Particulate Science and Technology*, 28:3, 207-216.
- [40] A. Tilmatine, (2004) '*Etude et réalisation d'un séparateur électrostatique des mélanges granulaires*', Thèse de doctorat d'état à l'Université de Sidi Bel-Abbès.
- [41] S. Touhami, K. Medles, O. Dahou, A. Tilmatine, A. Bendaoud, L. Dascalescu, (2013) '*Modeling and Optimization of a Roll-Type Electrostatic Separation Process Using Artificial Neural Networks*' *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, pp 1773-1780.
- [42] J. Li, Z. Xu, Y. Zhou, (2007) '*Application of corona discharge and electrostatic force to separate metals and nonmetals from crushed particles of waste printed circuit boards*' , *Journal of Electrostatics* 65 ,p.233–238.
- [43] S. Das, K. Medles, M. Younes, C. Dragan, L. Dascalescu, (2007) '*Separation of Fine Granular Mixtures in S-Plate-Type Electrostatic Separators*', *IEEE trans, Ind, Appl.* vol. 43, pp 1137-1143.
- [44] T. Zeghloul, S. Touhami, G. Richard, M. Miloudi, O. Dahou, and L. Dascalescu, (2015) '*Corona-assisted plate-type electrostatic separation process for granular plastic wastes*'. *Conf. Rec. IEEE/IAS Annual Meeting*, Dallas, October 18-22 2015.
- [45] W.R. Harper, (1967) '*Contact and Frictional Electrification*', London: Oxford University Press.
-

- [46] L. Dascalescu, A. Samuila, Al. Iuga, R. Köhnlechner, (2012) ‘*Electrostatic separation technologies for waste electric and electronic equipment (WEEE) recycling. Entrepreneurial opportunities*’ *Environmental Engineering & Sustainable Development Entrepreneurship*, vol. 1, pp. 5 – 11.
- [47] G.S.P. Castle, (1997) ‘Contact charging between insulators,’ *J. Electrostat.*, vol. 40&41, pp. 13-18.
- [48] S. Trigwell, N. Grable, C.U. Yurteri, R. Sharma, M.K. Mazumder, (2001) ‘*Effects of surface properties on the tribocharging characteristics of polymer powder as applied to industrial processes*’. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 3, pp.1941 – 1945.
- [49] S. Trigwell, M.K. Mazumder, R. Pellissier, (2001) ‘*Tribocharging in electrostatic beneficiation of coal: Effects of surface composition on work function as measured by X-ray photoelectron spectroscopy and ultraviolet photoelectron spectroscopy in air*’. *J. Vac. Sci. Tech*, vol.19, pp. 1454-1459.
- [50] W.D. Greason, I.I. Inculet, (1975) ‘*Insulator work function determination from contact charging with metals*’. *Conf. Rec. 1975 IEEE-IAS Ann. Meet.*, pp. 428-435.
- [51] R.K. Dwari, K.H. Rao, (2009) ‘*Fine coal preparation using novel tribo-electrostatic separator*’, *Minerals Engineering*, vol 22, Elsevier Ltd , pp.119–127.
- [52] L. Calin , A. Mihalcioiu, Al. Iuga, L. Dascalescu, (2007) “*Fluidized bed device for plastic granules triboelectrification*”, *Part.Sci.& Technol.*, vol.25, p. 205-211.
- [53] Al. Iuga, A. Samuila, R. Morar, M. Bilici, L. Dascalescu, (2015) ‘*Tribocharging techniques for the electrostatic separation of granular plastics from waste electric and electronic equipment*’. *Part. Sci. & Technol.*, DOI:10.1080/02726351.2015.1043675.
- [54] J.K. Lee, J.H. Shin, (2002) ‘*Triboelectrostatic separation of PVC materials from mixed plastics for waste plastic recycling*’. *Korean J. Chem. Eng.* 19, 267–272.
- [55] Al. Iuga, L. Calin, V. Neamtu, A. Mihalcioiu, L. Dascalescu, (2005) ‘*Tribocharging of plastics granulates in a fluidized bed device*’. *J. Electrostat.* 63, 937-942.
- [56] W. Aksa, K. Medles, M. Rezoug, M.F. Boukhoulda, M. Bilici, L. Dascalescu,(2013) ‘*Two stage electrostatic separator for the recycling of plastics from waste electrical and electronic equipment*’ *Journal of Electrostatics*, vol 71, p 681-688.
- [57] M. Rezoug, R. Ouiddir, W. Aksa, K. Medles, M. Bilici, L. Dascalescu, (2015) ‘*Tribo-aero-electrostatic separator for ternary mixtures of granular plastics*’. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 51, 1161-1167.
- [58] M.F. Boukhoulda, K. Medles, M. Miloudi, A. Tilmatine, A. Bendaoud, L. Dascalescu, (2013) ‘*Effect of Ambient Humidity on the Outcome of electrostatic Separation Process for Mixed Granular Polymers*’, *IEEE/IAS annual meeting*, October 6-10, Orlando, FL USA.
- [59] J. wu, J. Li, Z.M. Wu, (2009) ‘*a new two –roll electrostatic separator for recycling of metals and nonmetals from waste printed circuit board*’. *Journal of hazardous materials* 161, p.207-262.

- [60] M. Miloudi, M. Remadnia, C. Dragan, K. Medles A. Tilmatine, L. Dascalescu. (2013) '*Experimental study of the optimum operating conditions of a pilote-scale tribo-aero-electrostatic separator of mixed granular solids*'. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 49, 699-706.
- [61] S.E. Bendimerad. (2013) '*Etude et réalisation d'un procédé de séparation triboélectrique des particules isolantes*', Thèse Doctorat .Univ.SBA.
- [62] W. Aksa, (2014) '*Réalisation et étude d'un séparateur aérodynamique semi-industriel pour la récupération de particules isolantes*', Thèse Doctorat .Univ.SBA.
- [63] M. Miloudi, (2012) '*Application de la Charge par Effet Triboélectrique des Matériaux Granulaires dans la Séparation Electrostatique*', Thèse Doctorat .Univ.SBA
- [64] M.F. Boukhoulda, (2014) '*Séparation Electrostatique Des Matériaux Plastiques Provenant Des Equipements Informatiques en Utilisant La Triboélectrisation*', Thèse Doctorat .Univ.SBA
- [65] L. Dascalescu, Al. Iuga, R. Morar, (1993) '*Corona-electrostatic separation: an efficient technology for the recovery of metals and plastics from industrial wastes*'. *Magnetic and Electrical Separation*, 4, 241-255.
- [66] E. Walter, L. Pronzato, (1994) '*Identification de modèles paramétriques à partir de données expérimentales*,' Editions Masson, Paris.
- [67] M. Miloudi, K. Medles, A. Tilmatine, M. Brahami, L. Dascalescu, (2011) '*Optimization of belt-type electrostatic separation of granular plastic mixtures tribocharged in a propeller-type device*'. *Journal of Physics: Conference Series* , vol. 301; N°1.
- [68] R.M. Miller, K. Itoyama, A. Uda, H. Takada, N. Bhat, (1997) '*Modeling and control of a chemical waste water treatment plant*'. *Computers and Chemical Engineering*, 21, Supplement 1, S 947-52.
- [69] I. Rivals , L. Personnaz, (1995) '*Black Box Modeling With State Neural Networks*,' In *Neural Adaptive Control Technology* I.R. Zbikowski and K.J. Hunt eds., World Scientific.
- [70] N.A. Thikonov, (1963) '*On solving ill posed problems and method of regularization*'. *Doklady Akademiia Nauk SSSR*, vol.153, pp.501-504.
- [71] J. Goupy, (1999) '*Plan d'expériences pour surface de réponse*', Dunod, Paris.
- [72] T.F. Coleman, C.V. Loan, (1988) '*Handbook for matrix computations*', SIAM publications, Philadelphia, pp. 264, QA188.C65 44,416.
- [73] W. Hackbusch, (1994) '*Iterative solution of large sparse systems of equations*', Springer-Verlag, New York, pp. 429, vol. 95 482.
- [74] J. Faucher, (2006) '*Les plans d'expériences pour le réglage de commandes à base de logique floue*' Thèse Doctorat, institue nationale polytechnique de Toulouse. France.
- [75] V. Kecman, (2001) '*Learning And Soft Computing : Support Vector Machines, Neural Networks, and Fuzzy Logic Models*', MIT Press, USA.

- [76] A.G. Looney, (1996) "Advances in feedforward neural networks: demystifying knowledge acquiring black boxes," *IEEE Trans. Knowledge & Data Eng.*, vol. 8, pp. 211–220.
- [77] A.N. Kolmogorov, (1957) 'On the representation of continuous functions of several variables by superposition of continuous functions of one variable and addition,' *Doklady Akademiia Nauk SSSR*, vol.114, pp. 953-956.
- [78] V. Kurkova, (1992) 'Kolmogorov's theorem and multilayer neural networks,' *Neural Networks*, vol. 5, pp. 501-506.
- [79] G. Cybenko, (1989) 'Approximation by Superposition of a Sigmoidal Function.' *Mathematics of control, signals and systems*, Vol. 2, pp. 303-314.
- [80] A.R. Barron, (1993) 'Universal Approximation Bounds for Superpositions of a Sigmoidal Function.' *IEEE Transactions on Information Theory IT-39*, pp. 930-945.
- [81] F. Girosi, M. Jones, T. Poggio, (1995) 'Regularization Theory and Neural Networks Architectures.' *Neural Computation*, Vol. 7, No. 2, pp.219-269.
- [82] R. Fletcher, (1981), 'Practical Methods of Optimization: Constrained Optimization', vol. 2, Wiley, New York.
- [83] B.S. Gottfried, J. Weisman, (1973) 'Introduction to Optimization Theory,' Prentice-Hall, Englewood N.J. Cliffs.
- [84] P.R. Adby, M.A.H. Dempster, (1974) 'Introduction to Optimization Methods,' Chapman and Hall, London.
- [85] M.S. Bazaraa, C.M. Shetty, (1979) 'Nonlinear Programming, Theory and Algorithms', Wiley, New York.
- [86] P.E. Gill, W. Murray, M.H. Wright, (1981) 'Practical Optimization', Academic Press, London,
- [87] R. Fletcher, (1980) 'Practical Methods of Optimization: Unconstrained Optimization', vol. 1, Wiley, New York.
- [88] T. Back, D.B. Fogel, Z. Michalewicz, (1996) 'Handbook of Evolutionary Computation,' University Oxford Press, New York.
- [89] C.T. Kelley, (1999) 'Iterative Methods for Optimization', SIAM, Philadelphia.
- [90] C. Lemaréchal, 'Optimisation continue', *Techniques de l'Ingénieur*, S 7 210.
- [91] Z. Michalewicz, (1992) 'Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs.' In *Artificial Intelligence*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- [92] O. Dahou, (2014) 'la mise au point d'algorithmes de commande optimale des processus électrostatiques en utilisant les méthodes de l'intelligence artificielle', Thèse Doctorat .Univ.SBA.
- [93] -----, (1982) 'Projected Newton methods for optimization problems with simple constraints,' *SIAM J. Control Optim.*, 20, pp. 221–246.

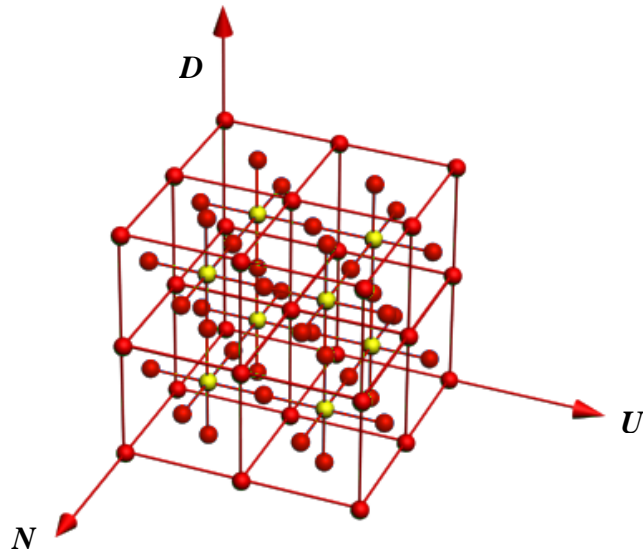
- [94] D.F. Shanno, (1970) 'An accelerated gradient projection method for linearly constrained nonlinear estimation'. *SIAM J. Appl. Math.* 18:322–334.
- [95] P.H. Calamai, J. Moré, (1987) 'Projected gradient methods for linearly constrained problems,' *Math. Programming*, 39, pp. 93–116.
- [96] J.W. Daniel, (1967) 'The conjugate gradient method for linear and nonlinear operator equations,' *SIAM J. Numer. Anal.*, 4, pp. 10–26.
- [97] -----,(1967) 'Quasi-Newton methods and their application to function minimization,' *Math. Comp.*, 21, pp. 368–381.
- [98] W.A. Gruver, E. Sachs, (1980) 'Algorithmic Methods in Optimal Control,' Pitman, London.
- [99] J.A. Nelder, R. Mead,(1965) 'A simplex method for function minimization'. *Comput. J.* 7:308–313.
- [100] R.L. Haupt, S.E. Haupt, (2004) 'Practical Genetic Algorithms', 2nd ed., Wiley, New York,US.
- [101] R.L. Haupt, D.H. Werner , (2007) 'Genetic algorithms in electromagnetics', John Wiley & Sons, New Jersey,US.
- [102] L.J. Fogel, A.J. Owens, M.J. Walsh, (1966) 'Artificial Intelligence through Simulated Evolution,' Wiley, New York, US.
- [103] J.H. Holland, (1975) "Adaptation in Natural and Artificial Systems," University of Michigan Press.
- [104] K.A. De Jong, (1975) 'Analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems'. Ph.D. Dissertation. University of Michigan, Ann Arbor.
- [105] S. Forrest, (1993) "Genetic algorithms: Principles of natural selection applied to computation," *Science*, vol. 261, no. 5123, pp. 872–878.
- [106] D.E. Goldberg, (1989) 'Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Reading,' Addison-Wesley.
- [107] M. Mitchell, (1996) 'An Introduction to Genetic Algorithms'. MIT Press, Cambridge.
- [108] J.D. Schaffer, & al., (1989) 'A study of control parameters affecting online performance of genetic algorithms for function optimization'. In J.D. Schaffer (ed.), *Proc. 3rd Int. Conf. on Genetic Algorithms*. Los Altos, CA: Morgan Kaufmann, pp. 51–60.

Annexe I

A.I.1. Base de données utilisé dans : Régression/Apprentissage /Validation.

Base de données expérimentales (Régression/Apprentissage)	N° d'expérience	N [tr/min]	U [kV]	D (kg/h)	Y _{mes} [%]
	1	60	26	6	78,73
	2	100	26	6	74,39
	3	60	30	6	87,62
	4	100	30	6	75,25
	5	60	26	12	43,15
	6	100	26	12	19,48
	7	60	30	12	58,12
	8	100	30	12	73,87
	9	60	28	9	66,89
	10	100	28	9	74,17
	11	80	26	9	62,68
	12	80	30	9	75,49
	13	80	28	6	94,11
	14	80	28	12	57,98
	15	80	28	9	73,3
	16	60	26	9	57,54
	17	60	27	7,5	77,73
	18	60	27	10,5	48,05
	19	60	28	6	93,69
	20	60	28	12	52,17
	21	60	29	7,5	83,79
	22	60	29	10,5	59,31
	23	60	30	9	69,1
	24	70	26	7,5	72,93
	25	70	26	10,5	46,08
	26	70	27	6	90,52
	27	70	27	9	63,86
	28	70	27	12	45,42
	29	70	28	7,5	86,65
	30	70	28	10,5	58,88
	31	70	29	6	96,14
	32	70	29	9	71,71
	33	70	29	12	60,05
34	70	30	7,5	81,89	

	35	70	30	10,5	64,05
	36	80	26	6	80,83
	37	80	26	12	40,75
	38	80	27	7,5	81,6
	39	80	27	10,5	54,06
	40	80	29	7,5	86,91
	41	80	29	10,5	68,1
	42	80	30	6	87,42
	43	80	30	12	66,97
	44	90	26	7,5	73,01
	45	90	26	10,5	40,06
	46	90	27	6	83,6
	47	90	27	9	67,33
	48	90	27	12	38,58
	49	90	28	7,5	84,9
	50	90	28	10,5	63,4
	51	90	29	6	85,65
	52	90	29	9	76,09
	53	90	29	12	68,22
	54	90	30	7,5	77,37
	55	90	30	10,5	72,02
	56	100	26	9	60,89
	57	100	27	7,5	74,76
	58	100	27	10,5	45,15
	59	100	28	6	83,37
	60	100	28	12	55,95
	61	100	29	7,5	76,22
	62	100	29	10,5	70,4
	63	100	30	9	74,49
Données de validation	64	70	27	7,5	81,55
	65	70	27	10,5	50,81
	66	70	29	7,5	87,52
	67	70	29	10,5	62,78
	68	90	27	7,5	78,89
	69	90	27	10,5	48,88
	70	90	29	7,5	81,8
	71	90	29	10,5	70,18



Base de données utilisé dans la Régression / Apprentissage (point rouge ●) et la mesure de la qualité de généralisation (point jaune ●)

A.I.4. La réponse du modèle linéaire élaboré à partir des expériences {1-16, 19, 20, 23, 36, 37, 42, 43, 56, 59, 60, 63}

<i>Expérience</i> <i>N°</i>	<i>n</i> <i>[tr/min]</i>	<i>u</i> <i>[kV]</i>	<i>d</i> <i>[kg/min]</i>	<i>Y_{mes}</i> <i>[%]</i>	<i>Y_{cal}</i> <i>[%]</i>	<i>E</i> <i>[%]</i>
1	60	26	6	78,73	76,55	2,18
2	100	26	6	74,39	74,86	-0,47
3	60	30	6	87,62	93,20	-5,58
4	100	30	6	75,25	91,52	-16,27
5	60	26	12	43,15	44,66	-1,51
6	100	26	12	19,48	42,98	-23,50
7	60	30	12	58,12	61,32	-3,20
8	100	30	12	73,87	59,63	14,24
9	60	28	9	66,89	68,93	-2,04
10	100	28	9	74,17	67,25	6,92
11	80	26	9	62,68	59,76	2,92
12	80	30	9	75,49	76,42	-0,93
13	80	28	6	94,11	84,03	10,08
14	80	28	12	57,98	52,15	5,83
15	80	28	9	73,3	68,09	5,21
16	60	26	9	57,54	60,60	-3,06
19	60	28	6	93,69	84,87	8,82
20	60	28	12	52,17	52,99	-0,82
23	60	30	9	69,1	77,26	-8,16
36	80	26	6	80,83	75,70	5,13
37	80	26	12	40,75	43,82	-3,07

Annexe

42	80	30	6	87,42	92,36	-4,94
43	80	30	12	66,97	60,47	6,50
56	100	26	9	60,89	58,92	1,97
59	100	28	6	83,37	83,19	0,18
60	100	28	12	55,95	51,30	4,65
63	100	30	9	74,49	75,57	-1,08

Annexe II

A.II.1. Méthode de Nelder & Mead

a) Triangle initiale

Dans un problème d'optimisation à deux dimensions, la méthode de Nelder Mead exige la disponibilité d'un triangle initiale dont les sommets sont définis par $V^k(x_1^k, x_2^k)$. $k=1,2,3$. La fonction $f(x_1, x_2)$ a minimisé est évalué dans chaque sommet $z^k = f(x_1^k, x_2^k)$. Les indices des sommets sont réordonnés pour satisfaire la condition $z_1 \leq z_2 \leq z_3$. Pour simplifier l'identification des vertex on utilise la notation suivante :

$$B = (x_1^1, x_2^1) ; G = (x_1^2, x_2^2) ; W = (x_1^3, x_2^3)$$

B « *Best* » : meilleur solution ; G « *Good* » : bonne solution ; W « *Worst* » la mauvaise solution ;

Le point milieu entre les deux points retenue dans chaque itération est définie par :

$$M = \frac{B+G}{2} = \left(\frac{x_1^1 + x_1^2}{2}, \frac{x_2^1 + x_2^2}{2} \right) \quad (\text{III.04})$$

Pour assurer la convergence ver la solution optimale la méthode de Nelder-Mead utilise quatre opérations de base : Réflexion ; Contraction ; Expansion ; Rétrécissement.

b) Réflexion

Puisque la valeur de fonction objective diminue dans les deux sens \overrightarrow{WB} et \overrightarrow{WG} donc-il possible que la fonction possède une faible valeur dans l'autre côté de la ligne **BG**. Pour tester la valeur de la fonction objective dans cette zone on détermine d'abord un point **R** qui représente la réflexion du point **W** par rapport à la ligne **BG**.

$$R = M + (M - W) = 2M - W \quad (\text{III.05})$$

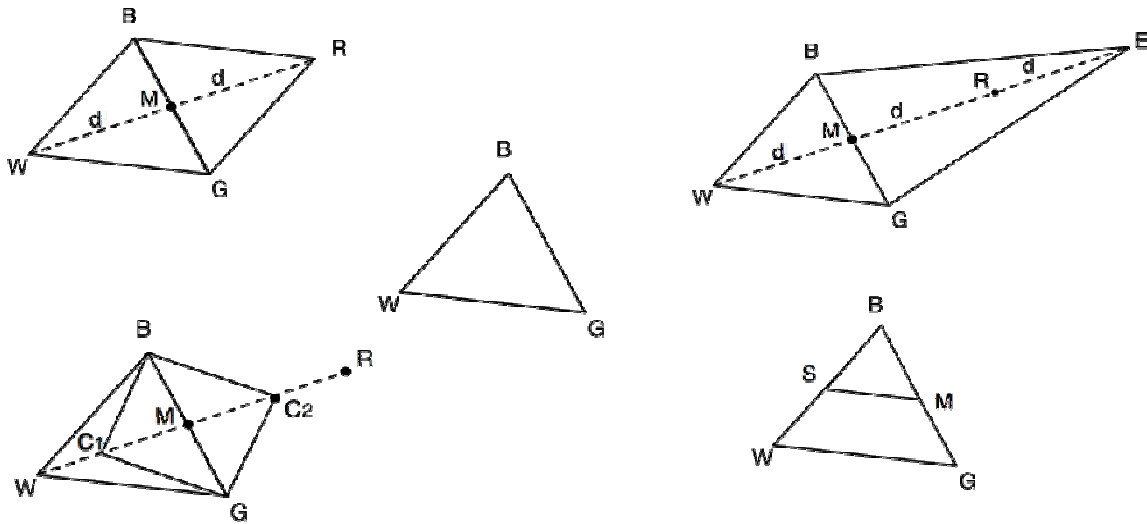
c) Expansion

Si la valeur de fonction objective ou point **R** est plus petite que la valeur de fonction au point **W**, alors le déplacement du triangle ver le minimum se fait suivant la bonne direction dans ce cas on prolonge la ligne **WR** avec une distance additionnel

de longueur WM jusqu'au point E . cette opération donne un nouveau triangle BGE . Le point E est déterminé par la formule :

$$E = E + (R - M) = 2R - M \quad (\text{III.06})$$

Si la valeur de fonction objective au point E est inférieure par rapport à la valeur de la fonction au point R , alors la solution E est retenue a la place de R .



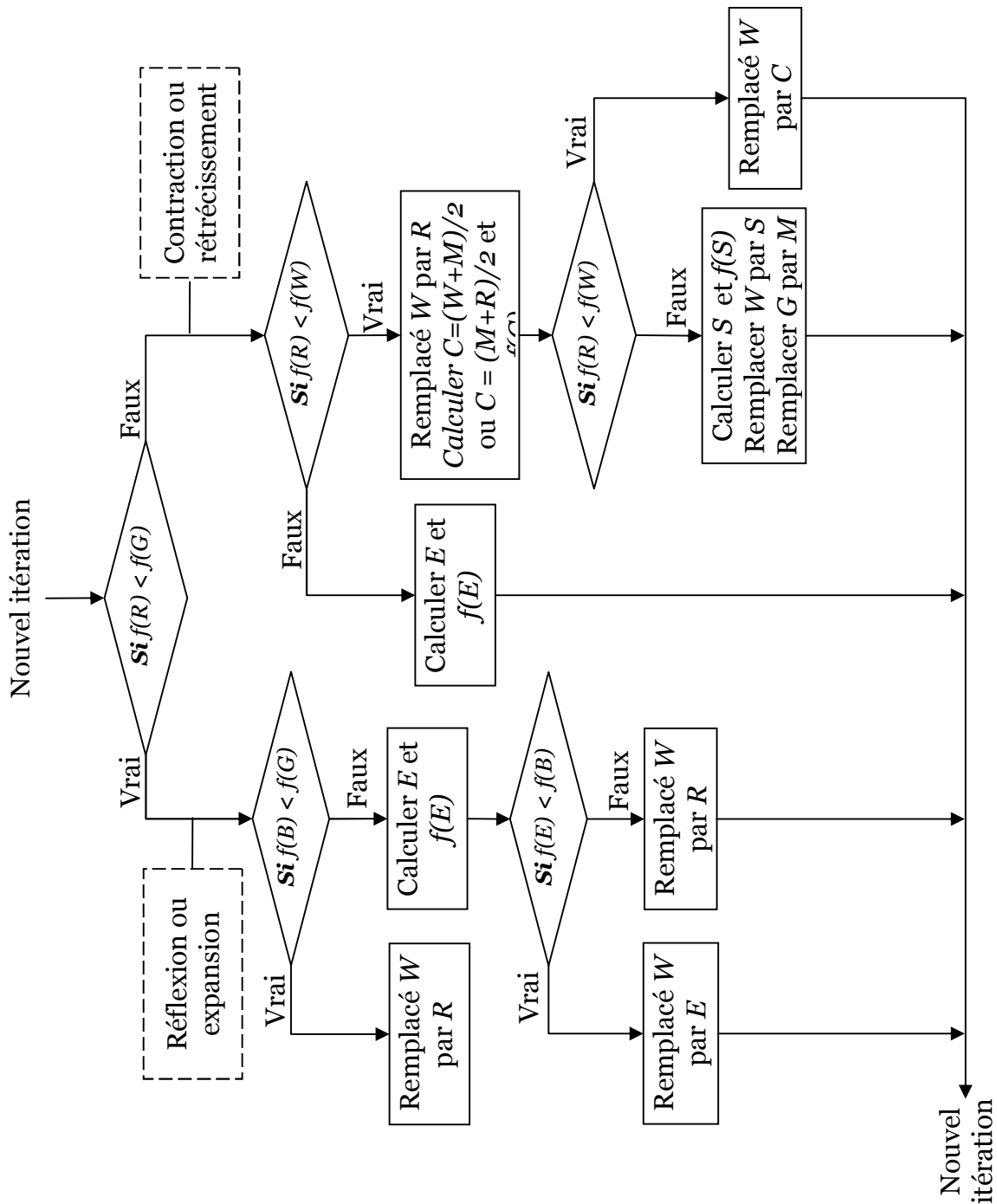
Opérations de base utilisée dans la méthode de Nelder-Mead

d) Contraction

Si la valeur de la fonction objective au point R et W sont identiques, on examine la valeur de la fonction au point M . si la valeur de la fonction est plus faible dans le point M alors on détermine deux points $C1$ et $C2$ qui représentent respectivement les points milieu du segment WM et MR . Le point avec la plus faible valeur de f est nommé C . donc le triangle retenu dans cette étape est définie par les points BGC .

e) Rétrécissement

Si la valeur de fonction au point W est plus faible que la valeur au point C , alors, les points G et W doivent être rétréci vers B . Le point G est remplacé par M , et W est remplacé par S , qui représente le point milieu du segment BW .



Organigramme de la méthode de Nelder Mead

A.II.3. Opérateurs génétiques

a) La sélection

La sélection crée une population intermédiaire constituée de copies des individus de la population courante. Le nombre de copies d'un individu est lié

directement à la fitness relative de l'individu au sein de la population. Dans la méthode de la *sélection par roulette* chaque individu est copié dans la nouvelle population proportionnellement à sa fitness f_i . La sélection est effectuée par un tirage avec remise d'individu existant dans la population actuel. Ainsi la probabilité de sélection d'un individu de fitness f_i dans la nouvelle population de taille N_{pop} est :

$$P_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^{N_{pop}} f_i}$$

Les individus ayant une grande fitness relative ont donc plus de chance d'être sélectionnés. On parle alors de sélection proportionnelle. Le nombre de copies espérées pour chaque individu qui va résulter de la sélection est alors égal à :

$$n_i = \frac{f_i}{\frac{1}{N_{pop}} \sum_{i=1}^{N_{pop}} f_i}$$

Cette méthode peut favoriser la dominance d'un individu qui n'est pas forcément le meilleur. Cette dominance peut engendrer une perte de diversité de l'information. Pour pallier cet inconvénient, on préfère souvent l'utilisation des méthodes qui n'autorisent en aucun cas la convergence prématuré ver une solution locale. La sélection par tournoi représente l'une des méthodes utilisées dans ces cas-là. Dans cette méthode on tire deux individus aléatoirement à partir de la population actuelle. On reproduit le meilleur des deux dans la nouvelle population. On répète la procédure jusqu'au ce que la nouvelle population soit complète.

b) Croisement

Le croisement permet de créer de nouveaux individus par l'échange d'information entre les individus de la population courante. Cette population est divisée en deux sous populations de même taille ($N_{pop}/2$) et chaque couple formé par un membre provenant de chaque sous population participe à un croisement avec une probabilité (P_c). Si le croisement a eu lieu entre deux individus parents, on tire aléatoirement une position de chacun des parents. On échange ensuite les deux sous

chaînes terminales de chacun des chromosomes, ce qui produit deux enfants et comme indiqué sur la figure suivante :

Parent 01 : 1001111010|111001 → Enfant 01 : 1001111010|111100
 Parent 02 : 0010101110|111100 → Enfant 02 : 0010101110|111001

Croisement a un seul point

c) Mutation

Le rôle de cet opérateur est de modifier aléatoirement la valeur d'un bit dans le chromosome d'un individu. Un individu sélectionné subit une mutation avec une probabilité (P_m). Si la mutation a eu lieu on tire aléatoirement une position dans la chaîne binaire du chromosome de l'individu. Le bit de cette position est remplacé par son complémentaire. Dans l'exemple de la figure suivante, une mutation a eu lieu sur le cinquième bit du chromosome de l'individu et elle a transformé ce bit de 1 en 0.

Individu i « Avant mutation » : 0 1 1 1 0 1 0 0 0 1
 Individu i « Après mutation » : 0 1 1 1 0 0 0 0 0 1

Opérateur Mutation

Résumé

A l'heure actuelle, les processus de la séparation électrostatique sont exploités dans différents domaines dont on peut citer la récupération des déchets des équipements électriques et électroniques (DEEE), qui représente l'axe principal visé en Algérie vu l'évolution de la consommation de ces équipements qui ne cesse d'accroître.

Pratiquement, ces types de processus peuvent être exploités dans la récupération des produits usés après leurs broyages, on les séparant par familles (isolants/conducteurs ; conducteur/conducteur ; isolant/isolant) pour pouvoir enfin les réinjecter dans la fabrication de nouveaux produits, ce qui va contribuer à la préservation des ressources primaire et de l'environnement.

Vu leurs faible consommation d'énergie électrique, leurs grande efficacité de récupération (jusqu'à 99%) et leur longue durée de vie, les processus de séparation sont connues en tant que les processus les plus efficaces utilisés dans la séparation des produits granulaires en fonction de leur conductivités électriques. Cependant, ils restent toujours très sensibles aux paramètres du produit à séparer, aux paramètres environnement et aux paramètres contrôlable et non contrôlables de l'installation elle-même. Dans ce contexte, L'étude et la mise au point des stratégies et des systèmes de contrôle, destinées au pilotage de ce type d'installation, est devenue de plus en plus nécessaire pour minimiser les pertes de la qualité de séparation au cours d'une perturbation.

Mots clés : Séparation électrostatique – Modélisation paramétrique – réseaux de neurones - Optimisation global-algorithme génétique.

Abstract

At present, the process of electrostatic separation are operated in different areas which include the recovery of waste electrical and electronic equipment (WEEE), which represents the main axis referred in Algeria saw the evolution of consumption death equipment continues to increase.

Practically, these types of processes can be exploited in the recovery of waste products after their grinding, one separated by families (insulators / conductors, conductor / conductor, insulator / insulator) to finally inject them back into the manufacturing of new products, which will contribute to the conservation of primary resources and the environment.

Because of their low electricity consumption, their high recovery efficiency (up 99%) and long service life, the separation process are known as the most efficient processes used in the separation of granular products function of their electrical conductivities. However, they are still very sensitive product parameters to separate, the surround parameters and controllable and uncontrollable parameters of the installation itself. In this context, the study and the development of strategies and control systems designed to control this type of installation, has become increasingly necessary to minimize loss of quality during separation of a disturbance.

Keywords : Electrostatic separation - Parametric modeling – Neural networks - Optimization Genetic algorithm.

ملخص

في الوقت الحالي يتم استغلال الفراز الكهروستاتيكي في عدة تطبيقات من بينها استرجاع المواد الموجودة في نفايات الاجهزة الكهربائية والإلكترونية. هذا التطبيق يمثل أحد المحاور الرئيسية المعول عليها في الجزائر للتصدي لمشكل ارتفاع نسبة النفايات المتعلقة بهذا النوع من الاجهزة.

عمليا يمكن استغلال الفراز الكهوستاتيكي لفرز مواد النفايات بعد تفكيكها. فرز هذه المواد يتم حسب الاصناف التالية مواد : عازلة / موصلة , عازلة / موصلة / موصلة. غالبا ما يتم اعادة تدوير هذه المواد و استعمالها في تصنيع منتجات جديدة الامر الذي يساهم في الحفاظ على الموارد الاولية و البيئة.

تعتبر اجهزة الفرز الكهروستاتيكي من بين اجهزة الفرز الاكثر كفاءة المستعملة في فرز المواد الحبيبية بدلالة ناقليتها الكهربائية و هذا نظرا لاستهلاكها المحدود للطاقة الكهربائية و قدرتها الاسترجاعية العالية (99%). مع ذلك فان جودة المواد المحصل عليها عن طريق هذا الجهاز تبقي جد حساسة لبعض المعاملات المتعلقة بالمواد المعالجة, بجهاز الفرز ومعاملات المحيط. للمحافظة على جودة المواد المحصل عليها بعد الفرز اصبح من الضروري على نحو متزايد دراسة و تحديد استراتيجيات وأنظمة التحكم التي تهدف الى قيادة هذا النوع من الاجهزة خلال تعرضه للاضطراب على مستوى بعض معاملات.

الكلمات المفتاحية : الفرز الكهروستاتيكي - الشبكات العصبية الاصطناعية - النمذجة البارامترية - تحديد الحلول المثلى - الخوارزميات الجينية.