

## CHAPITRE 1

### ÉTAT DE L'ART

« Que ton cœur ne soit pas vaniteux à cause de ce que tu connais; prends conseil auprès de l'ignorant comme auprès du savant, car on n'atteint pas les limites de l'art, et il n'existe pas d'artisan qui ait acquis la perfection. Une parole parfaite est plus cachée que la pierre verte; on la trouve pourtant au près des servantes qui travaillent sur la meule. »

L'Enseignement de Ptahhotep (2400 av. J.-C.)

#### 1.1 Introduction

Dans le cadre de cette thèse, nous avons l'occasion d'étudier l'avancement dans la recherche et l'état de l'art lié à l'étude de *frottement*<sup>1</sup> de point de vue modélisation et commande des systèmes mécaniques sous frottement. Le choix du modèle de frottement, qui fait l'objet du développement dans l'observateur de frottement associé au schéma de contrôle, est justifié en fait par une étude critique d'un ensemble assez vaste de modèles de frottement présentés dans la littérature et aussi de leurs applications dans le domaine de la commande.

Les domaines auxiliaires des applications que nous discutons pour développer notre approche de commande des servo-systèmes et de compensation du frottement présentent une diversification volontairement choisie; pour décortiquer les différents aspects du frottement dans différentes situations (ou scénarios) et accommoder le principe de la commande proposée dans ces cas, selon :

- la complexité de la structure mécanique (Cf. cas de l'application des systèmes robotiques étudié dans le chapitre 3);

---

<sup>1</sup> Ou, quasi-synonyme, *friction*. Résistance qui freine (frottement en marche) ou empêche (frottement au repos) le mouvement relatif de rotation ou de translation de deux corps en contact. Le frottement est dû surtout aux irrégularités des surfaces en contact (d'après [www.granddictionnaire.com](http://www.granddictionnaire.com)).

- la variation et l’incertitude du comportement de frottement (*Cf.* cas de l’application des actionneurs pneumatiques étudié dans les chapitres 4 et 5).

Une évaluation des travaux liés à ces domaines d’applications, en rapport avec les techniques de commande, est aussi discutée dans ce chapitre.

## 1.2 Étude du frottement

D’emblée, nous notons que la problématique de la commande de systèmes soumis au frottement est liée à celle de la conception du modèle de frottement. Pourtant, cette technique de compensation peut être réalisée aussi sans<sup>2</sup> utiliser de modèle de frottement.

### 1.2.1 Modélisation du frottement

La modélisation du frottement présente une étape crucialement importante dans l’étude (analyse, réalisation et amélioration) des servo-systèmes de précision; car une représentation mathématique (*i.e.* modélisation) précise du frottement garantit une meilleure prédiction et un meilleur choix de design des systèmes mécaniques (choix de matériaux et de lubrifiant) pour faciliter la compensation du frottement [35].

Pour répertorier les différentes méthodes de modélisation de frottement, deux différentes approches ont été proposées, par Al-Bender *et al.*, selon [23] :

- la motivation de la modélisation (ou le domaine d’application);
- les techniques (ou les moyens) utilisées et leur conception.

Nous distinguons aussi d’autres manières pour classer les techniques de modélisation selon :

- la chronologie de publication des travaux (c’est la méthode de classification la plus courante);

---

<sup>2</sup> Contrôler des servo-systèmes soumis au frottement avec des méthodes non-basées sur un modèle; par exemple, le contrôle à gain élevé (*Cf.* sous-section §1.2.2.1 dans ce chapitre).

- la nature des corps mis en contact :
  - contact solide-solide;
  - frottement entre un fluide (liquide ou gaz) et un solide;
  - frottement dans les fluides (liquide ou gaz).

Dans notre cas, et pour agir de concert avec le contexte de la présente thèse qui est consacrée à l'étude des servo-systèmes soumis au frottement, nous excluons, dans la suite, le cas de frottement dans les fluides. Et, nous combinerons les deux premières approches de classification avec le facteur chronologique pour décrire les différents modèles de frottement.

#### **1.2.1.1 Modélisation du frottement basée sur la physique**

Berger [3] a présenté une revue de littérature assez exhaustive, sur la modélisation de frottement des systèmes dynamiques à travers une large gamme de disciplines scientifiques et d'ingénieries comprenant la mécanique des contacts, la dynamique des systèmes, le contrôle des systèmes, l'aéromécanique, la géo-mécanique et la dynamique des structures [23, 36]. Selon cette approche, nous distinguons :

##### **Classe de modèles à l'échelle atomique et moléculaire**

« [...] Les deux corps subissent des déformations, généralement très petites, qui les mettent en contact suivant une petite portion de surface : ces déformations, permanentes si les corps sont en équilibre, sont variables quand les corps glissent les uns sur les autres; il se produit alors des vibrations moléculaires et il se développe également de la chaleur ou de l'électricité, dont la production absorbe une partie du travail des forces motrices. »

Paul Appell (1855 – 1930)  
Traité de mécanique rationnelle

Cette classe est développée grâce à la nano-technologie [23]. Les modèles moléculaires et atomiques sont décrits dans bon nombre de contributions; dont nous citons par exemple [37, 38].

### Classe de modèles à l'échelle des plaques tectoniques

Elle est liée à la géo-mécanique et la géophysique [23]. Selon la revue présentée par Al-Bender *et al.* [23, 36] il a été conclu que les tremblements de terre peuvent être causés par des instabilités de *broutage*<sup>3</sup> dues aux mouvements relatifs intermittents des plaques tectoniques [43]. Nous citons, entre autre, les modèles de Burridge et Knopoff [44] et de Rice et Ruina [45].

### Classe de modèles à l'échelle des aspérités

Notons d'abord que les dimensions de cette classe se situent entre les deux échelles précédentes (celle des atomes et celle des plaques tectoniques). Cette classe de modèles est utilisée largement dans les domaines du contrôle et de la *tribologie*<sup>4</sup> [23]. Cette classe de modèles a connue une évolution significative au fil des années; à partir de la *théorie des*

---

<sup>3</sup> Appelé aussi cycle limite de broutement, en anglais, *stick-slip motion* ou *chatter*. Il s'agit d'une forme de vibration élastique associée à la formation transitoire puis la rupture (ou séparation) transitoire du contact des jonctions inter-faciales à l'échelle microscopique. Il est vu aussi comme une alternance de glissements relatifs et de repos relatifs ou de pointes et de réactions de vitesses de glissement relatives intervenant de façon spontanée pendant un processus de frottement dynamique (d'après [www.granddictionnaire.com](http://www.granddictionnaire.com)). Ce comportement vibratoire est causé par le fait que le frottement est plus important à l'arrêt que pendant le mouvement [20]. Autrement, le broutement ne se produit pas, si le frottement statique est égal ou inférieur au coefficient de frottement cinétique. Ce comportement dépend de la nature des surfaces de contact, de la dynamique du système (*i.e.* caractéristiques élastiques : inertie, rigidité et amortissement) et de la vitesse de glissement [23, 36]. Notons que les premiers travaux portant sur cette caractéristique remontent à ceux de Den Hartog [39]. Aussi, les contributions de Pfeiffer *et al.* [40, 41] ont joué un rôle important dans le développement des formulations analytiques des oscillations de broutage dans le frottement. Finalement, dans les travaux de Karnopp [42], nous retrouvons les premières tentatives de simulation numérique de frottement en mode de broutage dans les systèmes dynamiques.

<sup>4</sup> Ce mot, construit étymologiquement à partir des racines grecques '*tribein*' (frotter) et '*logos*' (discours, étude), signifie science de frottement (son origine et ses effets) [23]. Proposé en 1968 par G. Salomon, il désigne la science qui étudie les phénomènes susceptibles de se produire lorsque deux corps en contact sont animés en mouvement relatif. Cette science, qui est relativement jeune, a connu des transformations fondamentales dans ses outils descriptifs et ses notions conceptuelles. Dans la littérature, nous distinguons essentiellement la *tribologie des surfaces* et la *tribologie des interfaces* (d'après [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org), site encyclopédique interactif).

*sphères*<sup>5</sup> de Bélidor [2] jusqu'à la *théorie synthétique*<sup>6</sup> de Kragelski [2]. Coulomb<sup>7</sup> [46] a constaté que toutes les surfaces, même parmi les plus lisses, présentent une certaine rugosité, à la limite qui doit être microscopique; autrement dissimulent des irrégularités et des aspérités<sup>8</sup> de différentes formes et dimensions. Il a aussi conclu que c'est l'interposition des aspérités qui est à l'origine des forces de frottement [46]. Plus tard, en se basant sur cette idée de la présence d'irrégularités dans les surfaces de contact et de forces interfaciales, Bowden et Tabor ont proposé un modèle qui permet d'interpréter bon nombre d'effets et de propriétés physiques tels que [1, 2, 47] :

- l'*adhésion*<sup>9</sup>;
- la formation et le cisaillement des micro-jonctions adhésives;
- le labourage des surfaces par les aspérités;
- la différence entre la surface réelle de contact et la surface apparente;

« Les surfaces impliquées dans un contact mécanique présentent une rugosité microscopique. Leurs contacts effectifs des surfaces impliquées mettent en jeu une population clairsemée de micro-contacts entre les aspérités des surfaces, dont l'aire totale réelle ne représente qu'une faible fraction de l'aire apparente. »

Jean-Marie Georges (2000)

Frottement, usure et lubrification : La tribologie ou science des surfaces

- et la relation entre la force de frottement et la charge.

<sup>5</sup> Selon Bernard Forest de Bélidor (1693 – 1761), les surfaces sont formées d'aspérités hémisphériques régulières, celles d'une surface devant être franchies par celles de l'autre (d'après [www.encyclopedie-enligne.com](http://www.encyclopedie-enligne.com)).

<sup>6</sup> Selon Kragelski, I. V. (1908 – 1989), le frottement a une double nature, mécanico-moléculaire. Il est déterminé par la déformation en volume du matériau et par le fait de surmonter les liens adhésifs (jonctions soudées) développés entre les parties de surfaces frottantes au contact (d'après [www.encyclopedie-enligne.com](http://www.encyclopedie-enligne.com)).

<sup>7</sup> Charles-Augustin de Coulomb (1736 – 1806) n'est guère le premier chercheur mais probablement le plus célèbre dans l'histoire, parmi les anciens, qui a étudié le frottement à l'échelle des aspérités.

<sup>8</sup> Ce sont les irrégularités dues à la rugosité des surfaces en contact.

<sup>9</sup> Ou collage, en anglais, *stiction* (d'après [www.granddictionnaire.com](http://www.granddictionnaire.com)). Il s'agit d'un aspect de frottement au démarrage. En dehors des interactions de type mécanique, ils existent des interactions de type moléculaire. Le rapprochement des atomes de deux solides, favorisé par une déformation plastique des micro-contacts, permet à des forces d'attraction moléculaire d'agir à travers l'interface; contribuant à la cohésion des solides et la création de jonctions adhésives [48]. Bien que l'adhérence résulte essentiellement de forces moléculaires limitées à l'interface, les propriétés mécaniques du matériau influence le coefficient d'adhérence.

Pour récapituler, le frottement est représenté par le paradigme physique suivant : une paire de surfaces face à face ayant des brins (ou lamelles) élastiques, considérés comme des ressorts. Le frottement se manifeste au niveau des contacts de ces brins [49]; selon les scénarios suivants :

- Lorsque des forces tangentielles sont appliquées, les brins se déforment.
- Lorsque la déformation des brins est suffisamment grande, les brins commencent à glisser [49].

En se basant sur cette idée, Haessig et Friedland ont développé un modèle de *brin*<sup>10</sup> pour simuler le frottement en *pré-glisserment*<sup>11</sup> et en *glissement*<sup>12</sup> [50].

### 1.2.1.2 Techniques de modélisation du frottement

Al-Bender *et al.* ont distingué deux méthodes de modélisation : l'approche théorique et l'approche expérimentale [23].

<sup>10</sup> Appelé aussi modèle de lame, en anglais, *bristle model*. Il s'agit d'un modèle décrivant statistiquement le comportement des brins, à l'échelle microscopique, au niveau des surfaces de contact; la distance entre les brins est définie par une variable aléatoire [50].

<sup>11</sup> Pendant le régime des déplacements microscopiques, ou encore micro-glisserment, en anglais, *pre-sliding regime*, les forces adhésives (ou de stiction) au niveau des contacts des aspérités sont dominantes [23, 36, 51]. La force résultante de frottement apparaît comme une fonction du déplacement et non pas de la vitesse. En effet, les jonctions des aspérités se déforment 'élasto-plastiquement' en fonction de leur charge individuelle et se comportent ainsi comme des ressorts non linéaires [52]. Lorsque la vitesse passe par zéro, la direction du mouvement est inversée et toutes les aspérités actives sont relaxées et rechargées dans la nouvelle direction de mouvement [23]. D'une autre manière, le micro-glisserment peut être vu comme une distribution aléatoire des contacts des aspérités dont chacun d'entre eux obéit aux lois de frottement de *Coulomb* [53, 54].

<sup>12</sup> Pendant la phase de micro-glisserment, la force de frottement augmente jusqu'à atteindre une valeur maximale; dite *force de décrochage*. Les déformations des lames augmentent de plus en plus; dont les jonctions finissent par se détacher; donnant naissance ainsi au régime des macro-déplacements, ou simplement de glissement, en anglais, *sliding regime* [23, 36, 51]. Cette phase est caractérisée par un processus continu de formation et de détachement complet des jonctions. La force de frottement dépend abondamment de la vitesse de glissement, aussi de la topographie des surfaces et des propriétés dynamiques (comme la rigidité tangentielle) des aspérités [23].

### **Approche théorique ou exacte**

Par cette approche, le concepteur entend proposer une description microscopique des phénomènes physiques ‘internes’ liés aux forces d’interaction des aspérités; quoique, les modèles, qui y sont déduits, soient faits pour étudier (simuler et analyser) le phénomène de frottement d’une manière macroscopique [23]. Or, le comportement macroscopique du modèle peut varier qualitativement selon le choix des paramètres du micro-processus [23]. Nous signalons, tout de même, que l’utilisation de cette approche reste populaire dans les domaines de la tribologie [36, 55], de frottement atomique [37, 38] et aussi de la géo-mécanique [43, 44].

### **Approche heuristique ou empirique**

Elle étudie le phénomène ‘à partir de rien’, ou à la limite, à partir des considérations ‘externes’ du système [23]. En fait, l’idée est de déterminer quel modèle peut correspondre au comportement macroscopique du frottement.

« Le frottement à l’échelle macroscopique est [...] un phénomène complexe, jamais assimilable à un processus simple ou à une succession de processus simples, même en se bornant à des corps physiquement et chimiquement mieux définis que les matériaux industriels. Il doit être considéré comme le résultat statistique de divers phénomènes thermodynamiques élémentaires agissant simultanément en de nombreux points des couches superficielles ou sub-superficielles. »

D’après [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

Le but dans ces modèles est de représenter possiblement le plus de propriétés de frottement dans une formulation simple, réduite, complète et avec un minimum de paramètres facilement identifiables [23]. Il existe aussi des modèles complexes qui peuvent atteindre le niveau de pouvoir de prédiction des modèles théoriques exacts, mais qui restent tout de même heuristiques de point de vue conception. Cette approche est appropriée pour mettre en place des modèles de simulations rapides [22, 23] et pour des fins de contrôle [3, 24].

### 1.2.1.3 Modèles de frottement

La quasi-totalité des modèles construits pour des fins de contrôle sont empiriques et obtenus par des techniques heuristiques. Ils sont très nombreux et sont généralement choisis pour être pertinents une fois utilisés en temps réel. Les modèles les plus classiques sont ceux des frottements élémentaires décrivant la force de frottement comme une fonction de la vitesse (par exemple, le modèle de *Coulomb*<sup>13</sup>, le modèle de frottement *visqueux*<sup>14</sup>, *etc.*). Par contre, pendant les dernières décennies, la caractérisation du frottement et sa modélisation ont connu une nette progression en combinant plusieurs propriétés dans un même modèle [20, 22]. Nous décomposons l'ensemble des modèles décrits dans cette partie selon leurs caractéristiques temporelles, pour obtenir :

- les modèles statiques et quasi-statiques,
- les modèles dynamiques.

#### Modèles statiques et quasi-statiques

Les premiers modèles classiques de frottement sont décrits par des fonctions statiques dissipatives entre la vitesse et la force de frottement et qui dépendent du signe de la vitesse. Parmi lesquels, nous retrouvons le frottement statique<sup>15</sup>, le frottement de *Coulomb* [24, 39] et le frottement visqueux [50]. Un autre modèle consiste en la superposition de ces frottements élémentaires. Il y a lieu de noter aussi le modèle de *Karnopp* [42] et le *modèle de commutation*<sup>16</sup> [56].

Toutefois, plusieurs propriétés, qui sont observées dans les systèmes sous frottement, ne peuvent pas être décrites par des modèles (macroscopiques) statiques. En réalité, le frot-

<sup>13</sup> Ou frottement solide, en anglais, *dry friction*.

<sup>14</sup> Ou frottement fluide pur ou parfait, ou encore frottement hydrodynamique, en anglais, *viscous friction* [1, 2]; c'est une forme de frottement assimilé au freinage visqueux ou rhéologique d'un fluide (d'après [www.granddictionnaire.com](http://www.granddictionnaire.com)).

<sup>15</sup> Force tangentielle seuil nécessaire à la mise en glissement d'un solide sur une surface [3].

<sup>16</sup> En anglais, *switching model*; il s'agit d'une variante du modèle de *Karnopp*.



tement n'est pas une réponse instantanée qui peut être représentée simplement sous forme de changement de vitesse. Outre cela, le frottement est caractérisé par une dynamique interne, qui fait l'objet [22, 57], entre autre :

- de l'effet de *Stribeck*<sup>17</sup>,
- du mouvement de broutage,
- du déplacement de pré-glissement,
- de l'effet de *Dahl*<sup>18</sup>,
- de l'*hystérésis*<sup>19</sup>.

En plus, la plupart des compensations de frottement basées sur des fonctions statiques échouent à vitesse réduite. Par exemple, le modèle de frottement de *Coulomb* est discontinu et peut causer des problèmes dans certaines applications; dont le signal de commande devient discontinu et des effets de vibrations apparaissent à vitesse réduite. Pour toutes

---

<sup>17</sup> Ou, simplement, effet *Stribeck*; c'est une situation transitoire dans laquelle le frottement diminue à partir de la force statique pour atteindre le niveau de frottement de *Coulomb*, pour des vitesses réduites et croissantes; selon une courbe particulière généralement de type exponentielle (dite, en anglais, *downward bend*). À leur rupture, les jonctions des aspérités se comportent comme un ressort de raideur négative [58]. Aussi dans le cas de frottement lubrifié, cet effet est dû à l'établissement de pression hydrodynamique pendant l'affaiblissement de la vitesse [23, 36]. Cette relation particulière du frottement en fonction de la vitesse dépend des propriétés des matériaux, de la température et de l'usure des surfaces de contact [1, 2, 36]. Cette situation peut avoir un effet déstabilisant à vitesses très réduites. En boucle fermée, des gains extrêmement négatifs (proportionnels à la vitesse) sont nécessaires pour stabiliser localement le système à vitesse proche de zéro; par contre des gains positifs réduits suffisent pour stabiliser le système. Historiquement, la découverte de cette caractéristique n'est pas tout-à-fait récente. Elle a été détectée dans les expériences de Mc Kee [59] et a été exprimée par la formule exponentielle empirique de Buckingham dans [59].

<sup>18</sup> L'effet *Dahl* est référé au micro-mouvement observé entre les surfaces de contact pendant le décrochage. Il s'agit d'une description microscopique du comportement élastique pendant les changements de signe de la vitesse [60].

<sup>19</sup> Nous distinguons deux types d'hystérésis :

- Hystérésis (ou mémoire) de frottement en fonction de la vitesse, en anglais, *frictional lag*, *time lag* ou encore *frictional memory*; liée au frottement lubrifié [61]. Elle définit le temps de réaction (entre la vitesse et la force de frottement) requis pour modifier l'épaisseur du film lubrifiant [23]. Le même effet est observé dans les expériences de frottement sec [55]. La force de frottement est plus élevée pendant l'accélération que la décélération.
- Hystérésis de force de frottement en fonction du déplacement; c'est une caractéristique du frottement sec en pré-glissement déterminé par la rupture des contacts adhésifs [23]. La forme de la fonction d'hystérésis, dans ce cas, est déterminée par la distribution des hauteurs des aspérités, la rigidité tangentielle et la rigidité normale.

ces raisons, ce modèle reste peu efficace et assez souvent critiqué dans les approches de commande des systèmes.

Un modèle plus élaboré, présenté dans [24], considère l'effet *Stribeck* en utilisant une approximation à vitesse réduite. Mais, la force de frottement est toujours exprimée par une fonction discontinue à l'origine laissant échapper ainsi la description du régime de pré-glissement. Par contre, certains chercheurs ont étudié exclusivement le comportement de pré-glissement caractérisé par de faibles amplitudes de glissement<sup>20</sup> et de roulement<sup>21</sup>, comme dans [19]. Ils ont décrit le comportement de frottement dans un régime de pré-glissement quasi-statique. Et, parmi ces extensions de modèles, nous retrouvons le *modèle cinétique* de frottement<sup>22</sup> qui tient compte de l'effet *Stribeck* et du broutage [49]. Il est aussi important de noter, dans ce cadre, les travaux qui ont porté particulièrement sur la représentation mathématique de l'hystérésis en utilisant des modèles appropriés comme celui de *Preisach* [62].

Dans une tentative approchant la description dynamique des différents aspects de frottement, Armstrong-Hélouvry *et al.* ont proposé un modèle de frottement à sept paramètres [22, 24] pour des applications de contrôle. Ce modèle est présenté comme une combinaison du frottement de glissement et des composantes temporelles pour les frottements de *stiction* et de *Stribeck*. L'ensemble est exprimé par des équations séparées et une fonction de commutation. Cette description inclut le frottement de *Coulomb*, le frottement visqueux, le frottement de *Stribeck* avec une fonction mémoire et le frottement d'adhésion variant dans le temps; mais pas le pré-glissement. En plus, la commutation entre les deux régimes (d'adhésion et de glissement) est physiquement inappropriée et présente des obstacles insurmontables lors de l'implémentation [51]. Étant donné le grand nombre de

<sup>20</sup> Frottement de glissement ou résistance au glissement, en anglais, *sliding friction*, force résistant au mouvement de glissement, naissant entre les surfaces de deux corps en contact (d'après [www.granddictionnaire.com](http://www.granddictionnaire.com)).

<sup>21</sup> Frottement de roulement ou résistance au roulement, en anglais, *rolling friction*, force résistant au mouvement de roulement, naissant entre les surfaces de deux corps en contact (d'après [www.granddictionnaire.com](http://www.granddictionnaire.com)).

<sup>22</sup> En anglais, *kinetic friction model* (KFM).

paramètres et la non linéarité du système, l'autre inconvénient dans l'utilisation de ce modèle réside au niveau de la difficulté d'assurer une procédure d'identification efficace de ses paramètres [3].

## Modèles dynamiques de frottement

Notons d'abord que le comportement dynamique<sup>23</sup> de frottement est une conséquence directe du caractère non stationnaire des vitesses, des variations de la force de *décrochage*<sup>24</sup>, du broutement et du mouvement de pré-glissement [20, 22]. Cette dynamique est généralement présentée comme une combinaison d'effets distincts, comme l'effet *Dahl*, l'effet *Stribeck* et le comportement d'hystérésis qui se manifestent à vitesse réduite [3, 20, 22]. Voici une description des modèles dynamiques présentés dans l'ordre chronologique.

**Premiers modèles dynamiques** Selon la revue de littérature présentée dans [3], il faut remonter jusqu'aux années 1940 et par la suite attendre la fin des années 1950 pour déceler les premières tentatives qui mettent en œuvre le rôle de l'aspect dynamique dans le frottement, respectivement dans les travaux de Sampson *et al.* [66] et de Rabinowicz [67]. Dans ces modèles, le frottement n'est pas seulement décrit en fonction de la vitesse mais aussi en fonction de l'accélération apparente. Parmi les propriétés les plus connues, qui sont attribuées dans ces modèles, nous retrouvons celle de la pente négative de la courbe de frottement (*i.e.* effet *Stribeck*). Ensuite, Hunt *et al.* [68] ont conclu, par des expériences spécifiques, que la vitesse n'est pas le seul facteur qui justifie tous les effets observés sur le frottement.

<sup>23</sup> Frottement dynamique ou, quasi-synonyme, frottement cinétique; c'est le frottement entre deux surfaces en mouvement relatif, ou la force requise pour maintenir le solide en mouvement [3].

<sup>24</sup> Ou force de décollement, en anglais, *break-away*; c'est la force critique requise pour vaincre la force statique et initier un mouvement. Elle varie en fonction du déplacement microscopique [63] et diminue avec l'accroissement de la force externe appliquée [64, 65]. Lorsque la force tangentielle appliquée est inférieure à cette force critique, un déplacement microscopique proportionnel à la force appliquée se produit, dû à la déformation des aspérités qui sont considérées comme des ressorts. Une fois, la force atteint et dépasse le point critique de décrochage, les jonctions des aspérités se détachent et le régime de glissement commence. Le déplacement de décollement dépend des caractéristiques du contact et de la texture de la surface (topographie, dureté et métallurgie de la couche externe) [51].

À la fin des années 1960, Dahl a proposé un modèle<sup>25</sup> dynamique inspiré du comportement d'un ressort lorsque la vitesse relative des surfaces en contact passe par zéro [19]. Ce modèle, présenté comme une approximation du comportement de pré-glissement, est formé essentiellement du frottement de *Coulomb* associé à une hystérèse décrite au voisinage de la vitesse nulle (*i.e.* lorsque le mouvement change de direction). Il s'agit d'une régularisation du frottement de *Coulomb* à vitesse réduite [19]. Des critiques, qui s'imposent par rapport à ce modèle, concernent par exemple l'existence et l'unicité de la solution et la présence de l'effet d'hystérésis [69]. Aussi, le modèle de *Dahl* n'inclut pas l'effet *Striebeck* ni l'effet de *stiction*. Bliman et Sorine ont développé une structure dynamique de frottement connue sous le nom de modèle de *Bliman-Sorine* [70, 71] et représentée par un modèle d'état de *Dahl* d'ordre 2 incluant l'adhésion. Cette formulation revêt malheureusement un aspect oscillatoire incohérent. Aussi, l'effet *Striebeck* dans ce modèle est uniquement transitoire (*i.e.* qui apparaît juste après le changement de signe de la vitesse et puis il disparaît de la caractéristique de frottement à l'équilibre). Finalement, il faut noter que le modèle de *Sorine* ne reproduit pas la propriété de temps de réaction de frottement [60].

Vers le milieu des années 1990, les travaux se sont multipliés impliquant des regroupements de chercheurs, académiciens et ingénieurs. Leur but est de trouver des modèles de plus en plus généralisés mettant en exergue plus de propriétés et de caractéristiques liées au frottement. De Velde et Baets ont développé une approche mathématique et numérique qui modélise en particulier le broutement pendant la décélération du mouvement [72]. Ils ont montré que cet aspect est possible uniquement pour les systèmes ayant une rigidité élevée [72]. Néanmoins, cette conclusion se contrarie à celle obtenue par Dupont dans [73].

Nous tenons à préciser que tous ces modèles sont souvent désignés comme des modèles '*intégrés*', car ils intègrent simplement plusieurs phénomènes de frottement dans une seule

---

<sup>25</sup> Le modèle de *Dahl* a été utilisé initialement comme modèle standard de simulation des systèmes à friction dans l'industrie aérospatiale.

formulation [23]. Dans la partie suivante, nous évaluerons un autre modèle dynamique intégré de frottement; connu sous le nom de modèle de *LuGre* [20]. D'une part, ce modèle est apparu, sous sa propre forme<sup>26</sup> très connue aujourd'hui, (chronologiquement) après tous les autres modèles cités ci-haut. D'autre part, ces derniers sont des particularités vis-à-vis du modèle de *LuGre*; chacun d'entre eux peut être vu comme un *pistillum* incontournable dans la construction de ce modèle (ou en d'autres mots, comme un 'embryon vital dans l'arbre généalogique<sup>27</sup> du modèle de *LuGre*'). De cette manière, oserions-nous qualifier tous ces modèles de 'pré-*LuGre*' ?

**Modèle de *LuGre* (Lund-Grenoble)** Suite à une collaboration entre l'Institut de Technologie de Lund en Suède et le Laboratoire d'Automatique de Grenoble en France, Canudas *et al.* ont établi un modèle basé sur l'interprétation des brins<sup>28</sup> pour des applications de contrôle [20, 49]. Dans ce modèle, la force de frottement macroscopique est interprétée comme la résultante de toutes les forces de frottement microscopiques agissant individuellement sur les micro-contacts (*i.e.* les micro-jonctions des aspérités) [48]. La résistance au glissement a pour origine les interactions entre les aspérités où se produisent des phénomènes de dissipation d'énergie pendant les différents stades de la formation et de la séparation des micro-contacts. Le modèle de *LuGre* ressemble à celui de *Dahl* de premier ordre en régime de pré-glissement, et est considéré comme une extension de ce dernier incluant des effets particuliers comme celui de *Stribeck* en régime de glissement [35]. En tout, ce modèle exhibe un ensemble de comportements variés de frottement; comme la dépendance de la vitesse et de l'accélération, l'effet d'hystérésis ou temps de réaction, l'effet de *stiction*, les oscillations de cycles limites<sup>29</sup>, le déplacement de pré-glissement et

<sup>26</sup> Il s'agit d'une représentation dynamique d'un mono-état (*i.e.* équation différentielle de premier ordre) augmentée d'une équation statique de sortie (*Cf.* sous-section §2.2.3.2 dans le chapitre 2).

<sup>27</sup> Dans un langage emprunté à la science de l'hérédité (ou génétique).

<sup>28</sup> Il appartient donc à la classe de modèles à l'échelle des aspérités.

<sup>29</sup> Le comportement oscillatoire persistant lié au frottement est dû à une combinaison de la différence dans le frottement statique et le frottement de *Coulomb* et de l'action intégrale dans une boucle de contrôle [74, 75]. Ce phénomène est aussi couplé avec l'effet de pompage.

la force variable de décrochage; qui sont largement validés dans plusieurs expériences et travaux publiés [3, 20].

Le modèle de *LuGre* est caractérisé par six paramètres, *i.e.* un de moins que celui d'*Armstrong* introduit dans [24], et n'utilise aucune fonction de commutation, comme c'est le cas dans le modèle d'*Armstrong*. Donc, il est relativement plus facile à identifier et à implémenter. En effet, il est très populaire et considéré parmi les modèles microscopiques les plus sollicités pour des fins de servo-contrôle [49]. L'investigation (d'analyse et d'utilisation) méticuleuse de ce modèle est constatée dans plusieurs publications; dont nous citons, à titre indicatif, [13, 49, 76].

**Modèles de 'post-*LuGre*'** Nous proposons ce qualificatif pour désigner les modèles dynamiques développés (chronologiquement) après le modèle de *LuGre*. Comme tout autre représentation numérique, le modèle de *LuGre* présente quelques lacunes dans la description de certaines spécifications du frottement. La forme d'hystérésis dans la courbe de transition de la force de frottement en fonction du déplacement, obtenue avec le modèle de *LuGre*, ne correspond pas au vrai comportement transitoire de cette caractéristique [51]. En réalité, le modèle de *LuGre* y dispose encore de peu de degrés de liberté par rapport au nombre de propriétés physiques distinctes à modéliser [77]. Une étude exhaustive qui montre une critique de la modélisation de *LuGre* est donnée dans [3].

Récemment, d'autres modèles plus élaborés sont proposés dans la littérature [23, 36], pour couvrir les caractéristiques de frottement d'une manière plus complète et incorporer les phénomènes complexes de la phase de pré-glissement comme la *stiction* et l'hystérésis dans toutes ses formes. Ils généralisent, presque tous, le modèle de *LuGre*. Nous citons :

- le modèle élasto-plastique [35],
- le modèle de *Leuven* [51, 78],
- le modèle de frottement de glissement généralisé de *Maxwell*<sup>30</sup> [54, 78].

<sup>30</sup> En anglais, *generalized Maxwell-slip* (GMS), il représente un modèle multi-états, référant au nombre de variables d'états internes caractérisant le modèle.

Néanmoins, tout ceci ne nous empêche guère de consentir que le modèle de *LuGre* reste d'un 'bon' niveau de 'fidélité' et de complémentarité pour tenir compte des propriétés du frottement. Il représente en effet un potentiel de taille grâce à son approche unifiée lorsqu'il est combiné avec un schéma de contrôle dans un modèle dynamique. Nous y ajoutons, en outre, sa simplicité (facilité d'implémentation) comparativement aux modèles cités ci-dessus; c'est une qualité à partir de laquelle il tire encore sa popularité accrue dans le domaine du contrôle.

### **1.2.2 Commande des systèmes sous frottement**

La présence de frottement dans les systèmes mécaniques rend souvent les systèmes de commande incapables de réaliser des performances de poursuite raisonnables. Ces dernières peuvent être parfois catastrophiques, avec des erreurs de suivi très élevées, des retards non négligeables et des limitations forcées de la bande passante en boucle fermée pour éviter les cycles induits dans le broutement [3, 20, 22]. Pour améliorer ces aspects, le système de contrôle doit générer un signal supplémentaire pour compenser les effets de frottement entre les surfaces en contact; d'où l'importance du rôle que peut jouer la surveillance du frottement dans le comportement dynamique des dispositifs, qu'ils soient simples ou complexes [6, 17, 79]. Et, pour mettre en place une technique de compensation de frottement réalisable dans un dispositif de servo-contrôle souvent exigeant, il faut tenir compte, en général, de certaines considérations [80] :

- La technique utilisée doit être stable.
- Elle doit être facile à utiliser dans le dispositif de commande existant; y compris la procédure d'identification des paramètres dans le cas des approches basées sur un modèle.
- Les coûts numériques (*i.e.* la capacité de mémoire numérique nécessaire pour l'implémentation) doivent être faibles le plus possible.

- La précision de la compensation doit être garantie et évidemment meilleure que celle du système non compensé.

Notons, toutefois, que les techniques de contrôle des systèmes sous frottement, qui respectent *grosso modo* ces critères, sont nombreuses et assez variées. Généralement, elles sont réparties en deux grandes catégories; les stratégies basées explicitement sur des modèles de frottement et celles non basées sur ces modèles de frottement.

**Approche de compensation de frottement ‘sans modèle explicite’** Cette méthode est sollicitée lorsqu’un modèle de frottement exact ne peut pas être construit ou lorsqu’une grande précision n’est pas nécessaire. Les procédures d’identification des paramètres de frottement sont ainsi omises. Et, la structure du contrôleur est relativement simple.

**Approche de compensation de frottement ‘basée sur un modèle explicite’** Elle comprend les stratégies qui sont basées sur le principe d’estimation du frottement (*i.e.* prédire le frottement réel et appliquer une action de contrôle opposée pour éliminer son effet). Nous parlons d’une annulation directe<sup>31</sup> de la force de frottement. Ces techniques requièrent donc des modèles de frottement convenablement choisis (réalistes et faciles à utiliser). Elles permettent d’assurer souvent la stabilité de la réponse [73, 81] et d’améliorer aussi ses performances [24]. Néanmoins, leur succès dépend de la connaissance de la structure du modèle, de ses paramètres et de son observabilité [20].

À titre indicatif, Armstrong-Hélouvry *et al.* [22] ont proposé une revue générale de la littérature sur la tribologie et aussi la théorie de commande des systèmes sous frottement. Ils ont étudié particulièrement les options de contrôle des servo-systèmes à vitesse réduite (là où le dispositif est plus sensible aux effets de frottement) et les problèmes de vibrations dus au frottement. Ils ont pu constater l’importance des investigations des modèles empiriques et des considérations de lubrification [3].

---

<sup>31</sup> En anglais, *feedforward cancellation*.



Nous rappelons qu'en général le frottement reste un phénomène très complexe et influencé par plusieurs facteurs; comme la température dans le milieu de contact, la durée de contact, la charge et la distance d'opération [2, 3]. Par conséquent, les méthodes de compensation 'basées sur des modèles' peuvent être biaisées :

- si le modèle de frottement choisi ne correspond pas vraiment à la situation réelle du frottement; ou
- si l'identification des paramètres de ce modèle n'est pas complètement garantie ou, à la limite, réalisée avec un taux de précision faible.

Nous pouvons distinguer ainsi les méthodes de compensation 'basées sur des modèles fixes ou exacts' et les méthodes 'basées sur des modèles inexacts ou incomplets'.

Une revue exhaustive des différentes méthodes de contrôle des systèmes soumis au frottement a été présentée dans [82]. Dans la suite, nous proposons notre propre lecture de ces travaux selon leur approche de conception (sans et avec modèle exact ou inexact).

### **1.2.2.1 Méthodes de compensation de frottement 'sans modèle explicite'**

Sous cette catégorie se regroupent les types de contrôleurs suivants :

#### **Commandes d'actions rapides**

Elles couvrent l'ensemble des lois de commandes de hautes fréquences, non linéaires et discontinues, dont nous citons :

**Action de titillement** Une des méthodes les plus anciennes, utilisée pour éviter les oscillations et améliorer la précision des servo-systèmes [83, 84], consiste en l'ajout d'un

signal biaisé de haute fréquence, dit bruit de titillement<sup>32</sup>, au signal de commande [86]. Les bruits des mesures dans les systèmes peuvent servir dans ce cas comme un bruit *dither*. Ce type de signaux permet de compenser les effets de frottement de *Coulomb*, les zones mortes et les effets d'hystérésis [87].

**Commande impulsive** Les impulsions<sup>33</sup> appliquées sont des forces d'amplitudes plus grandes que celle du frottement statique [24, 88].

**Commande à structure variable** Les méthodes de commandes à structure variable<sup>34</sup> conventionnelles utilisées sans modèle de frottement ont souvent des performances de suivi affaiblies dans les applications de haute précision parce qu'elles ne permettent pas de compenser complètement les effets de frottement [93, 94]. En outre, l'inconvénient majeur dans l'utilisation de ce type de contrôle est lié principalement aux dommages excessifs qui peuvent être causés au niveau des actionneurs tenus en mouvement rapide et soutenu.

### Commandes linéaires 'classiques'

Nous citons les contrôleurs par *feed-back* à gain élevé<sup>35</sup> qui sont considérés parmi les techniques les plus anciennes [73, 95, 96]. En particulier, dans le contrôleur PID, l'action

<sup>32</sup> Ou signal de superposition ou effet du bruit *dither*, en anglais, *dither*; c'est un signal périodique de faible amplitude et de fréquence relativement élevée superposé au signal d'entrée du servo-système pour améliorer la résolution du système (d'après [www.granddictionnaire.com](http://www.granddictionnaire.com)) et 'lisser' les effets discontinus (par exemple ceux du frottement à vitesse réduite [84]) présents dans un processus. D'une manière générale, l'introduction d'un signal externe dans une non linéarité permet d'agir sur la fonction décrivant la non linéarité et, par conséquent, modifier le comportement oscillatoire du système [85]. La fréquence de la force de titillement est choisie suffisamment loin de la bande passante du système; tels que les effets secondaires sur la sortie du système soient minimales. Sinon, ces oscillations peuvent être supprimées par d'autres oscillations de haute fréquences [85].

<sup>33</sup> Action de commande impulsionnelle, d'amplitude donnée et appliquée pendant une courte durée.

<sup>34</sup> La méthodologie de commande à structure variable, en anglais, *variable structure control* (VSC), en particulier par mode de glissement, constitue une approche de commande non linéaire simple, robuste et capable de traiter les problèmes à caractère non linéaire avec des incertitudes d'implantation (dites incertitudes structurées ou paramétriques à paramètres de modèle inconnus) ou des représentations simplifiées et réduites de la dynamique du système (nous parlons, dans ce cas, d'incertitudes non structurées). Cette méthode est introduite initialement par Utkin-Drazenovic [89, 90] et généralisée par la suite dans [91, 92] selon les concepts de la stabilité au sens de *Lyapunov*.

<sup>35</sup> En anglais, *high-gain feedback*.

intégrale est souvent impliquée dans l'apparition des cycles limites indésirables de pompage<sup>36</sup> [22, 74]. Armstrong-Hélouvry [24, 81] a examiné l'impact de la rigidité du système et le contrôle PD sur la stabilité de glissement, en particulier, à vitesse réduite. Le résultat sur le niveau de précision de tels servo-contrôles reste toutefois peu reluisant.

### Commandes 'non conventionnelles'

Nous distinguons deux catégories de lois de commandes relativement récentes; qui sont utilisées sans modèle paramétrique de frottement; à savoir :

**Commande de réseaux de neurones** Du et Nair [97] ont utilisé l'approche de réseaux de neurones<sup>37</sup> pour démêler les effets parasites du frottement. Cette technique exige cependant un volume important de calcul numérique pour l'identification et la compensation du frottement.

**Commande floue** L'approche de commande floue<sup>38</sup> convient parfaitement aux scénarios où aucune connaissance a priori n'est disponible au sujet des effets de frottement au niveau des joints et des contacts. Une commande linéaire, de type PID, a été conçue pour contrôler la position et compenser les frottements en utilisant un modèle de logique floue<sup>39</sup>

<sup>36</sup> Terme recommandé par un organisme international, en anglais, *hunting*. État de fonctionnement d'une machine, caractérisé par une fluctuation de sa vitesse autour d'une vitesse d'équilibre correspondant à un régime permanent (d'après [www.granddictionnaire.com](http://www.granddictionnaire.com)).

<sup>37</sup> En anglais, *neural network* (NN), les réseaux de neurones artificiels offrent des solutions efficaces pour appréhender trois sources principales de difficultés en contrôle de procédés : complexité, non-linéarité et incertitude. La mise au point d'un système de commande neuronal nécessite deux phases, une phase préalable d'apprentissage au cours de laquelle sont estimés les coefficients du réseau correcteur, et une phase d'utilisation, où le correcteur, dont les coefficients sont fixés, est mis en œuvre avec le processus [98, 99].

<sup>38</sup> En anglais, *fuzzy control*. La logique floue (en anglais, *fuzzy logic*) est une technique utilisée en intelligence artificielle. Elle a été formalisée par Zadeh, L. A. (scientifique Azerbaïdjanais connu pour ses travaux en informatique et en automatique) en 1965 et a été utilisée dans des domaines aussi variés que l'automatisme et la robotique. De par sa théorie, la logique floue permet de traiter l'imprécision liée à la nécessaire caractérisation d'un procédé en vue de sa commande. Elle constitue un domaines de recherche pour palier au manque de modèles de connaissance satisfaisants utilisables en commande [100, 101].

<sup>39</sup> En anglais, *fuzzy model*.

dans [102]. Ce genre de contrôle conçu pour traiter les incertitudes causées par les effets inconnus de frottement repose sur une conception intuitive en général.

### 1.2.2.2 Méthodes de compensation de frottement ‘basées sur des modèles fixes’

Nous notons, d’abord, qu’il n’est pas très ingénieux d’utiliser les modèles statiques pour compenser le frottement avec des gains élevés, à cause du comportement oscillatoire inévitable dans ces cas [85]. Dans ce sens, plusieurs stratégies d’analyse et de commande de servo-systèmes sous frottement sont investies, pour atteindre des degrés de précision assez élevés sans nécessairement utiliser des gains intégrateurs excessifs ni des techniques intuitives dépourvues de preuve directe ou exacte [103]. Nous élaborons ici les modèles paramétriques connus (*i.e.* à paramètres fixes et connus) basés sur l’identification exacte de ses paramètres. Ces méthodes sont généralement précédés par une étape d’identification hors-ligne des paramètres du modèle de frottement utilisé [76]. Les résultats de cette étape dépendent *a priori* des conditions expérimentales au niveau des contacts puisque le comportement du frottement peut varier sensiblement avec ces conditions. Par conséquent, les résultats de telles techniques de compensation sont conditionnés par la phase d’identification *a priori*.

**Commande linéaire** Parmi l’arsenal des stratégies présentées sous le thème de compensation avec des modèles fixes, nous retenons le cas de la commande linéaire combinée avec l’observateur de *LuGre*<sup>40</sup> pour la compensation de frottement [13, 20, 104]. Cette méthode se distingue par rapport à toutes les autres approches, pour les raisons suivantes :

- la simplicité du contrôleur linéaire,
- les qualités<sup>41</sup> du modèle de compensation utilisé dans ce cas.

Dans [20, 34], des contrôleurs linéaires classiques (par exemple, PD et PID filtré) sont choisis telle que la fonction de transfert, entre l’erreur d’estimation de frottement et l’er-

<sup>40</sup> *i.e.* utilisant un observateur basé sur le modèle de *LuGre*.

<sup>41</sup> Voir les avantages du modèle de *LuGre* présentés dans la sous-section §1.2.1.3 dans ce chapitre.

reur de position, soit strictement réelle positive<sup>42</sup>, assurant ainsi la stabilité des erreurs de suivi et d'observation. La réponse obtenue, dans ce cas, est vraisemblablement précise, mais reste très lente à cause de l'atténuation excessive dans le système.

**Commande non linéaire** En utilisant aussi un observateur basé sur le modèle de *LuGre* pour compenser le frottement, Hirschorn et Miller [105] ont proposé un contrôleur dynamique continu développé pour une classe de système non linéaire et basé sur l'approche de *Lyapunov*, pour assurer des conditions suffisantes de stabilisation globale. Hormis, le choix des paramètres de ce contrôleur qui n'est pas *a priori* facile à réaliser (ni à justifier parfois !), cette méthode reste intéressante pour la qualité de la compensation de *LuGre* qui lui est associée.

Néanmoins, l'utilisation de l'ensemble de ces méthodes doit être, à chaque fois, combinée avec

- un choix judicieux du modèle de compensation de frottement, et aussi
- une identification précise des paramètres de ce modèle, qui peuvent désormais varier dans le temps.

Une prédiction juste du frottement, basée sur les propriétés des surfaces et des lubrifiants, représente ainsi un challenge stratégique pour ces méthodes [51].

### 1.2.2.3 Méthodes de compensation de frottement 'basées sur des modèles inexacts ou incomplets'

Il a été prouvé dans plusieurs travaux que les paramètres de frottement peuvent varier avec les propriétés des matériaux, les conditions de contacts (la température, la vitesse relative et la force de contact) et les conditions de lubrification [15, 34, 51, 85, 106, 107]. Par conséquent, l'identification exacte de tels paramètres n'est point facile [57]. Il faut accommoder les techniques d'identification pour évaluer efficacement le frottement. Cette

<sup>42</sup> En anglais, *strictly positive real* (SPR).

évaluation est souvent difficile à entretenir; à cause du phénomène même de frottement qui est non mesurable en général. Donc, l'emploi d'une approche de compensation avec un modèle de frottement à paramètres fixes reste très perplexe et peut induire des performances assez disparates et qui varient avec la situation (conditions de mouvement et de contact). En effet, des variations paramétriques lentes dans le temps (dues, par exemple, au changement de la température) présentent un scénario idéal pour utiliser une commande adaptative [34, 108]. Par contre, des variations rapides (dues, par exemple, aux forces de contact) sont mieux compensées par une commande robuste [16, 94].

En outre, les incertitudes ne sont pas seulement dans les paramètres mais aussi dans la structure du modèle de frottement. Cette imperfection est référée à l'efficacité du modèle à interpréter les propriétés et les caractéristiques de frottement<sup>43</sup>. La force de frottement estimée ne peut pas être 'exactement' égale à la force réelle. Ces différences sont nettement plus importantes dans le cas de modèles de frottement statiques discontinus que dans le cas de modèles dynamiques représentés par des équations différentielles [85].

### **Approche des commandes adaptatives**

Cette approche est basée sur une adaptation<sup>44</sup> de la loi de commande et d'observation du frottement en ligne [109, 110]. Dans la littérature, cette idée est exploitée de différentes manières et sous différentes conditions; *i.e.*

<sup>43</sup> Nous rappelons ici le point qui a été amplement discuté dans ce chapitre (*Cf.* sous-section §1.2.1.2); à savoir que les modèles théoriques pouvant décrire 'avec une grande fidélité' presque tous les aspects de frottement sont très compliqués et difficiles à utiliser (formulation complexe et paramétrisation non identifiable), du moins, expérimentalement. Par contre, les modèles empiriques sont relativement plus faciles à implémenter dans un contexte de contrôle en-ligne. Mais, leurs formulations simplifiées manquent plus ou moins de 'fidélité' et n'aspirent pas malheureusement à la mise-à-nu de toutes les caractéristiques du phénomène de frottement.

<sup>44</sup> Il s'agit d'une approche traitant les incertitudes des modèles à paramètres constants ou lentement variant dans le temps. La commande adaptative est caractérisée par une structure de contrôle mise à jour plusieurs fois pendant l'opération, en se basant sur les mesures [92]. Nous parlons d'une commande avec estimation de paramètres en temps réel. Dans la littérature, nous distinguons deux techniques principales pour construire des commandes adaptatives : la méthode de commande adaptative avec modèle de référence (en anglais, *model-reference adaptive control* (MRAC)) et la méthode d'ajustage autonome (en anglais, *self-tuning controller* (STC)).

- utilisant les différents modèles de frottement, comme
  - l'estimation du frottement statique [111],
  - l'estimation du frottement dynamique [109];
- et utilisant les différents types de commande de position qui y sont associées, comme
  - la commande linéaire [95, 112],
  - la commande non linéaire [109, 111].

En particulier, l'usage de la commande adaptative combinée avec la modélisation dynamique de *LuGre* est discuté dans plusieurs travaux (voir, par exemple, dans [15, 104]).

Nous distinguons différentes lois d'adaptation

- soit, pour estimer uniquement un seul paramètre [14, 34, 110], comme :
  - le frottement statique dans [34],
  - le coefficient d'amortissement interne<sup>45</sup> dans [110];
- soit, pour estimer l'ensemble des paramètres exprimés linéairement par rapport au modèle [15, 104].

Les inconvénients de ces méthodes sont décrits dans les points suivants :

- Les conditions de stabilité du système asservi, basées sur la condition SPR dans [20, 34], sont très restrictives et difficiles à réaliser sans user, *a priori*, dans des gains élevés de la commande linéaire.
- L'usage de cette approche est souvent limité au cas de la paramétrisation linéaire du modèle.
- Les incertitudes, dues aux effets non compensés par les lois d'adaptation (voir dans [34, 104]), sont considérées comme des perturbations dans le système. Ces perturbations peuvent éventuellement déstabiliser l'algorithme d'adaptation [58].
- Les performances de la réponse transitoire peuvent être dégradées [14, 58] et aussi conditionnées par la rangeabilité<sup>46</sup> des paramètres [104].

<sup>45</sup> Noté  $\sigma_1$  dans le modèle de *LuGre* (Cf. sous-section §2.2.3.2 dans le chapitre 2).

<sup>46</sup> *i.e.* la précision avec laquelle la mesure d'une grandeur (ou d'un paramètre) est effectué peut varier [113].

- Il y a une explosion du nombre de conditions nécessaires (parfois trop sévères), pour garantir le succès de l'approche (*i.e.* la convergence de l'estimation) [15, 104]. Dans [15], l'absence de bruit compromet sévèrement le processus d'identification. L'extension de cette approche pour estimer les paramètres exprimés non linéairement dans le modèle de *LuGre* (par le biais de l'algorithme *min-max* [114]) n'arrange point la situation avec l'augmentation des conditions supplémentaires requises dans ce cas.
- L'intuition et le manque de preuve analytique des solutions sont souvent de mise [104].
- Sachant qu'une amélioration de la réponse du système peut être obtenue, en général, avec une meilleure initialisation de la loi adaptative et en augmentant le gain d'adaptation dans l'estimation de frottement [57]; une adaptation rapide et un grand gain d'adaptation rendent l'équation d'adaptation de frottement très raide; ce qui nécessiterait une période d'échantillonnage très petite. Or, une telle condition induit un schéma d'adaptation sensible au bruit et aux erreurs d'adaptation [115].
- La réalisation de l'approche adaptative est souvent compliquée et s'applique difficilement aux systèmes de grande accélération (mouvement rapide) [16].

### **Approche des commandes robustes**

Cette catégorie peut se présenter comme une bonne alternative qui s'applique aisément aux processus rapides. En outre, les paramètres du modèle de frottement sont évalués simplement hors-ligne dans ce cas [16, 94]. Mais, ceci ne se fait pas à fortiori (et toujours) sans dégât. Par exemple, dans [16], un observateur de perturbation est utilisé pour éliminer les perturbations dues essentiellement aux erreurs d'estimation des paramètres dans le modèle de *LuGre*. Cet observateur comprend un filtre passe-bas, faisant en sorte que le bruit de haute fréquence est pratiquement déplacé vers le système; impliquant une détérioration de l'exécution.



La famille des commandes robustes à structure variable est illustrée dans plusieurs applications d'asservissement de mouvement et de compensation de frottement. Elle comprend :

- la commande par mode de glissement<sup>47</sup> [116, 117], avec ces deux versions : discontinue (formule initiale) et continue (forme équivalente),
- la commande de commutation<sup>48</sup> [117].

L'inconvénient majeur de l'utilisation de la commande SMC est lié au fait que les commutations rapides dans une réalisation réelle de tels contrôleurs peuvent exciter les dynamiques de hautes fréquences non modelées du système; chose qui peut altérer sévèrement les performances [117]. En effet, la commande SMC reste décidément non appropriée parce qu'elle induit beaucoup d'oscillations<sup>49</sup> [116], et une amplitude de signal de commande excessive est souvent nécessaire même dans le cas de la commande continue équivalente.

### **Approche des commandes 'heuristiques'**

Elle comprend la commande floue, la commande par apprentissage et la commande neuronale qui bénéficient d'une connaissance *a priori* du modèle de frottement. Ces outils de commande suscitent plus d'intérêt comparativement à ceux utilisés sans la moindre connaissance des effets de frottement [118]. Néanmoins, avec l'amélioration des outils mathématiques de modélisation et des techniques d'estimation des paramètres des modèles de frottement, l'usage de telles approches heuristiques devient moins persuasif, d'autant plus que les résultats peuvent dépendre de plusieurs facteurs peu communs. Par exemple, pour établir une commande par apprentissage, comme dans [118], il est nécessaire d'exécuter différentes épreuves de cette commande pour chacune des trajectoires désirées. Ces trajectoires doivent être toujours périodiques. La vitesse de convergence peut être très lente parce que chaque mise à jour se produit seulement après que le système en

---

<sup>47</sup> En anglais, *sliding mode control* (SMC).

<sup>48</sup> En anglais, *switching control*.

<sup>49</sup> En anglais, *chattering*.

boucle fermée ait atteint presque l'état d'équilibre [118]. En plus, la présence de bruit dans les signaux n'arrange pas le bon usage de ces méthodes. En général, leur performance est réduite comparée à celle des commandes adaptatives ou robustes.

### **Combinaison des différents types de commandes**

Il s'agit de l'ensemble des techniques qui utilisent plusieurs types de commandes dans le même schéma de contrôle des servo-systèmes, comme par exemple :

- la commande adaptative + la commande robuste [16, 58],
- la commande neuronale + la commande adaptative robuste [57, 119].

Cette stratégie permet d'exploiter les qualités de chaque type de commande. En particulier, elle permet d'alléger la condition de robustesse et d'atténuer éventuellement la dynamique de la commande (surtout dans le cas d'une structure variable) [57, 103]. Récemment, ce genre de technique devient de plus en plus utilisé; grâce aux progrès des outils numériques de calcul.

La loi d'adaptation est souvent utilisée pour estimer les paramètres exprimés linéairement par rapport au modèle de frottement, comme les coefficients de *Coulomb*, visqueux et statique [57, 58]. Misovec et Annaswamy [58] ont utilisé une version modifiée du modèle de *LuGre* [20] pour mettre en place un compensateur adaptatif, qui estime en plus le paramètre de *Stribeck*. Les effets de frottements dynamiques sont considérés comme une perturbation compensée par un observateur robuste de perturbation, en ajoutant une excitation persistante dans la trajectoire désirée et en considérant que les paramètres soient strictement constants [57, 58]. Cette dernière hypothèse peut avoir une conséquence négative sur le résultat, si les effets des variations de ces paramètres ne sont pas inclus dans la conception de l'observateur robuste. En plus, ce genre de technique peut exhiber des problèmes de stabilité difficiles à résoudre analytiquement. Garagic et Srinivasan [57] ont utilisé intuitivement une zone morte modifiant la loi d'adaptation pour éliminer les problèmes d'instabilité observés dans le système asservi.

### **1.2.3 Conclusion**

Nous venons d'étudier les différents aspects de frottement qui représente une source de dégradation des servo-systèmes. Nous avons analysé dans les sections §1.2.1 et §1.2.2 les différents outils de modélisation et de compensation de cet effet. Plusieurs méthodes sont déjà développées dans la littérature. Nous avons essayé de classer toutes ces approches selon leurs caractéristiques qui les distinguent les unes des autres. Et, leur évaluation (critique) est ainsi établie dans le cadre de cette classification. Le résultat de cette évaluation descriptive représente le point de départ dans le développement des travaux de la présente thèse; de point de vue

- choix du modèle de frottement, pour l'annulation de cet effet, et aussi
- choix du schéma de la commande des servo-systèmes.

Dans la suite, nous allons élaborer particulièrement l'état de l'art de la commande des systèmes robotiques et de la commande des systèmes d'actionneurs pneumatiques; en rapport avec la compensation de frottement. Ces deux systèmes mécaniques font l'objet, en effet, de deux études spécifiques (d'asservissement et de compensation de frottement) dans le cadre de cette thèse.

## **1.3 Étude des systèmes robotiques**

### **1.3.1 Généralités**

L'usage des systèmes robotiques connaît aujourd'hui une affluence accrue dans presque tous les domaines industriels<sup>50</sup>; permettant d'améliorer la qualité des produits et la perfor-

---

<sup>50</sup> En réalité, la robotisation, de nos jours, s'ouvre à toutes les activités humaines rudimentaires ou complexes (domestiques, médicales, agricoles et autres).

mance des services. De point de vue opérationnel, le type d'action d'un robot<sup>51</sup> peut être divisé en deux catégories, à savoir [120] :

**Action de mouvement libre** Le robot, en particulier son effecteur (appelé aussi segment terminal, outils et préhenseur), évolue dans un espace de travail libre dépourvu de tout obstacle ou force d'action externe. Le comportement dynamique d'un tel système est abondamment étudié dans la littérature (voir, par exemple, [112, 121]).

**Action de mouvement sous contrainte** L'élément final du manipulateur<sup>52</sup> évolue dans un milieu de contrainte<sup>53</sup> muni d'un ensemble de forces de réaction (incluant la force de frottement). En général, étant donnée une surface rigide de contact, la contrainte est décrite par une équation algébrique [122, 123]. Tout autrement, le milieu de travail peut subir une déformation sous l'influence des forces et couples appliqués. L'étude dans ce cas doit tenir compte de cette propriété par l'entremise d'une équation de couplage [124]. Cette surface de contact peut être aussi stationnaire [124, 125] ou mobile [124, 126].

Pendant un exercice quelconque du bras de robot, le basculement de la phase de mouvement libre à la phase de mouvement sous contrainte s'effectue en général en passant par des phases successives d'*approche* et de *collision* [124]. Dans toutes ces phases, l'aspect de frottement peut jouer un rôle plus ou moins dominant. D'une part, nous distinguons le frottement dans les articulations et l'ensemble des actionneurs qui régissent leurs mouvements. Cette forme de résistance a été longuement discutée dans la littérature utilisant

---

<sup>51</sup> Du mot *robota* (en tchèque et dans les langues slaves), travail forcé, corvée ou travail de serf, d'esclave. En polonais *Robotnik*, le travail (d'après [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)). Définition de l'*International Federation on Theory of Machines and Mechanisms* (IFTOMM) dans *Terminologie pour la théorie des machines et mécanismes* (1991) : Un mécanisme piloté par une unité de commande qui réalise automatiquement des tâches telles que la manipulation, l'inspection ou l'usinage.

<sup>52</sup> Définition de l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO) dans la norme ISO 8373 (1994) intitulée *Robots manipulateurs industriels - Vocabulaire* : Une machine, un mécanisme constitué normalement d'une série de segments qui sont reliés par un joint assurant une rotation ou une translation relative entre segments, dont le but est de prendre et déplacer des objets (pièces ou outils) avec plusieurs degrés de liberté. Il peut être commandé par un opérateur, une unité de commande électronique ou un système logique (dispositif à cames, relais, câbles, etc.).

<sup>53</sup> Par opposition à un espace de travail libre, il désigne toute surface de contact, table, plate-forme, etc.

les différentes formes de modélisation et de compensation de frottement [104, 127, 128]. D'autre part, lorsqu'il y a un contact entre l'effecteur et une surface quelconque, le phénomène de frottement, dans ce cas, peut outrageusement dégrader la qualité des opérations de force et de mouvement de contact. Dans le présent travail, nous limitons notre axe de recherche à l'étude (de la commande) de mouvement et de force des systèmes robotiques en contact avec des surfaces rigides sous frottement.

### 1.3.2 Stratégies de commande des systèmes robotiques en position et force

À l'exception de suivi de trajectoire dans l'espace libre (dans lequel un contrôle de position du manipulateur est suffisant), il est souvent nécessaire d'assurer en plus un contrôle de force d'interaction (surtout en cas de contact effecteur-surface rigide) [121, 122, 129]. Or, ces deux types de contrôles (de force et de position) antagonistes diffèrent manifestement avec la rigidité du contact. En effet, l'opération de contrôle strict en position ou en force s'effectue aux deux extrémités du spectre de rigidité. Autrement, un servo-contrôle idéal de position représente un système infiniment rigide qui rejette toutes les perturbations de force subie. Par contre, un servo-contrôle de force exhibe une rigidité nulle et maintient une application de force désirée sans perturbation de position. Entre ces deux extrémités, un servo-contrôle combiné devient plus approprié [121].

Les premiers travaux, motivés par cette idée cruciale de modélisation et de commande de position et de force, ont été présentés dans [130, 131]. Et au fil des années, plusieurs approches ont émergé pour résoudre ce problème. Nous citons :

**Commande par retour d'effort explicite** Le robot est commandé en position et la mesure de force est utilisée pour corriger le signal d'entrée [132, 133].

**Commande d'impédance** Pour interpréter la compatibilité physique entre le robot et son milieu de contact, il est advenu de présenter le robot comme une impédance mécanique

et son environnement de contrainte comme une admittance mécanique [134, 135, 136]. Ce type de commande ne peut contrôler la force et la position qu'une à la fois (ou, autrement, ne peut pas contrôler séparément ces deux variables) [137, 134].

**Commande hybride** Initialement introduite par Raibert et Craig [123], cette commande a retenu l'attention de plusieurs chercheurs [120, 138, 139]. Une revue exhaustive est présentée dans [140] décrivant les débuts et l'évolution de cette approche. Elle s'approprie parfaitement au type de contact rigide entre l'effecteur et l'environnement [123]. Elle nécessite une connaissance détaillée du modèle géométrique du lieu de contact. L'idée principale de cette approche est de partitionner l'espace (articulaire<sup>54</sup> ou cartésien<sup>55</sup>) en deux sous-espaces complémentaires : (a) un sous-espace associé aux degrés de libertés (*i.e.* articulations) commandés en position (*i.e.* génération des trajectoires de l'effecteur); (b) un sous-espace associé aux degrés de libertés pilotés en force (*i.e.* modulation des efforts dans les directions des contraintes) [121, 123].

Dans la suite, nous élaborons la technique de conception de système d'asservissement hybride de position/force d'un manipulateur robotique en contact avec un milieu rigide.

### 1.3.3 Commande hybride

#### 1.3.3.1 Définition

Méthode où une commande exerce un contrôle exclusif sur certains degrés de liberté d'un robot, soit en position, soit en force [121, 135, 141].

---

<sup>54</sup> Espace des articulation ou espace des coordonnées généralisées.

<sup>55</sup> Espace de travail de l'effecteur ou espace opérationnel.

### 1.3.3.2 Principe et objectif

Pour contrebalancer les contraintes physiques subies par l'organe terminal, la commande hybride impose des contraintes artificielles duales au système robotique choisies de façon à obtenir [121] :

- une trajectoire (*i.e.* position de l'effecteur) désirée dans les directions libres de mouvement;
- un effort (*i.e.* force appliquée par l'effecteur) désiré dans la direction de contrainte réelle de position.

Ces deux modes de contrôles antagonistes sont subtilisés dans le même schéma regroupant l'ensemble des degrés de liberté du système. Sachant qu'un même actionneur peut agir sur plusieurs degrés de liberté, le principe de la commande hybride consiste à envoyer simultanément aux actionneurs les ordres nécessaires, émanant des contributions en position et en force [135, 139].

### 1.3.3.3 Méthodologies

L'expression de la commande hybride est donnée par la combinaison de deux termes [142, 143, 144, 145] :

- Le premier terme, qui répond aux exigences du mouvement, est déterminé en fonction de la projection de l'écart de position/orientation dans le sous-espace des vitesses (compatible avec le sous-espace de mouvement libre).
- Le deuxième terme, qui correspond aux spécifications de la force de contact, est déterminé en fonction de la projection de l'écart de force/couple de contact dans le sous-espace des forces/couples admissibles (compatible avec le sous-espace de contrainte).

Mills et Goldenberg [122, 138] ont développé cette approche sur un manipulateur maintenu en mouvement quasi-statique (*i.e.* les amplitudes des coordonnées généralisées et

leurs dérivées varient tant soit peu au voisinage d'un point nominal stationnaire) sous contrainte d'une surface rigide. Le système asservi est stable uniquement localement, et le découplage (entre les dynamiques de suivis en position et en force) reste, dans ce cas, approximatif. Lorsque le manipulateur opère assez loin du point de linéarisation, ses performances sont forcément dégradées.

Mais, l'approche la plus sollicitée est celle basée sur la méthode du couple pré-calculé<sup>56</sup> [121] et l'orthogonalisation<sup>57</sup> des sous-espaces de position et de force admissibles. Des commandes découplées (une dans chaque sous-espace) sont développées pour assurer la stabilité globale de l'ensemble [141]. L'approche proposée par DeSantis dans [141] convient, néanmoins, au contexte idéal de contact parfait (*i.e.* sans frottement). La stabilité n'est pas forcément garantie dans le cas de contact sous frottement.

Dans une autre perspective, les chercheurs ont développé des algorithmes de commande hybride à structure variable [139, 147]. La procédure d'ajustement des gains du contrôleur reste très difficile, à cause de la nature non linéaire du système en boucle fermée. En plus, la structure discontinue de ce type de commande compromet réellement son application [148, 149].

#### 1.3.3.4 Effet de frottement de contact

Le frottement de contact représente un aspect physique incontournable. Il s'agit d'une forme de résistance qui provoque une force tangentielle proportionnelle à la force normale et qui agit en tant que perturbation sur la dynamique de position. Dans ce cas, les structures

---

<sup>56</sup> En anglais, *computed-torque*, commande linéarisante qui transforme l'équation différentielle généralisée du manipulateur de l'espace dynamique non linéaire dans un espace dynamique linéaire. Elle est désignée comme une approche de linéarisation globale [146]; par opposition à la linéarisation locale définie autour (*i.e.* au voisinage) d'un point de fonctionnement.

<sup>57</sup> Ou projection orthogonale, action de projeter l'ensemble des équations dynamiques (du manipulateur) et statiques (des contraintes) dans deux sous-espaces orthogonaux : un sous-espace commandable en position et l'autre commandable en force.



de commande qui assument habituellement un contact sans frottement sont sérieusement compromises et le système asservi devient entièrement couplé [124, 150, 151].

Pour simplifier les méthodes de la commande hybride, dans certaines applications, les auteurs supposent que les forces de frottement sont carrément négligeables;

- en se basant sur une évaluation de la quantité réelle de perturbation liée au frottement de contact comparée par rapport aux efforts nominaux développés au niveau des actionneurs [150] ou, à la limite,
- en considérant que le total des forces tangentielles appliquées au point de contact reste toujours plus grand que l'amplitude des forces de frottement statique [152, 153].

Donc, ce sont des hypothèses et des justifications expérimentales restreintes aux dispositifs utilisés et qui manquent de généralité.

En tout évidence, pour faire face à ce problème d'une façon directe, il faut justement compenser ces forces tangentielles non mesurables par l'entremise d'un estimateur approprié [124, 125, 154]. La stabilité du système en boucle fermée est, dans ce cas, sensiblement affectée par cette procédure de modélisation et compensation du frottement [151, 155]. Par exemple, dans l'analyse du comportement du dispositif mécanique soumis au frottement de *Karnopp*, nous constatons un problème d'instabilité numérique au cours de la phase d'adhésion [156]. Les gains de *feed-back* utilisés avec le modèle de frottement de *Coulomb* auraient été plus élevés [155] que ceux calculés avec un autre modèle plus complet que celui de *Coulomb* [151, 156]. En outre, les algorithmes adaptatifs peuvent offrir une meilleure performance, mais, au détriment d'une implémentation complexe [151]. Finalement, nous constatons que l'utilisation des modèles dynamiques de frottement de contact dans la modélisation et la commande des systèmes robotiques représente un challenge imposant pour améliorer l'efficacité de tels dispositifs [124].