



Université du Québec
à Rimouski

**MODÉLISATION PRÉDICTIVE DES ERREURS QUASI-STATIQUES
DANS LES MACHINES-OUTILS POUR UNE COMPENSATION
DYNAMIQUE**

Thèse présentée
dans le cadre du programme de doctorat en ingénierie
en vue de l'obtention du grade de Philosophiae Doctor (Ph.D.)

PAR
© Erick MATEZO-NGOMA

Décembre 2025

Composition du jury :

Maxime Berger, président du jury, UQAR.

Abderrazak El Ouafi, directeur de recherche, UQAR.

Sasan Sattarpanah Karganroudi, examinateur externe, UQTR.

Loubna Benabbou, examinateur, UQAR.

Ahmed CHEBAK, autre membre, UM6P.

Dépôt initial le 25 avril 2025

Dépôt final le 10 décembre 2025

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

Cette thèse est dédiée à la mémoire de mon très cher Papa Le Professeur ordinaire Honoré Matezo-Bakunda décédé le 15 décembre 2021 qui m'a demandé expressément de continuer avec un doctorat, et à ma très chère Maman Elisabeth Diawela-Lutete décédée le 19 juin 2015, que Dieu les bénisse et les accueille auprès de Lui.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon directeur de recherche, Monsieur Abderrazak El Ouafi pour sa grande disponibilité, son soutien, les conseils précieux qu'il me prodigue et surtout pour cette passion pour l'observation des faits, pour le souci des détails, et pour l'importance des idées dans la recherche qu'il m'a transmise. Qu'il trouve toute ma reconnaissance et mon grand respect. Je tiens également à remercier Monsieur Ahmed Chebak pour son soutien tout au long de ce projet.

Mes remerciements vont également à Monsieur Richard Lafrance du Laboratoire de Productique pour ses différentes interventions et ses précieux conseils.

Cette thèse représente un long parcours et un rêve qui s'est réalisé. Je ne l'aurais jamais atteint sans l'aide et la motivation de mes chers parents, de ma très chère fille Ericya, de mes sœurs et frères les MATEZO (Nadège, Patrick, Cathy, Trésor et Judith) et de mon ami d'enfance le père Junior Stanislas Kimpeye s.j.

Finalement, je remercie tout le personnel du département de mathématique, informatique et génie de l'Université du Québec à Rimouski d'avoir mis à ma disposition tous les moyens techniques et logistiques pour réussir ma recherche doctorale.

AVANT-PROPOS

RÉSUMÉ

Les erreurs quasi-statiques observées sur les machines-outils à commande numérique sont responsables d'une grande partie des déviations dimensionnelles et géométriques constatées sur les pièces mécaniques produites par usinage. Ces erreurs, estimées à près de 70% des erreurs attribuables à la machine-outil (MO), sont dues aux imperfections dans la structure géométrique et cinématique de la machine ou à la suite de la modification de cette structure sous des contraintes statiques et thermiques. Même si certaines imperfections sont réduites en améliorant le design de la MO, il n'est pas possible d'éliminer totalement leurs effets. Les coûts exorbitants qu'exigent ces améliorations ont contribué à favoriser le concept de la compensation des erreurs qui permet d'améliorer la précision des MO sans nécessiter leur modification physique. Cependant, pour une compensation dynamique de ces erreurs, il est nécessaire de disposer d'un modèle global capable de les prédire et de les synthétiser sous une forme facile à compenser, et ce quelle que soit la position dans le volume de travail de la MO et quelles que soient les conditions thermiques auxquelles elle est soumise. Les sources d'erreurs dans les MO étant multiples et variées et leurs effets fortement interreliés, le développement d'un tel modèle soulève au moins trois défis importants : le choix de la technique de modélisation, la sélection des variables à inclure dans les modèles de prédiction ainsi que le développement d'un formalisme adapté pour intégrer les erreurs et les synthétiser sous une forme volumétrique compatible avec les exigences des applications en temps réel.

Cette recherche a l'ambition de relever ces défis en développant une approche de modélisation prédictive hybride des erreurs quasi-statiques dans les MO en vue d'une compensation dynamique. L'approche proposée combine (i) une investigation expérimentale et numérique pour analyser le comportement thermomécanique de la MO afin d'identifier les relations de cause à effet entre la cartographie thermique et les profils de déformations et de déplacement dans sa structure, (ii) un système de mesure combinant caméra thermique, capteurs de température, laser interféromètre et autres capteurs de mesure de déformations et de déplacements pour la caractérisation de ces erreurs, (iii) une procédure systématique de sélection du nombre et de la localisation des capteurs de mesure de température afin de représenter le plus fidèlement possible la distribution réelle des champs thermiques dans la structure de la MO (iv) des modèles adaptés pour la prédiction des composantes élémentaires des erreurs géométriques et thermiques, (v) un modèle cinématique généralisé pour la synthèse des composantes volumétrique de l'erreur quasi-statique et (vi) une procédure d'évaluation et d'application du modèle prédictif pour une compensation dynamique.

La modélisation prédictive hybride proposée dans cette recherche fournit une solution entièrement intégrée permettant de corriger simultanément les erreurs géométriques et thermiques à l'aide de la compensation des composantes volumétriques de l'erreur quasi-

statique en temps réel. Appliquée sur un centre d'usinage vertical, l'approche proposée a permis d'obtenir des performances remarquables en termes d'amélioration de la précision de la MO en réduisant l'erreur volumétrique d'au moins 80% avec une déviation moyenne absolue en pourcentage inférieure à 5%, et ce sous des conditions thermiques variées.

Mots clés : Machines-outils, CNC. Amélioration de la précision dimensionnelle. Compensation des erreurs. Investigation numérique. Erreurs quasi-statiques. Erreurs géométriques, Erreurs thermiques, Modèle cinématique, Modélisation prédictive. Réseau de neurones.

ABSTRACT

Quasi-static errors observed on CNC machine tools are responsible for a significant portion of dimensional and geometric deviations noted on machined parts. These errors, estimated to account for nearly 70% of the errors of the machine tool (MT), are due to imperfections in the geometric and kinematic structure of the machine or result from the deformation of this structure under static and thermal loads. Although, certain of these imperfections can be reduced by improving the design of the MT, it is not possible to eliminate their effects completely. The excessive costs associated with such accuracy improvements motivated the development of error compensation strategies that improve the MT accuracy without requiring physical modification.

However, to implement these compensation strategies, a comprehensive model, which can predict and synthesize the errors, regardless of the position within the working space or the MT thermal conditions, is needed. Given the multiple and varied error sources in MT and the strong interdependence of their effects, developing such a model poses at least three major challenges: selection of the appropriate modeling technique, identification of the variables to include in the predictive models, and development of an adequate formalism to integrate and synthesize the errors into a compatible form with real-time application requirements.

This thesis aspires to address these challenges by developing a hybrid predictive modeling approach for quasi-static errors in MT for dynamic compensation. The proposed approach combines: (i) thermomechanical analysis of MT structure through experimental and numerical investigations in order to highlight cause-and-effect relationships between thermal mapping and deformation / displacement profiles, (ii) a measurement system combining thermal imaging, temperature sensors, laser interferometry, and other sensors for capturing deformations and displacements for the errors characterization, (iii) a systematic procedure for selecting the appropriate localisation of temperature sensors that represent the actual distribution of thermal fields in the MT structure, (iv) accurate and adapted models for predicting the geometric and thermal error components, (v) a generalized kinematic model for synthesizing the volumetric quasi-static error components, and (vi) an improved procedure for evaluating and applying the hybrid predictive model for dynamic error compensation.

The proposed hybrid predictive modeling approach provides a fully integrated solution for correcting simultaneously geometric and thermal errors through a real-time quasi-static error compensation. Applied to a vertical machining center, the proposed approach achieved remarkable accuracy improvements, reducing the volumetric error by more than 80%, with

an average absolute percentage deviation less than 5%, even under varying thermal conditions.

Keywords: CNC machine tools. Dimensional accuracy improvement. Error compensation. Numerical investigation. Quasi-static errors. Geometric errors, Thermal errors, Kinematic model, Predictive modeling. Neural network.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	xi
AVANT-PROPOS	xiii
RÉSUMÉ	xv
ABSTRACT.....	xviii
TABLE DES MATIÈRES	xxi
LISTE DES TABLEAUX	xxiv
LISTE DES FIGURES	xxvi
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES.....	xxxii
LISTE DES SYMBOLES.....	xxxiv
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
0.1 INTRODUCTION A LA PRECISION DES MOCN	1
0.2 METHODES DE CONTROLE DES ERREURS	3
0.2.1 Évitements des erreurs	4
0.2.2 Compensation des erreurs	5
0.3 PROBLEMATIQUE	9
0.4 OBJECTIFS.....	11
0.5 METHODOLOGIE	12
0.6 PRINCIPALES CONTRIBUTIONS.....	14
0.7 ORGANISATION DE LA THESE	15
CHAPITRE 1 APPROCHE PROPOSÉE	19
1.1 INTRODUCTION	19
1.2 IDENTIFICATION DES VARIABLES DU MODELE	20
1.3 DEVELOPPEMENT DES MODELES PREDICTIFS ET INTEGRATION DES MODELES	21
1.4 ÉVALUATION DU MODELE ET COMPENSATION DES ERREURS	22
CHAPITRE 2 INVESTIGATION NUMÉRIQUE	24

2.1	INTRODUCTION	24
2.2	DEVELOPPEMENT DU MODELE NUMERIQUE	24
2.2.1	Génération de chaleur	25
2.2.1.1	Analyse de la source thermique	26
2.2.1.2	Génération de chaleur dans les roulements	26
2.2.1.3	Génération de chaleur sur l'écrou à vis à bille	27
2.2.1.4	Génération de chaleur dans le guide linéaire	28
2.2.1.5	Génération de chaleur dans la broche	28
2.2.1.6	Génération de chaleur par les moteurs d'axe	30
2.2.2	Application du modèle	30
2.3	VALIDATION DU MODELE NUMERIQUE	36
2.3.1	Comparaison des températures mesurées et prédites	38
2.3.2	Comparaison par rapport à la déformation	39
2.4	SIMULATIONS ET IDENTIFICATION DES POINTS DE MESURE DE TEMPERATURE	42
CHAPITRE 3 MODÉLISATION GÉOMÉTRIQUE		47
3.1	INTRODUCTION	47
3.2	DESCRIPTION ET MODELISATION DES ERREURS	48
3.2.1	Évaluation des composantes de l'erreur volumétrique	55
3.3	APPLICATIONS	57
3.4	OBSERVATIONS	60
CHAPITRE 4 MODÉLISATION GÉOMETRIQUE-THERMIQUE		62
4.1	INTRODUCTION	62
4.1.1	Adaptation du modèle cinématique	62
4.1.2	Intégration des erreurs	63
4.1.3	Mesure des températures et des erreurs	65
4.2	EXEMPLE DE RÉSULTATS DE MESURE DES ERREURS	66
4.3	MODELISATION PREDICTIVE DES ERREURS GEOMETRIQUES ET THERMIQUES	69

CHAPITRE 5 ÉVALUATION DU MODÈLE ET COMPENSATION DES ERREURS	77
5.1 INTRODUCTION	77
5.2 PROCESSUS DE COMPENSATION	77
5.3 SIMULATION DE TRAJECTOIRE ET APPLICATION DE LA COMPENSATION	78
5.4 OBSERVATIONS	83
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	86
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	92
INDEX	101

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 0.1 : Exemples typiques de valeurs des erreurs rencontrées dans la littérature.....	2
Tableau 2.1 : Déviations entre déplacements mesurés et déplacements prédits	42
Tableau 2.2 : Identification des emplacements des capteurs de mesure de température	46
Tableau 3.1 : Erreurs élémentaires typiques dans le cas d'un centre d'usinage vertical	49
Tableau 5.1 : Performance des prédictions des composantes de l'erreur volumétrique	80

LISTE DES FIGURES

Figure 0.1 Illustration de l'impact des erreurs quasi-statiques sur la précision d'une MO.....	3
Figure 0.2 : Classification des techniques de réduction des erreurs dans les MO.	4
Figure 0.3 : Principe de la compensation des erreurs dans les MO.	6
Figure 1.1 : Configuration du modèle prédictif des erreurs quasi-statiques.	19
Figure 1.2 : Procédure de détermination des positions optimales des capteurs de températures.....	21
Figure 1.3 : Processus de modélisation prédictive et intégration des modèles.	22
Figure 1.4 : Processus d'évaluation du modèle et compensation.....	22
Figure 2.1 : Architecture de base d'un centre d'usinage vertical.....	31
Figure 2.2 : Aperçu du maillage de la structure de la MO.....	31
Figure 2.3 : Illustration des déformations de la MO sous l'effet de la température de l'environnement.....	32
Figure 2.4 : Illustration des champs de température avec des sources de chaleur provenant des moteurs des axes X, Y et Z.....	32
Figure 2.5 : Illustration des déformations sous l'effet des moteurs d'axes X, Y et Z.....	33
Figure 2.6 : Champ de température sous la superposition des sources de chaleur des 3 axes et de la broche.....	34
Figure 2.7 : Déformations sous les effets simultanés des moteurs d'axe et de la broche..	34
Figure 2.8 : Déformations thermiques et contraintes de Von Mises en régime permanent avec sources de chaleur sur les axes et la broche.	35
Figure 2.9 : Dispositifs de mesure pour la validation du modèle numérique	36
Figure 2.10 : Localisation des points de mesure de déplacement.	38

Figure 2.11 : Températures mesurées vs températures prédites.	39
Figure 2.12 : Déplacements mesurés vs déplacements prédits le long de l'axe X.	40
Figure 2.13 : Déplacements mesurés vs déplacements prédits le long de l'axe Y..	40
Figure 2.14 : Déplacements mesurés vs déplacements prédits le long de l'axe Z.....	41
Figure 2.15 : Localisations des capteurs de mesure de température.....	46
Figure 3.1 : Déviation de position et d'orientation de l'outil.	48
Figure 3.2 : Illustration schématique des erreurs linéaires et angulaires d'un composant en mouvement sur l'axe X.	49
Figure 3.3 : Représentation schématique de la chaîne cinématique pour une MO.....	50
Figure 3.4 : Exemples d'erreurs géométriques mesurées le long des axes X, Y et Z.....	53
Figure 3.5 : Structure typique d'un réseau de neurones multicouches.	54
Figure 3.6 : Modélisation prédictive basée sur les composantes géométriques.	56
Figure 3.7 : Modélisation basée sur les composantes de l'erreur volumétrique.....	56
Figure 3.8 : Composantes de l'erreur volumétrique mesurées, prédites et résiduelles dans le plan XY.	58
Figure 3.9 : Composantes de l'erreur volumétrique mesurées, prédites et résiduelles dans le plan YZ.	59
Figure 3.10 : Composantes de l'erreur volumétrique mesurées, prédites et résiduelles dans le plan XZ.	60
Figure 4.1 : Modèle de prédiction des composantes volumétriques de l'erreur quasi- statique.	64
Figure 4.2 : Dispositifs de mesure des erreurs et de la température.	65
Figure 4.3 : Évolution typique des profils thermiques enregistrés lors de la mesure des erreurs.....	67
Figure 4.4 : Erreurs géométriques le long de l'axe X à une température moyenne de 26°C.....	67
Figure 4.5 : Exemples de variation des erreurs l'erreur linéaire δ_{xx} sous les effets de la variation de la température moyenne.	68

Figure 4.6 : Exemple de dérives thermiques de la broche à une température moyenne variant entre 20 à 32°C.	69
Figure 4.7 : Composantes [E_M E_P E_R] de l'erreur volumétrique mesurée,prédite et résiduelle à 26°C dans les plans XY.....	71
Figure 4.8 : Composantes [E_M E_P E_R] de l'erreur volumétrique mesurée, prédite et résiduelle à 26°C dans les plans YZ.	72
Figure 4.9 : Composantes [E_M E_P E_R] de l'erreur volumétrique mesurée, prédite et résiduelle à 26°C dans les plans XZ.	73
Figure 4.10 : Variations de la composante E_{MX} , E_{MY} et E_{MZ} à la suite de la variation de la température moyenne de 20 à 26°C dans le plan XY.	73
Figure 4.11 : Erreurs résultantes mesurées (E_{MXYZ}) et prédites (E_{PXYZ}) dans les plans XY, YZ et XZ à une température moyenne d'environ 20°C.	75
Figure 4.12 : Erreurs résultantes mesurées (E_{MXYZ}) et prédites (E_{PXYZ}) dans les plans XY, YZ et XZ à une température moyenne d'environ 26°C.	76
Figure 5.1 : Représentation simplifiée du processus de compensation des erreurs dans les MO..	78
Figure 5.2 : Composantes de l'erreur volumétrique avant et après compensation dans le plan XY à une température moyenne d'environ 24°C	81
Figure 5.3 : Composantes de l'erreur volumétrique avant et après compensation dans le plan YZ à une température moyenne d'environ 24°C.....	82
Figure 5.4 : Composantes de l'erreur volumétrique avant et après compensation dans le plan XZ à une température moyenne d'environ 24°C.....	83

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

MO : machine-outil.

MOCN : machine-outil à commande numérique.

R^2 : coefficient de détermination.

MAD : déviation moyenne absolue.

MAPE : erreur moyenne absolue en pourcentage.

MRSE : racine de l'erreur quadratique moyenne.

MSE : erreur quadratique moyenne.

SSE : somme des erreurs quadratiques.

MTH : matrice de transformation homogène.

LISTE DES SYMBOLES

δ_{ij} : Erreur linéaire dans la direction i lors d'un déplacement le long de l'axe j .

ϵ_{ij} : Erreur angulaire autour de l'axe i lors d'un déplacement le long de l'axe j .

δ_{ib} : Erreur linéaire de la broche le long de l'axe i .

ϵ_{ib} : Erreur angulaire de la broche autour de l'axe i .

s : Seconde.

μm : Micromètre.

mm : Millimètre.

min : Minute.

arcsec : Arcseconde.

$^{\circ}\text{C}$: Degré Celsius.

X_d : Position désirée.

X_c : Position commandée.

X_a : Position actuelle.

Ex_d : Écart entre les positions désirée et actuelle.

H_f : Puissance de chaleur générée.

n : Vitesse de rotation.

M : Couple de frottement du roulement.

M_1 : Couple de frottement mécanique.

M_2 : Couple de frottement visqueux.

f_1 : Facteur lié au type du roulement.

p_1 : Précharge du roulement.

f_0 : Facteur relatif au type du roulement.

H_n : Chaleur de frottement générée par l'écrou.

T_n : Couple total de frottement.

H_{gf} : Taux de chaleur.

F_{gf} : Force de frottement dans le guide linéaire.

V : Vitesse.

p : Charge externe.

p_0 : Classe de précharge.

ν : Viscosité.

η : Efficacité.

H_m : Chaleur totale produite du moteur.

P_f : Perte de puissance mécanique.

P_h : Perte de puissance magnétique.

P_{CU} : Perte de la puissance électrique.

P_t : Perte d'hystérésis.

P_w : Perte de courant de Foucault.

C : Valeur constante liée à l'acier électrique.

C' : Coefficient de frottement.

$B_{\max}$: Densité maximale du flux magnétique.

t : Épaisseur de la tôle d'acier.

γ_c : Facteur lié au type du roulement.

ρ : Résistivité électrique.

I : Intensité du courant.

L : Longueur.

L_f : Longueur du rotor.

ω : Vitesse angulaire.

ρ_{air} : Densité de l'air.

M_T : Couple de sortie du moteur.

T : Température.

α : Diffusivité thermique.

$\nabla^2 T$: Laplacien de la température.

Q : Sources internes de chaleur.

m_1 : Coefficient empirique.

O_i : Sortie d'un neurone de la couche précédente i .

O_j : Sortie du neurone du courant j .

W_{ij} : Poids de la connexion entre les neurones i et j .

θ_j : Écart associé au neurone j .

$T_1, T_2 \dots T_{11}$: Capteurs de températures.

$[E_X \ E_Y \ E_Z]$: Vecteur de l'erreur volumétrique.

E_X : Composante de l'erreur volumétrique dans la direction X.

E_Y : Composante de l'erreur volumétrique dans la direction Y.

E_Z : Composante de l'erreur volumétrique dans la direction Z.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

0.1 Introduction à la précision des machines-outils à commande numérique

La qualité des pièces mécaniques produites par usinage sur les machines-outils (MO) découle largement du degré de précision et de stabilité des machines elles-mêmes. La précision de la MO est en grande partie limitée par une géométrie imparfaite de sa structure mécanique et de sa chaîne cinématique ou à la suite de déviations dues à la modification de cette géométrie sous des sollicitations mécaniques, thermiques et dynamiques survenant pendant l'opération d'usinage.

Généralement, il n'est pas possible d'identifier facilement les effets de chacune des causes de perte de précision en mesurant les erreurs dimensionnelles et géométriques sur la pièce finie, car les sources d'erreurs sont multiples et leurs effets sont interdépendants. Pour mieux identifier les sources d'erreurs, comprendre leurs interactions et contrôler leurs effets sur la précision globale de la MO, il est nécessaire de procéder, dans un premier temps, par classer ces différentes sources d'erreurs selon leur nature, le stade durant lequel elles sont actives, la nature de leur interdépendance et leur comportement dans le temps. Typiquement, les erreurs peuvent être classées dans l'une ou l'autre des catégories suivantes [1]:

1. Les sources d'erreurs attribuables à la MO qui peuvent être considérées selon deux optiques différentes selon leurs comportements dans le temps.
 - (i) Les sources d'erreurs quasi-statiques ou variant lentement dans le temps qui peuvent être divisées en trois classes : celles associées à la structure géométrique de la MO, celles dues aux sollicitations mécaniques statiques, et finalement celles dues aux sollicitations thermiques.

- (ii) Les sources d'erreurs dynamiques qui se rapportent aux comportements dynamiques de la structure de la MO et qui englobent la rigidité, la broche, les diverses sources de vibrations ainsi que les déformations sous les forces inertielles.
2. Les sources d'erreurs attribuables au procédé de coupe qui découlent de la nature et du comportement dynamique du procédé et qui peuvent être classées en quatre catégories : celles provoquées par les déformations dues aux forces de coupe, celles provoquées par les sollicitations thermiques générées par la coupe, celles provoquées par les vibrations, et finalement celles associées à l'outil, à la pièce et leurs interactions (déformation, usure ou autres).

Les erreurs quasi-statiques sont responsables de la majorité des déviations dimensionnelles et géométriques sur les pièces mécaniques produites sur des MO. La table 0.1 rapporte quelques données typiques rencontrées dans la littérature sur les valeurs que ces déviations peuvent atteindre. Les effets que peuvent avoir les erreurs quasi-statiques sur la précision volumétrique d'une MO sont illustrés à la figure 0.1. Il est également rapporté dans la littérature que les erreurs thermiques peuvent atteindre jusqu'à 70% des erreurs observées sur les pièces usinées sur les MO courantes [1].

Tableau 0.1 : Exemples typiques de valeurs des erreurs rencontrées dans la littérature [2-4]

Sources d'erreurs		Niveau d'erreurs
Erreurs quasi-statiques	Géométriques	Typiquement entre 5 à 50 μm
	Thermiques	Typiquement entre 5 à 12 $\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}/\text{m}$
Erreurs dynamiques	Vitesse, accélération, vibrations, ...	Typiquement entre 2 à 8 μm (peut dépasser 15 μm)
Commande et logiciel	Algorithmes de traitement	< 2 μm

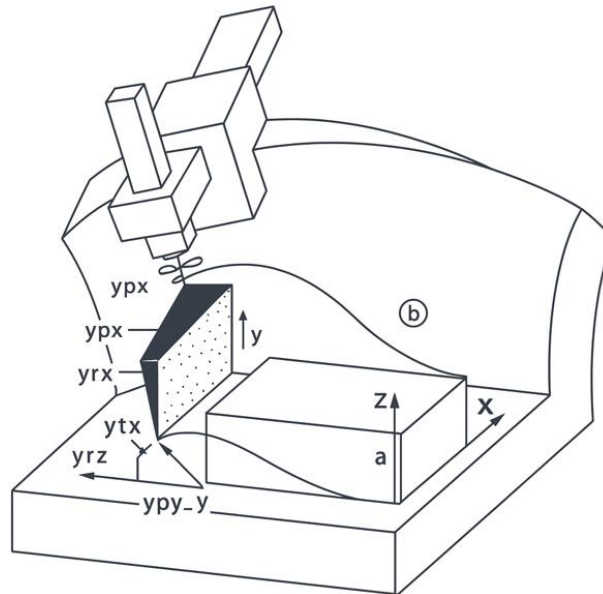


Figure 0.1 : Illustration de l'impact des erreurs quasi-statiques sur la précision d'une MO

0.2 Méthodes de contrôle des erreurs

Le contrôle des erreurs dans les MO a longtemps été traité comme un problème de conception en adoptant principalement le traditionnel essai-erreur faute d'approches formalisées. Cela a entraîné des avancées lentes avec des performances limitées, alors que le véritable enjeu réside dans le développement de stratégies et d'outils d'analyse capables de prédire et de contrôler les erreurs de façon globale surtout pour des mécanismes où la précision constitue le principal critère de performance. Cela a conduit au développement de nombreuses méthodes permettant d'opérer des modifications sur les MO existantes pour améliorer leur précision en adoptant des techniques avancées beaucoup plus sophistiquées allant de la commande adaptative géométrique à la compensation en temps réel [5-7].

Une brève classification des différentes techniques de réduction des erreurs dans les MO est présentée dans la figure 0.2. Ces techniques peuvent être séparées principalement en deux catégories : évitement des erreurs et compensation des erreurs.

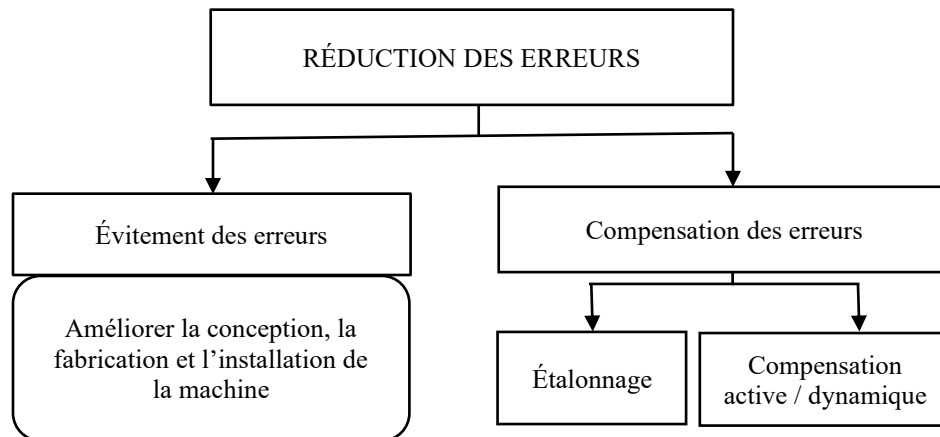


Figure 0.2 : Classification des techniques de réduction des erreurs dans les MO

0.2.1 Évitements des erreurs

L'évitement des erreurs consiste à éliminer les sources d'erreurs ou les effets de ces sources avec une meilleure conception de la machine. La notion des évitements des erreurs concerne les erreurs fonctionnelles dans les mécanismes élémentaires qui composent les structures géométrique et cinématique de la MO. La solution peut être l'adoption de nouvelles solutions technologiques à travers l'utilisation de nouveaux designs, mécanismes de transmission de mouvement ou matériaux. Une autre option consiste à utiliser des techniques d'atténuation telle que des systèmes de refroidissement forcé afin de lutter contre les erreurs thermiques dans des zones sensibles telles que celles de la broche et des moteurs des axes.

Les techniques d'évitement des erreurs sont difficiles à réaliser, coûteuses et très laborieuses à définir. En général, l'évitement des erreurs est le résultat d'une notion de travail minutieux. Certaines solutions technologiques vont jusqu'à revoir le système d'isolation pour lutter contre les vibrations et l'utilisation des matériaux polymères et synthétiques. Le contrôle de la température dans l'environnement direct de la MO et l'utilisation d'une lubrification efficace pour la stabilité thermique de la structure constituent des solutions

efficaces pour le contrôle et la précision de la MO. L'évitement des erreurs est la première phase à considérer dans l'amélioration de la précision d'une MO. Au cours des dernières décennies, de nombreux travaux ont été conduits au niveau de l'évitement des erreurs dans le but de réduire les erreurs thermiques par des améliorations apportées au design des MO (structure thermiquement symétrique, éloignement des sources de chaleur, installation d'unité de refroidissement, etc.). Cependant, les coûts générés par ce type de solutions sont exorbitants et ne sont pas justifiables comparativement au niveau de précision qu'elles peuvent produire. De plus, de nombreuses limitations physiques et technologiques dans les structures des MO sont difficiles à surmonter uniquement par des techniques de conception. C'est la raison principale qui a permis aux techniques de compensation des erreurs de connaître un intérêt considérable au cours des dernières années. Ces techniques offrent des solutions permettant d'améliorer la précision des MO sans nécessiter aucune modification dans leur conception [8].

0.2.2 Compensation des erreurs

La compensation des erreurs est un concept qui consiste à identifier les sources d'erreurs et anticiper leurs effets afin de corriger toutes les déviations qui peuvent affecter la trajectoire programmée pour une opération d'usinage. Durant l'usinage, la position désirée de l'outil (X_d) n'est pas atteinte avec précision à cause de défauts géométriques et de sollicitations mécaniques et thermiques qui provoquent des déviations entraînant une erreur de positionnement (X_p). Pour corriger cette erreur, il faut être en mesure de la quantifier. C'est pour cette raison que la compensation est souvent basée sur des modèles capables d'estimer ou même prédire l'erreur pour produire la correction et la nouvelle position à commander (X_c) afin d'obtenir une trajectoire corrigée. La figure 0.3 présente un schéma concept de la compensation des erreurs pour illustrer ce processus. L'objectif de la compensation est donc de déterminer une entrée additionnelle de manière à éliminer l'erreur et bénéficier d'un procédé avec une sortie compensée. Plusieurs principes de compensation

ont été proposés au cours des dernières décennies. L'une des versions les plus avancées et les plus avantageuses est celle de la compensation dynamique.

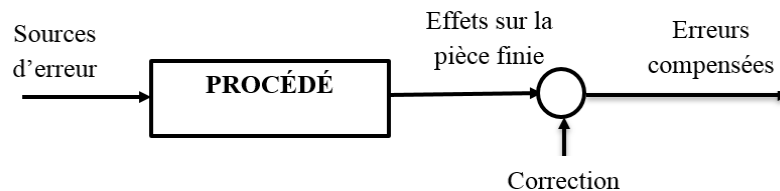


Figure 0.3 Principe de la compensation des erreurs dans les MO

La compensation dynamique est une technique de correction en temps réel des erreurs qui apparaissent sur des MO lors d'une opération d'usinage et qui tient compte de divers facteurs pouvant influencer la qualité dimensionnelle et géométrique des pièces mécaniques produites. La compensation dynamique se distingue des techniques classiques par la correction des erreurs en temps réel. La qualité de la compensation dépend principalement de la fiabilité des dispositifs de mesure des erreurs, de la robustesse des modèles d'estimation et de prédiction des erreurs et de la stratégie de modification et d'implantation de la commande adaptative [9-11].

Bien qu'elle soit également relativement complexe à mettre en œuvre, la compensation dynamique est la plus avancée de toutes les techniques de compensation. Cette approche remplace progressivement les procédures longues et coûteuses des méthodes classiques telles que la compensation par étalonnage, par pré-étalonnage, post-étalonnage ou par étalonnage intermittent. La mise en œuvre de la compensation dynamique repose fondamentalement sur le développement d'un modèle prédictif précis et robuste capable de prendre en charge les effets de toutes les sollicitations qui affectent la structure de la machine qu'elles soient géométriques, statiques, thermiques ou dynamiques et s'adapter aux exigences des conditions de fonctionnement de la MO. Le modèle prédictif constitue la base

de la commande adaptative corrective. Une modélisation déficiente peut non seulement compromettre l'efficacité de la compensation, mais aussi entraîner de nouvelles incertitudes. Par conséquent, la performance globale d'un système de compensation dynamique est directement conditionnée par la qualité, la robustesse et la capacité d'adaptation en temps réel du modèle prédictif sur lequel elle repose [12-14].

Les premières approches proposées ont consisté à élaborer des modèles analytiques basés sur des modèles thermomécaniques linéaires simplifiés [8]. Ces modèles ont rapidement montré leurs limites face à la complexité des structures et à la variabilité des conditions d'usinage [15-18]. Pour dépasser ces limitations, la méthode des éléments finis a permis une modélisation plus détaillée des comportements thermomécaniques des MO en intégrant des géométries et des propriétés thermiques plus complexes. Néanmoins, le besoin en ressources de calcul et les temps de simulation élevés restaient des obstacles à leur utilisation dans des approches de compensation dynamique [19-20].

Rapidement, les recherches se sont orientées vers des modèles hybrides, combinant des approches analytiques pour prédire les déformations et des simulations numériques par la méthode des éléments finis pour affiner les prédictions dans les zones critiques. Cette hybridation visait à améliorer la précision tout en réduisant les temps de calcul [21-25]. Pour cela, des modèles d'erreurs thermiques sont construits en corrélant les variations de position de la MO à des mesures de température acquises sur des endroits spécifiques sur la structure de la MO [26-28]. Cependant, la précision de ces modèles était fortement tributaire de la qualité de la sélection des points de mesure. Un nombre insuffisant de capteurs dans le modèle diminue la précision, tandis qu'un excès nuit à la robustesse et augmente la charge de calcul. La simulation numérique restait une option économique pour effectuer des analyses thermoélastiques et aider à localiser les zones thermiques critiques à partir des cartographies thermiques structurées [29-30].

La modélisation prédictive des erreurs est d'autant plus complexe que les conditions thermomécaniques évoluent en permanence dépendamment des cycles d'usinage, les conditions de coupe, l'utilisation de liquide de refroidissement et les changements

environnementaux. Ces variations rendent difficile l'obtention de modèles prédictifs suffisamment robustes. D'autres recherches se sont concentrées sur la sélection du nombre de capteurs et de l'emplacement des points de mesure de température et sur l'amélioration de la robustesse des modèles pour s'adapter à différentes conditions de fonctionnement [31-33].

Des modèles empiriques, tels que ceux basés sur l'analyse de régression, ont apporté des solutions intéressantes en permettant de prédire les erreurs dans certaines conditions spécifiques. Toutefois, ils restent sensibles aux incertitudes de mesure et aux interactions non linéaires entre positions nominales dans le volume de travail, conditions de fonctionnement de la machine, champs de température et erreurs de positionnement. Ces conditions limitent grandement leur fiabilité dans des environnements changeants [34-37].

Pour surmonter ces limites, des approches de modélisation dite intelligentes telles que les réseaux de neurones, la logique floue et les algorithmes génétiques ont été introduits, démontrant un potentiel important pour améliorer la qualité des modèles prédictifs des erreurs [38-41]. Ces techniques se distinguent par leur capacité à gérer des relations non-linéaires impliquant un grand nombre de variables avec de fortes interactions. Les réseaux de neurones, en particulier, se sont révélés très performants pour traiter les données complexes et abondantes générées dans des processus comme celui de l'usinage. Cette capacité à gérer des entrées et des sorties multiples permet d'améliorer grandement l'efficacité du processus de modélisation et à mieux intégrer l'ensemble des variables susceptibles d'avoir des effets significatifs sur la précision de la MO [42-43].

Malgré ces avancées, la sélection des variables à inclure dans le modèle demeure un enjeu critique. Le nombre et l'emplacement des capteurs de mesure de température pour représenter le mieux possible la distribution des gradients thermiques dans la structure de la machine doivent être choisis avec soin pour garantir la précision et la fiabilité de la modélisation [44-45]. Plusieurs méthodes classiques, telles que la sélection vers l'avant, l'élimination vers l'arrière, l'analyse corrélationnelle ou la régression progressive, ont été utilisées pour permettre la sélection des variables. Toutefois, ces techniques présentent des

limites et ne permettent pas de converger systématiquement vers le meilleur modèle à cause de la forte colinéarité entre certaines variables et surtout à cause de la difficulté de prendre en compte toutes les interactions complexes entre les variables [46-47].

Des approches plus récentes se sont orientées vers des stratégies mettant en œuvre des techniques de modélisation avancées avec des critères statistiques multiples et variés pour combiner la sélection des variables et l'optimisation de la modélisation. L'objectif reste d'assurer une prédiction des erreurs en temps réel, stable et précise, tout en garantissant la robustesse du modèle face à la variabilité des conditions d'usinage [44], [48-52].

De nos jours, la tendance est à la combinaison des méthodes expérimentales, des simulations numériques, des techniques d'intelligence artificielle et des analyses statistiques pour développer des modèles hybrides performants avec une attention particulière à la manière d'intégrer des erreurs provenant de sources et de modalités variées [53-58]. Toutes ces approches visent à rendre disponibles des prédictions précises, fiables et robustes pour une compensation dynamique des erreurs dans les MO afin d'assurer une précision optimale des pièces usinées.

0.3 Problématique

Un bref survol des recherches dans le domaine de la précision des MO montre que les erreurs quasi-statiques demeurent des problèmes majeurs qui limitent la qualité dimensionnelle et géométrique des pièces mécaniques produites par usinage sur les MO. La littérature rapporte que ces erreurs peuvent être responsables d'un pourcentage significatif des erreurs observées sur les pièces usinées sur les MO courantes. Pour être en mesure de les compenser en temps réel, il est nécessaire de disposer de moyens permettant d'avoir accès à une évaluation constante et instantanée de ces erreurs. En pratique, il n'est pas facile de mesurer ces erreurs pendant l'opération d'usinage. Pour remédier à cette situation, plusieurs méthodes ont été développées pour les estimer dans des conditions spécifiques. Si la synthèse des erreurs de nature géométrique ne constitue pas une difficulté importante, celle relative à

la prise en compte de leurs variations sous les effets thermiques présente un défi majeur. Ces variations peuvent dépendre aussi bien de la quantité de chaleur que de la distribution de température dans la structure ou encore de la distribution des contraintes générée dans la structure. Si la quantité de chaleur absorbée par la structure de la MO et la distribution des contraintes sont relativement plus difficiles à mesurer en temps réel, la distribution de température s'avère une option plus pratique et moins dispendieuse permettant un compromis raisonnablement acceptable. Cette option soulève d'autres problèmes en rapport avec la nature du modèle à développer pour les prendre en charge. Les erreurs sont dues à des déformations thermiques non linéaires et variant dans le temps à cause de variations de température non uniformes dans la structure de la MO. Ces variations sont elles-mêmes liées à l'emplacement des sources de chaleur et à leur intensité ainsi qu'à la configuration géométrique de la MO et qu'aux coefficients de résistance thermique des différents éléments composant sa structure. Par conséquent, le modèle d'intégration de ces variations doit surmonter les difficultés inhérentes à la dimension non linéaire des relations qui lient les erreurs à la distribution de température dans la MO. De plus, le modèle doit également être compatible avec les exigences des applications en temps réel. L'élaboration de ce type de modèle doit surmonter deux obstacles majeurs : (i) le choix du nombre et de l'emplacement des capteurs de température nécessaire à une représentation optimale de la distribution de température dans la MO, et (ii) le choix de la technique de modélisation la plus adaptée à la nature non linéaire du problème et l'identification des conditions de modélisation qui permettraient l'obtention du modèle précis, robuste et capable de s'adapter à une grande variété de statuts thermiques de la MO et des conditions d'usinage.

La majorité des modèles proposés dans la littérature ont été basés sur des choix intuitifs aussi bien au niveau des techniques de modélisation qu'au niveau du nombre et de l'emplacement des capteurs utilisés pour caractériser la distribution de la température. Il est évident que d'une part, un grand nombre de capteurs augmentent les efforts d'expérimentation et de traitement des données et, d'autre part, de mauvais emplacements des capteurs affectent la qualité du modèle.

Les quelques tentatives pour une sélection rapide de ces points de mesure de températures se sont concentrées sur des méthodes statistiques qui offrent la possibilité de désigner un sous-ensemble de points de mesure sans qu'elles soient capables de désigner des sous-ensembles alternatifs de taille identique qui peut être considérée comme valable en fonction de critères de sélection spécifiques. Par conséquent, le développement de modèles numériques permettant de réaliser des analyses thermomécaniques structurées et évaluer par simulations des scénarios de gradients thermiques afin de quantifier leurs effets sur l'intensité des déformations et les déplacements qu'elles provoquent dans la structure de la machine serait une option pertinente à considérer. Au niveau de la modélisation, il est nécessaire de penser à une nouvelle architecture de modélisation hybride qui intègre les erreurs géométriques et les erreurs thermiques en combinant des modèles prédictifs pour les composantes élémentaires des erreurs et des méthodes de synthèse de ces erreurs sous forme de composante volumétrique dans le but de simplifier le processus de compensation. De cette manière, il est possible de remédier aux limitations constatées de longue date avec des modèles de compensation se contentant traditionnellement du domaine géométrique ou thermique, mais pas nécessairement les deux en même temps. Bien que des études récentes ont proposé des stratégies avancées de compensation thermique, ces modèles se limitent généralement à la prédiction d'erreurs thermiques, sans tenir compte ni de la synthèse volumétrique ni de l'adaptabilité des modèles prédictifs aux applications en temps réel.

0.4 Objectifs

L'objectif général de ce travail de recherche consiste à développer une approche structurée de modélisation prédictive robuste des erreurs quasi-statiques dans les MO pour une compensation dynamique. L'approche proposée combine des investigations expérimentales et numériques pour une sélection ordonnée et efficace de la nature et du nombre de variables à considérer pour décrire les sources d'erreurs et leur effet sur la précision de la MO, une modélisation prédictive des erreurs géométriques et thermiques de manière intelligente et intégrée ainsi qu'une procédure d'évaluation et d'application du

modèle prédictif proposé pour la compensation dynamique. Plus spécifiquement, il s'agit principalement de :

1. identifier les sources des erreurs et les principaux paramètres susceptibles de contribuer à leur variation,
2. développer et valider un modèle numérique pour l'analyse thermoélastique de la structure de la machine dans le but de mettre en relief les relations de cause à effet entre la cartographie thermique et les profils de déformations et de déplacement dans la structure de la MO,
3. conduire une campagne de simulation s'inspirant de cas réel dans le but d'identifier les localisations les plus pertinentes pour l'implantation de capteurs de mesure de température,
4. développer un formalisme général permettant d'intégrer les différentes sources d'erreur dans un même modèle prédictif global,
5. conduire une campagne expérimentale pour la mesure des composantes géométriques et thermiques,
6. développer des modèles pour la prédiction des composantes élémentaires des erreurs géométriques et thermiques,
7. développer le modèle prédictif global pour la synthèse des composantes volumétriques de l'erreur,
8. développer une procédure d'évaluation et d'application du modèle prédictif pour la compensation dynamique.

0.5 Méthodologie

Pour atteindre les objectifs fixés, une méthodologie en six phases est adoptée. La première phase consiste à identifier les sources d'erreurs et comprendre leurs interactions en s'interrogeant sur les moyens de contrôler leurs effets sur la précision globale de la MO. Cette phase devrait conduire à une classification des différentes sources d'erreurs selon leur

nature et leur comportement dans le temps. Une attention particulière sera portée à la variation des erreurs géométriques sous les effets des sollicitations thermiques.

La deuxième phase consiste à développer un modèle numérique pour réaliser une analyse thermomécanique de la structure de la MO et simuler son comportement dans des conditions statiques, thermiques et dynamiques proches de son fonctionnement réel. Une investigation expérimentale accompagne cette modélisation, basée sur la méthode des éléments finis, pour caractériser les paramètres nécessaires au fonctionnement du modèle numérique et générer les données réelles indispensables à sa validation.

La troisième phase consiste à conduire des simulations du comportement de la MO dans le but de tester différents scénarios de gradients thermiques et analyser leurs effets sur l'intensité des déformations et des déplacements qu'elles provoquent dans la structure de la machine. Cette campagne de simulation est susceptible d'aider à l'identification des zones critiques favorable à l'implantation des capteurs de température où les variations thermiques ont un impact significatif sur les déformations. Pour ce faire, le modèle numérique sera utilisé pour analyser la distribution des températures et des déformations dans la structure de la machine en tenant compte des conditions réelles du fonctionnement de la machine.

La quatrième phase mise sur le développement du formalisme général permettant d'intégrer les différentes sources d'erreur identifiées dans les phases précédentes dans le même modèle prédictif global. Une modélisation cinématique de la configuration géométrique de la MO utilisant les matrices de transformations homogènes est de nature à permettre de synthétiser l'ensemble des erreurs élémentaires identifiées sous forme de composantes volumétriques tridimensionnelles faciles à exploiter dans le processus de compensation. Ce formalisme sert également à faire le bilan des erreurs intégrées dans le modèle dans le but de préparer le montage expérimental nécessaire à la mesure des différentes composantes de l'erreur. Ce montage expérimental combine caméra thermique, capteurs de température, laser interféromètre et autres capteurs de mesure de déformations et de déplacements de la broche.

La cinquième phase consiste à développer des modèles de prédiction des composantes élémentaires des erreurs géométriques et thermiques. Selon la nature des erreurs, plusieurs catégories de modèles sont proposées. Pour chaque modèle, le choix de la technique de modélisation et des variables à inclure dans le modèle fait l'objet d'une analyse méthodique et approfondie. Des modèles à base de réseaux de neurones ont été préférés pour leur capacité et leur flexibilité d'utilisation. Tous les modèles proposés sont validés à l'aide de données réelles avant de les combiner dans un modèle prédictif global pour l'intégration des erreurs élémentaires et la synthèse des composantes volumétrique de l'erreur.

La dernière phase consiste à développer une procédure d'évaluation et d'application du modèle prédictif global obtenu pour la compensation dynamique. La validation est réalisée sur la base de conditions de fonctionnement typique et atypique de la machine. Des critères statistiques éprouvés sont choisis pour conduire cette évaluation. Des simulations de trajectoires sont également planifiées pour tester l'efficacité de la stratégie de compensation dynamique proposée.

0.6 Principales contributions

Cette thèse propose des contributions significatives dans le domaine de la compensation dynamique des erreurs dans les MO. Les travaux de recherche sont réalisés selon une approche méthodologique intégrée et innovante. Elle combine investigation expérimentale et numérique pour l'analyse de comportement thermomécanique des MO, modélisations cinématique et géométriques pour l'intégration et la synthèse des erreurs ainsi qu'une stratégie structurée de test et de validation de l'approche de la modélisation prédictive des erreurs quasi-statiques et de leur compensation dynamique. Les principales contributions de cette thèse se résument par :

- La détermination des points stratégiques de mesure de température selon une approche systématique basée sur l'analyse thermomécanique de la MO.

- Le développement d'une modélisation prédictive hybride combinant modèle cinématique et réseaux de neurones pour l'intégration et la synthèse des composantes volumétriques tridimensionnelles des erreurs quasi-statiques.

0.7 Organisation de la thèse

Cette thèse est structurée en sept parties principales. Elle commence par une introduction générale consacrée à la définition des concepts relatifs à la précision des MO à commande numérique, des méthodes pour les contrôler et de l'évolution de la modélisation prédictive des erreurs à intégrer dans la compensation avec un retour détaillé sur la littérature pertinente avant de présenter la problématique et formuler les objectifs de la recherche. Le reste de l'introduction a été consacrée à la méthodologie adoptée et à la présentation des principales contributions à l'organisation de la thèse.

Le premier chapitre présente conceptuellement les différentes phases de l'approche proposée pour le développement des modèles prédictifs des erreurs quasi-statiques dans les MO en vue d'une compensation dynamique. Ce chapitre met en lumière les trois actions clés de la procédure adoptée à savoir : l'identification optimale des capteurs de température à travers la modélisation numérique, la modélisation prédictive des erreurs et leur intégration ainsi que la validation du modèle prédictif et la compensation.

Le chapitre 2 couvre le développement, la validation et l'exploitation de la modélisation numérique. Il détaille le développement du modèle numérique en expliquant la formulation, les équations fondamentales, les hypothèses, les conditions aux limites ainsi que le processus de validation du modèle. Le chapitre finit par présenter les résultats des simulations et les analyses qui ont conduit à la localisation des points de mesure des températures.

Le chapitre 3 est consacré au développement d'un modèle cinématique généralisé basé sur les matrices de transformations homogènes pour la représentation de la configuration géométrique de la MO et qui va servir de support à l'intégration des erreurs et à la synthèse

de l'erreur volumétrique. Le chapitre traite également de la dimension expérimentale de la mesure des erreurs géométriques.

Le chapitre 4 présente une étude approfondie du développement et de la validation du modèle prédictif des composantes de l'erreur quasi-statique volumétrique combinant réseaux de neurones et modèles cinématiques pour intégrer des erreurs liées à la broche et aux axes de la machine dans un environnement thermique changeant.

Le chapitre 5 traite de l'analyse et l'évaluation des performances de l'approche de la modélisation prédictive proposée en testant son efficacité à travers une série de simulations de trajectoires. L'application de la procédure de compensation dynamique est également couverte dans ce chapitre.

Finalement, la conclusion générale revient sur la problématique, rappelle les objectifs et résume les principaux résultats tout en mettant en lumière les contributions et les observations importantes qui en découlent. Elle propose également quelques pistes et suggestions pour des suites éventuelles à donner aux travaux présentés dans cette thèse.

CHAPITRE 1

APPROCHE PROPOSÉE

1.1 INTRODUCTION

L'objectif de cette thèse consiste à développer une approche structurée de modélisation prédictive robuste des erreurs quasi-statiques dans les MO pour une compensation dynamique. La structure générale du modèle prédictif est schématisée dans la figure 1.1. Pour mettre en œuvre cette structure, plusieurs étapes sont nécessaires pour identifier les variables d'entrée à considérer, la nature des modèles à exploiter et la procédure à suivre pour développer le modèle.

L'approche proposée combine (i) un modèle numérique simulant le comportement thermomécanique de la MO, (ii) un système de mesure de déplacements et de températures (iii); une procédure systématique de sélection du nombre et de la localisation des points les plus adéquats pour la mesure de la température afin de représenter le plus fidèlement possible la distribution réelle des champs thermiques dans la structure de la MO; (iv) des modèles adaptés pour la prédiction des composantes élémentaires des erreurs géométriques et thermiques, (v) un modèle cinématique généralisé pour la synthèse des composantes volumétrique de l'erreur quasi-statique et (vi) une procédure d'évaluation et d'application du modèle prédictif pour la compensation dynamique.

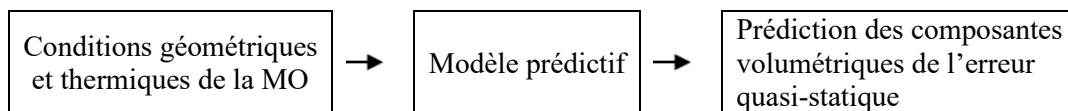


Figure 1.1 : Configuration du modèle prédictif des erreurs quasi-statiques

1.2 IDENTIFICATION DES VARIABLES DU MODELE

L'approche proposée repose sur le développement d'un modèle capable de prédire les composantes de l'erreur volumétrique quasi-statique quelle que soit la position dans le volume de travail de la MO et quelle que soit les conditions thermiques auxquelles elle est soumise. Pour bien caractériser ces conditions, il faut avoir accès à des données représentatives et fiables sur la distribution de la température dans la structure de la MO en fonction des paramètres et des cycles de son fonctionnement. Cela n'est possible que si on conduit une analyse ordonnée et systématique du comportement thermomécanique de la MO dans des conditions représentatives de son fonctionnement réel afin de dégager des indicateurs permettant de sélectionner les points les plus appropriés pour l'installation des capteurs de température. Cette analyse est rendue possible grâce au développement et à la validation expérimentale d'un modèle numérique 3D.

L'analyse thermomécanique de la MO doit suivre plusieurs étapes. Dans un premier temps, un modèle numérique 3D est développé à l'aide de la méthode des éléments finis pour simuler les effets thermiques sur les différentes parties de la machine. Ensuite, un dispositif expérimental est mis en place pour produire les données nécessaires à la validation du modèle numérique. Après la validation, une campagne de simulations est planifiée pour tester différents scénarios de fonctionnement sous différentes conditions thermiques. Les données issues des expérimentations et des simulations sont analysées pour extraire des indicateurs les plus pertinents pour une sélection optimale des points les plus appropriés pour l'installation des capteurs de température. La figure 1.2 illustre ces principales étapes menant à l'identification optimale des capteurs.

1. Développement du modèle numérique 3D à l'aide de la méthode des éléments finis.
2. Développement du dispositif expérimental et production des données nécessaires à la validation du modèle numérique.
3. Validation du modèle numérique.
4. Planification et exécution de simulations dans des conditions thermiques variées.
5. Analyse des données et extraction des indicateurs pour la sélection des points les plus appropriés pour l'installation des capteurs de température.

Figure 1.2 : Procédure de détermination des positions optimales des capteurs de température

1.3 DEVELOPPEMENT DES MODELES PREDICTIFS ET INTEGRATION DES MODELES

Pour être capable de prédire les composantes de l'erreur volumétrique quasi-statique quelle que soit la position dans le volume de travail de la MO et quelle que soit les conditions thermiques, il dispose des prédictions pour l'ensemble des erreurs élémentaires ou locales pour ensuite les intégrer dans un modèle prédictif global. La première étape de ce processus consiste à élaborer un modèle cinématique capable de synthétiser les composantes volumétriques. Ce modèle doit s'appuyer sur une représentation structurée et rigoureuse de la configuration géométrique de la MO. Les mouvements relatifs des axes les uns avec les autres, ainsi que les erreurs locales qui leur sont associées sont formulés à l'aide des matrices de transformations homogènes. Le modèle cinématique obtenu permet de faire un bilan de l'ensemble des erreurs élémentaires à mesurer, à classer, à modéliser et plus tard à prédire en fonction de l'état thermique de la machine. Sur cette base, plusieurs modèles prédictifs s'avèrent nécessaires. Un modèle par axe numérique et un modèle pour la broche. Une fois ces modèles prédictifs établis, ils sont intégrés dans le modèle cinématique déjà défini. Cette intégration permet une prédiction globale des composantes volumétriques de l'erreur quasi-

statique. La figure 1.3 illustre le processus de modélisation prédictive et d'intégration des modèles.

1. Développement du modèle cinématique pour la synthèse des erreurs.
2. Mesure des erreurs géométriques et thermiques pour supporter le processus de modélisation prédictive.
3. Développement des modèles prédictifs pour les erreurs élémentaires géométriques et thermiques.
4. Évaluer les performances des différents modèles.
5. Intégration des modèles prédictifs.

Figure 1.3 : Processus de modélisation prédictive et intégration des modèles

1.4 ÉVALUATION DU MODELE ET COMPENSATION DES ERREURS

La compensation dynamique des erreurs dans les MO repose sur trois étapes principales. La première consiste à développer un modèle capable de prédire les composantes volumétriques de l'erreur quasi-statique. La seconde consiste à évaluer les performances de ce modèle dans différentes conditions afin de tester son efficacité et sa robustesse à travers une série de simulations de trajectoires avant de l'utiliser dans le processus de compensation. Enfin, la troisième étape consiste à appliquer le modèle pour une compensation dynamique et évaluer ses performances dans des cas typiques et atypiques. La figure 1.4 résume les trois étapes du processus d'évaluation du modèle prédictif et de la compensation dynamique.

1. Évaluer les performances des différents modèles dans des conditions géométriques et thermiques variées.
2. Prédiction des composantes volumétriques de l'erreur quasi-statique.
3. Compensation des erreurs.

Figure 1.4 : Processus d'évaluation du modèle et compensation

CHAPITRE 2

INVESTIGATION NUMÉRIQUE

2.1 INTRODUCTION

Dans le processus d'usinage, les MO présentent de différents comportements thermiques en raison de l'existence de plusieurs sources de chaleur qui provoque des variations de la température. La répartition inégale du champ de température au sein de la structure de la machine provoque des déplacements relatifs entre la pièce et l'outil, qui réduisent la précision de l'usinage. De nombreuses études démontrent que les déformations thermiques des MO constituent l'une des principales sources d'erreurs volumétriques [1].

La précision dimensionnelle des pièces usinées est en grande partie affectée par les erreurs thermiques. Ces dernières années, de nombreuses recherches ont été conduites sur le comportement thermique des MO à travers la modélisation de l'erreur thermique, par les analyses théoriques, les simulations et les expériences. La difficulté majeure réside dans la modélisation de ces déplacements relatifs entre la pièce et l'outil, car les champs de température varient constamment en fonction des conditions de fonctionnement, du cycle d'usinage, de l'utilisation du liquide de refroidissement et des conditions environnementales [15]. L'objectif de ce chapitre est de développer un modèle numérique pour l'analyse du comportement thermoélastique de la structure de la machine afin d'identifier les emplacements des capteurs de température sous différentes conditions de fonctionnement.

2.2 DEVELOPPEMENT DU MODELE NUMERIQUE

Le développement du modèle numérique a pour objectif de se doter d'une plateforme de simulation permettant d'analyser et éventuellement prédire le comportement thermomécanique de la structure de la MO sous des contraintes mécaniques et thermiques variées. Basé sur l'analyse par la méthode des éléments finis (MEF) et validé par des données expérimentales représentant les conditions

réelles de fonctionnement des machines, le modèle numérique 3D permet d'explorer les relations de cause à effet entre les sollicitations mécaniques et thermiques que subit la MO et les profils de déformations et de déplacement dans sa structure de la machine, ainsi que les interactions complexes entre la cartographie thermique de la MO et les déformations et de leurs impacts sur la précision de la machine.

La première étape consiste à développer le modèle en utilisant la MEF. Cette technique permet de discrétiser la structure de la machine en de petits éléments, chacun doté de propriétés physiques spécifiques, telles que la conductivité thermique, la densité et le module d'élasticité. Les calculs réalisés incluent l'analyse des échanges thermiques par conduction, convection (naturelle ou forcée) et rayonnement, ainsi que des déformations mécaniques sous diverses sollicitations thermiques. Le modèle doit offrir une représentation détaillée et précise des comportements thermiques et mécaniques, permettant d'étudier les gradients de température et leurs effets sur la structure de la MO.

Un dispositif expérimental pour la mesure des températures, des déformations et des déplacements a été développé pour générer les données nécessaires à l'alimentation du modèle et à sa validation. La mesure des températures et des erreurs thermiques à différents points critiques de la machine a été très utile pour calibrer le modèle et affiner ses performances prédictives. Les données collectées ont également servi à valider le modèle en comparant les résultats des simulations aux observations expérimentales. Cette validation est une étape cruciale pour garantir la robustesse et la fiabilité du modèle qui va par la suite être utilisé pour réaliser une série de simulations explorant différents scénarios de sollicitation en termes de gradients thermiques et conditions de fonctionnement de la MO. L'objectif de ces simulations est de produire des données à partir desquelles extraire des indicateurs permettant l'identification des zones les plus sensibles aux variations de température et aux déformations. Ces zones critiques vont servir par la suite pour déterminer les emplacements optimaux des capteurs de température, pour une cartographie représentative de l'état thermique de la MO facilitant la prédiction des erreurs thermiques.

2.2.1 Génération de chaleur

La génération de la chaleur dans les machines provient des différentes sources thermiques. Elle est un fait important dans l'étude du comportement d'une MO. Elle provient de la puissance des sources

de chaleur internes et externes. Cette génération de chaleur est inévitable dans la déformation de la structure réelle de la MO.

2.2.1.1 Analyse de la source thermique

Il existe deux sources thermiques, les sources extérieures et les sources intérieures. Hormis la source thermique extérieure qui est la température de l'environnement, nous avons les sources thermiques internes des MO [59-60] :

- la chaleur générée entre l'écrou à billes et l'arbre de la vis à billes des axes,
- la chaleur générée par la broche et le support du roulement de la vis à billes en raison de la friction entre les billes et les courses,
- la chaleur générée par les éléments roulants dans les guidages,
- la chaleur générée par les moteurs de la broche et l'entraînement des courroies,
- la chaleur générée par les moteurs d'axe de la MO.

2.2.1.2 Génération de chaleur dans les roulements

La plus grande partie de la production de la chaleur du système est causée par le processus d'usinage et les frottements entre les billes et les roulements. Cependant, dans la plupart des cas, la chaleur de l'usinage est réduite par le liquide de refroidissement et les copeaux. Par conséquent, le frottement entre les billes et les roulements prédomine dans l'élévation de la température du système [61-62]. Selon *Jafar* [21], les couples de frottement total dans un palier se mesurent avec la perte d'énergie sur les surfaces de contact des composants des roulements, ainsi que de la perte d'énergie occasionnée par les frottements visqueux. L'estimation analytique du couple de frottement est surchargée d'une multiplicité de facteurs, tels que les frottements entre les éléments roulants [22]. La chaleur de frottement produite par les roulements est similaire à celle du guide linéaire, qui peut être calculée par l'équation suivante :

$$H_f = 1.047 \times 10^{-4} n \times M \quad (2.1)$$

Où M est le couple de frottement du roulement (Nmm), n est la vitesse de rotation du roulement (rpm) et H_f est la puissance de la chaleur générée (W). Le couple de frottement total M se compose de deux parties et peut être calculé de la manière suivante :

$$M = M_1 + M_2 \quad (2.2)$$

Où M_1 est le couple de frottement mécanique causé par la charge appliquée et M_2 est le couple de frottement visqueux occasionné par la viscosité du lubrifiant.

$$M_1 = f_1 p_1 d_m \quad (2.3)$$

Où f_1 est le facteur lié au type du roulement et à la charge, p_1 est la précharge du roulement (N), et d_m est le diamètre moyen du roulement (mm).

M_2 se calcule différemment selon que la viscosité cinématique du lubrifiant est supérieure, ou égale ou inférieure à 2000.

$$M_2 = 10^{-7} f_0 (v_0 n) \text{ si } v_0 n \geq 2000 \quad (2.4)$$

$$M_2 = 160 \times 10^{-7} f_0 d_m^3 \text{ si } v_0 n < 2000 \quad (2.5)$$

où f_0 est le facteur relatif au type du roulement et à la méthode de lubrification, et v_0 est la viscosité cinématique du lubrifiant [63].

2.2.1.3 Génération de chaleur sur l'écrou à vis à bille

Le principe de la génération de la chaleur sur l'écrou de la vis à billes est en général très similaire à celui des roulements. La chaleur est principalement générée par les frottements entre les billes et les rainures de l'écrou et entre les billes et les rainures de l'arbre. La charge de l'écrou se compose de deux parties, c'est-à-dire la précharge et la charge dynamique [23]. La chaleur totale de frottement produite par l'écrou de la vis à billes peut être définie tel que :

$$H_n = 0.12 \pi f_0 v_0 n T_n \quad (2.6)$$

Où H_n est le taux total de chaleur de frottement généré par l'écrou, f_0 est un facteur lié au type d'écrou et à la méthode de lubrification, v_0 est la viscosité cinématique du lubrifiant, n est la vitesse de rotation

de la vis à billes, et T_n est le couple total de frottement de l'écrou (la précharge et la charge dynamique) [24].

2.2.1.4 Génération de chaleur dans le guide linéaire

La chaleur totale de friction produite dans le guide linéaire provient de la force de frottement entre les éléments roulants, les rails et les chariots. Presque toutes les pertes de frottement dans un roulement sont transformées en chaleur à l'intérieur du même roulement, tout en augmentant sa température. La chaleur totale de frottement générée par le guide linéaire peut être exprimée par le taux de chaleur (H_{gf}) sous la forme [25] :

$$H_{gf} = \eta F_{gf} V \quad (2.7)$$

Où F_{gf} est la force de frottement calculée dans le guide linéaire, et V est la vitesse. La force de frottement est une composition de la force de frottement de coulomb, du frottement visqueux et de la force de l'effet *Stribeck*. Cette force de frottement se traduit par l'expression suivante [64] :

$$F_{gf} = (0.315 - 0.03 p_c) P \times 10^{-3} + \frac{1.52 p_c L_b}{v_i e^{-0.067(T-T_i)}} e^{\frac{-v}{0.015}} + L_b (0.003 L_b p_c V v_i e^{-0.067 [T-T_i]} + 0.029 \quad (2.8)$$

Où P est la charge externe, p_c est la classe de précharge, et v est la viscosité cinématique. La force de frottement est supposée être complètement convertie en chaleur ($\eta = 1$).

2.2.1.5 Génération de chaleur dans la broche

L'estimation de la puissance thermique des roulements et du moteur de la broche est établie en deux volets :

- La chaleur des roulements est générée dans les zones de contact. Ces zones existent en raison des frottements entre les billes et les voies externes [62]. Ainsi, la modélisation de l'énergie thermique $H_{bf}(W)$ des paliers avant et arrière de la broche est déterminée par l'équation :

$$H_{bf} = \frac{2\pi n}{60} T_b \quad (2.9)$$

- La chaleur totale produite du moteur $H_m(W)$ est principalement attribuée à la perte de la puissance magnétique $P_h(W)$, la perte de la puissance électrique $P_{CU}(W)$, et la perte de la puissance mécanique $P_f(W)$. Cette équation ne tient pas compte des pertes supplémentaires :

$$H_m = P_h + P_{CU} + P_f \quad (2.10)$$

Dans l'équation (2.11), la perte magnétique $P_h(W)$ contient la perte de l'hystérésis $P_t(W)$ et la perte du courant de Foucault $P_E(W)$, qui est calculée par :

$$P_h = P_t + P_E \quad (2.11)$$

$$\text{Avec } P_t = C f B_{max}^2 \quad (2.12)$$

Et

$$P_E = \frac{\pi^2 t^2 (f B_{max})^2}{6 \rho \gamma_c} \quad (2.13)$$

Dans les équations précédentes (2.12) et (2.13), C est une valeur constante liée à l'acier électrique, $f(s^{-1})$ est la fréquence de magnétisation, B_{max} (T) est la densité maximale du flux magnétique, t (m) est l'épaisseur de la tôle d'acier au silicium, $\gamma_c(kg/m^3)$ est la densité et ρ (Ωm) est la résistivité électrique du noyau de fer.

En outre, la perte électrique $P_{CU}(W)$ peut être calculée par :

$$P_{CU} = \frac{I^2 \rho_c L}{S} \quad (2.14)$$

Où $I(A)$ est l'intensité du courant électrique et ρ_c (Ωm), L (m) et S (m^2) sont respectivement la résistivité, la longueur et la surface du conducteur.

Enfin, le calcul de la perte mécanique $P_f(W)$ sera :

$$P_f = \pi C' \rho_{ar} \omega^3 R_f^4 L_f \quad (2.15)$$

où C' est le coefficient de frottement, $R_f(m)$ est le rayon extérieur, $L_f(m)$ est la longueur du rotor, ω (rad/s) est la vitesse angulaire du rotor, et $\rho_{ar}(kg/m^3)$ est la densité de l'air [22].

2.2.1.6 Génération de chaleur par les moteurs d'axe

Ils génèrent de la chaleur principalement en raison de la conversion de l'énergie électrique en mouvement mécanique. Ce processus de conversion n'est pas parfaitement efficace et une partie de l'énergie est dissipée sous forme de chaleur. Pour évaluer et gérer la chaleur générée dans les moteurs d'axe des MO, il est important de caractériser précisément ce phénomène. Pour atténuer les effets de la chaleur dans les moteurs d'axe des MO, diverses stratégies de gestion de la chaleur peuvent être mises en œuvre. La chaleur générée par les moteurs des MO est un processus très complexe. La production de chaleur (H) dans le moteur est calculée par l'équation suivante :

$$H = \frac{M_T * n}{9550} (1 - \eta), \quad (2.16)$$

où M_T est le couple de sorties du moteur (N_{mm}), n est la vitesse de rotation du moteur (rpm) et η est l'efficacité du moteur [63].

2.2.2 Application du modèle

Le modèle développé représente un centre d'usinage vertical à trois axes. Sa modélisation par la méthode des éléments finis repose sur plusieurs hypothèses simplificatrices visant à optimiser l'analyse thermique et mécanique. Premièrement, la structure de la machine est supposée composée de matériaux élastiques, homogènes et isotropes, ce qui facilite la modélisation des déformations et des contraintes thermiques. Deuxièmement, les pertes par frottement sont considérées comme négligeables, leur influence étant minime par rapport aux autres sources de chaleur. De plus, les éléments de petite taille présents dans la structure, tels que les écrous et les trous, sont omis afin de réduire la complexité du modèle sans affecter significativement la précision des résultats. Enfin, le rayonnement thermique n'est pas pris en compte dans cette étude.

La machine de la figure 2.1 est modélisée par la méthode des éléments finis montrant la structure de la simulation de l'expansion thermique. Ce modèle est maillé en 447 680 éléments (avec 105 639 points du maillage) sur la figure 2.2 utilisant des formes tétraédriques et triangulaires pour des précisions adéquates. Les éléments structurels serviront à prédire le champ de température et à déterminer la répartition des déplacements en raison de la variation de la température.

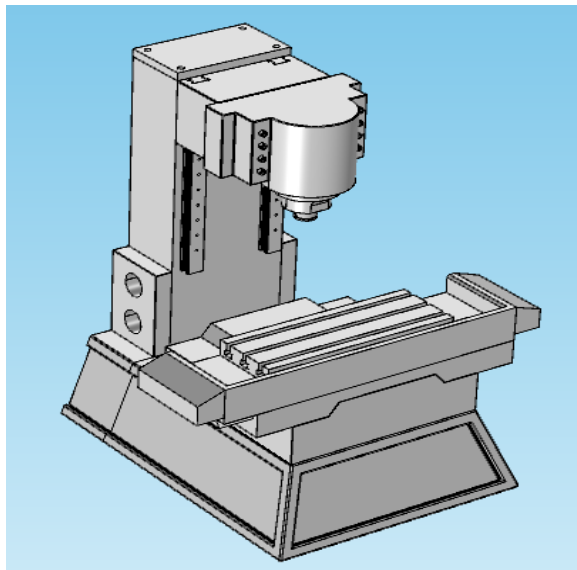


Figure 2.1 : Architecture de base d'un centre d'usinage vertical

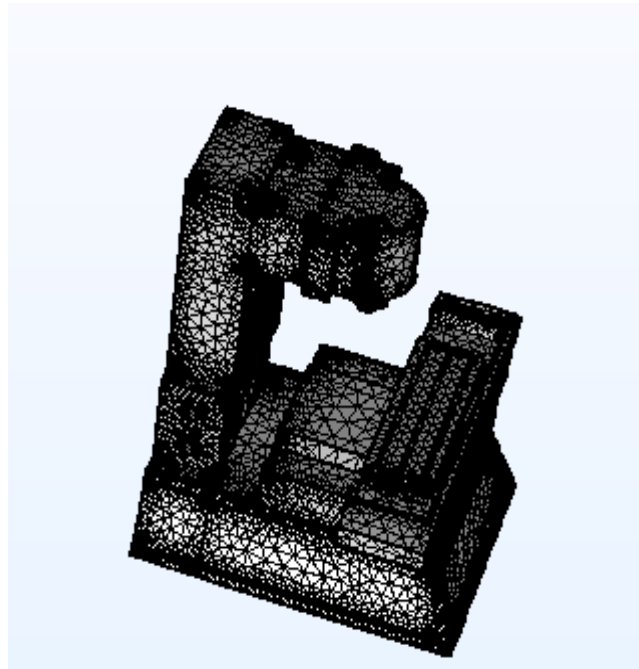


Figure 2.2 : Aperçu du maillage de la structure de la MO

Dans les sections suivantes, quelques résultats préliminaires sont présentés. Tout d'abord, une observation prolongée de la MO en fonctionnement, sans sources de chaleur au niveau des axes ou de la broche, a été réalisée. Seule l'influence de la température ambiante sur la machine a été prise en compte. Les résultats montrent que le champ de distribution de la température dans la machine reste

pratiquement constant dans ces conditions. Ensuite, l'analyse révèle que, dans ces mêmes conditions, la simulation ne met en évidence presque aucune déformation au niveau de la MO. Les déplacements sont très réduits et pratiquement insignifiants, comme le montrent les variations de couleurs sur la figure 2.3.

L'analyse du champ de température du modèle numérique en présence de sources de chaleur au niveau des axes X, Y et Z met en évidence une concentration thermique plus importante du côté des moteurs des axes, qui dégagent davantage de chaleur par rapport à l'autre côté. La figure 2.4 illustre cette répartition thermique sur la MO.

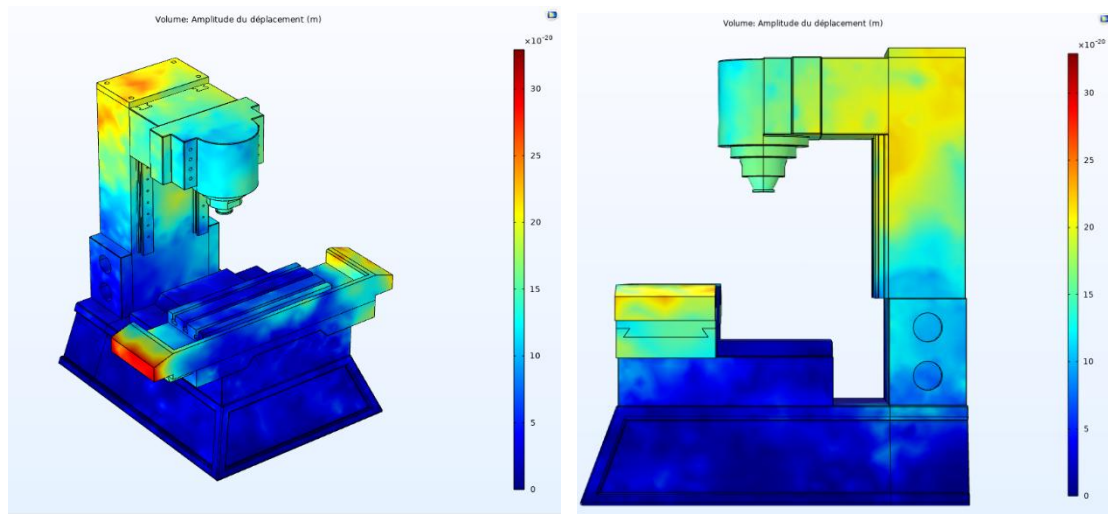


Figure 2.3 : Illustration des déformations de la MO sous l'effet de la température de l'environnement.

Toujours en présence de sources de chaleur au niveau des axes X, Y et Z, la variation des températures entraîne des déformations structurelles visibles, comme présentées dans la figure 2.5. Ces déformations sont plus marquées du côté où la chaleur est la plus concentrée, c'est-à-dire à proximité des moteurs des axes, tandis qu'elles sont moindres de l'autre côté. L'échauffement de ces éléments modifie les dimensions de la machine, ce qui peut affecter la précision de son fonctionnement.

Lorsque des sources de chaleur sont appliquées simultanément aux trois axes et à la broche, la répartition thermique devient plus complexe, comme illustré dans la figure 2.6. Dans ce cas, la chaleur se concentre davantage autour des moteurs des axes et surtout sur la broche, où elle atteint des niveaux élevés. Cette forte accumulation thermique influence considérablement la stabilité dimensionnelle de la machine.

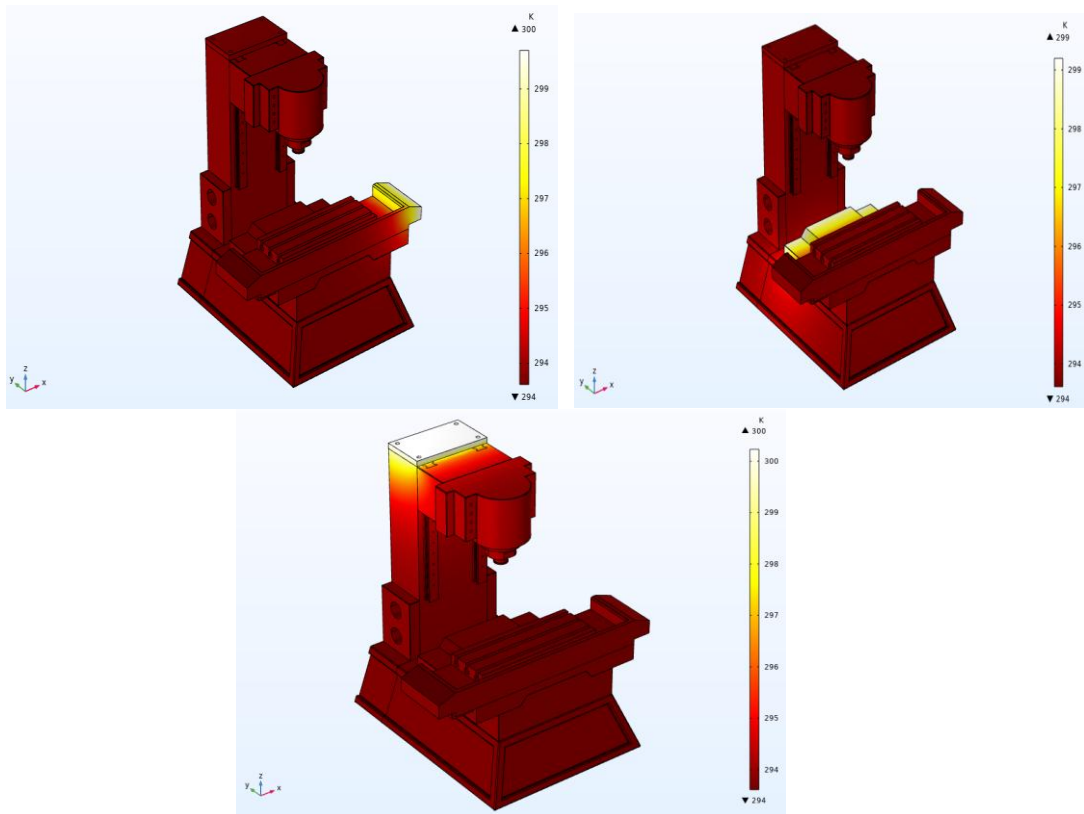


Figure 2.4 : Illustration des champs de température avec des sources de chaleur provenant des moteurs des axes X, Y et Z.

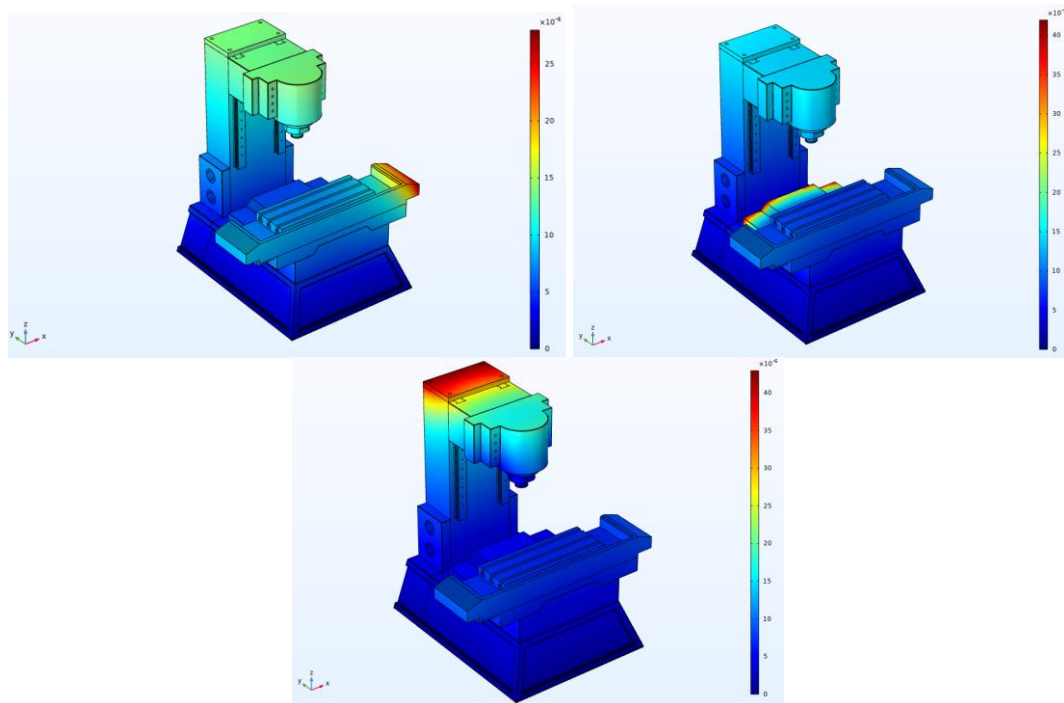


Figure 2.5 : Illustration des déformations sous l'effet des moteurs d'axes X, Y et Z.

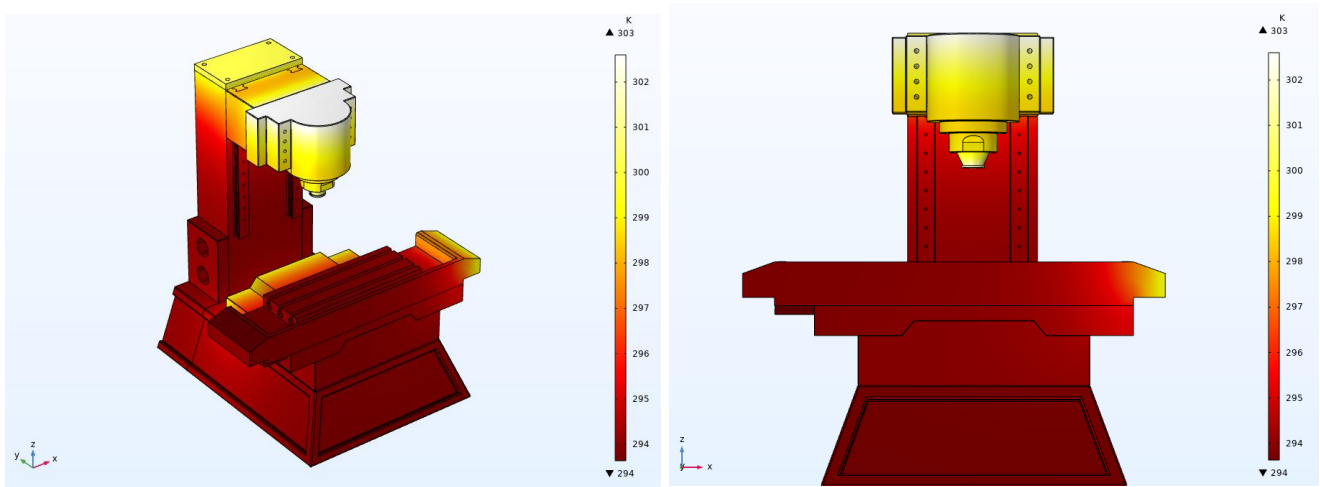


Figure 2.6 : Champ de température sous la superposition des sources de chaleur des 3 axes et de la broche

La figure 2.7 montre que cette condition thermique de la présence des sources de chaleur simultanément au niveau de 3 axes et sur la broche entraîne des déplacements plus importants, en particulier au niveau de la broche, où la chaleur est fortement visible. L'observation des simulations révèle des déformations significatives de la MO, mises en évidence par les nuances de couleurs dans les résultats. Ces déformations, bien que prévisibles, doivent être soigneusement analysées afin de réduire leur impact sur la précision des opérations d'usinage.

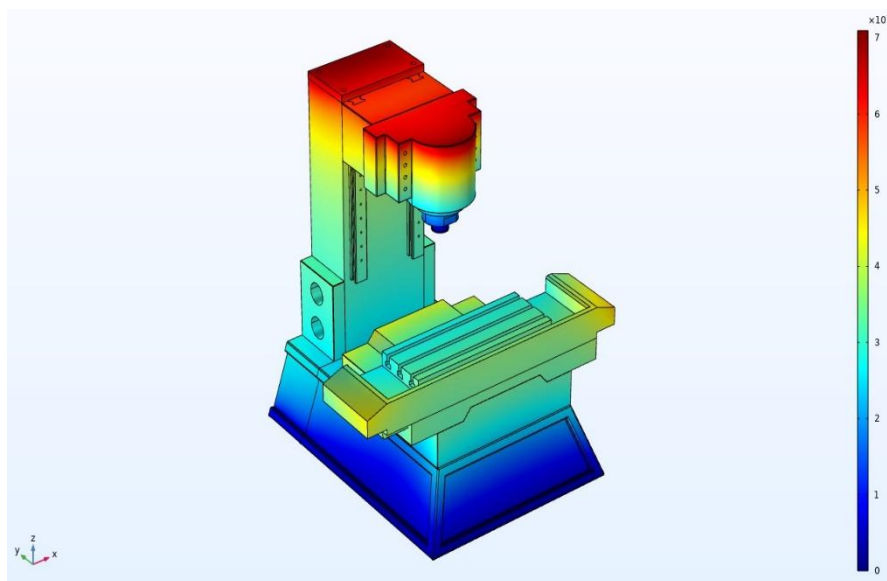


Figure 2.7 : Déformations sous les effets simultanés des moteurs d'axe et de la broche.

Enfin, la figure 2.8 présente les déformations thermiques en régime permanent ainsi que les contraintes de Von Mises, exprimées en N/mm^2 . Ces critères prennent en compte les effets combinés de la traction, de la compression et du cisaillement, fournissant ainsi une représentation globale des efforts subis par la structure.

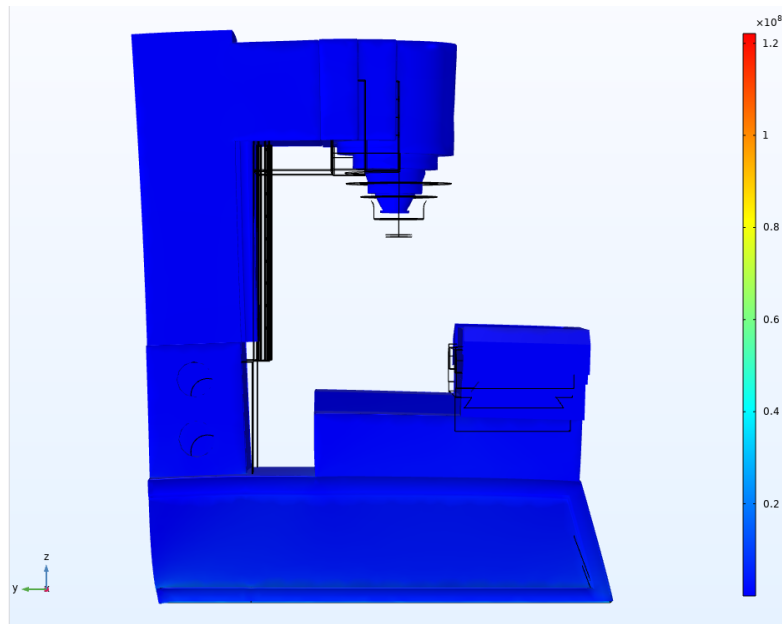


Figure 2.8 : Déformations thermiques et contraintes de Von Mises en régime permanent avec sources de chaleur sur les axes et la broche

L'analyse des indicateurs thermiques et des déplacements montre que lorsque la broche et les axes fonctionnent simultanément, certaines zones deviennent nettement plus chaudes, notamment autour des moteurs, tandis que d'autres restent plus froides. La meilleure méthode pour surveiller ces variations thermiques consiste à mesurer les températures dans ces régions spécifiques et à y placer des capteurs stratégiquement positionnés afin d'assurer un suivi optimal et de réduire les erreurs liées aux déformations thermiques.

2.3 VALIDATION DU MODELE NUMERIQUE

Le processus de validation du modèle repose sur une comparaison rigoureuse entre les températures et les déformations estimées par le modèle numérique et les résultats obtenus expérimentalement. Cette validation s'appuie sur des dispositifs expérimentaux permettant d'analyser les variations thermiques et leurs effets sur la structure de la MO. La figure 2.9 illustre en détail les équipements utilisés pour ces mesures. La température est surveillée à l'aide d'une caméra thermique et des thermistances stratégiquement placées sur les zones jugées les plus sensibles de la MO. Ces capteurs offrent une large plage de mesure, allant de -20°C à 120°C , avec une résolution élevée de 0.0625°C , garantissant ainsi un suivi précis de la distribution thermique. En complément, un interféromètre laser *API XD* est utilisé pour mesurer avec précision les déplacements induits par les variations thermiques.



Figure 2.9 : Dispositifs de mesure pour la validation du modèle numérique

Pour réaliser la validation du modèle numérique, plusieurs points de mesure ont été sélectionnés de manière stratégique sur la MO. Comme l'illustre le schéma de la figure 2.10, ces points ont été choisis en tenant compte de la structure tridimensionnelle de la machine, laquelle définit un volume de travail en 3D. Leur positionnement sur les différents axes vise à permettre une analyse détaillée des variations thermiques et des déformations qui affectent l'ensemble de la structure. Tout d'abord, leur répartition spatiale a été conçue de manière à couvrir l'ensemble du volume utile de la machine.

Ce choix s'inscrit dans la continuité de travaux antérieurs portant sur la caractérisation des points de mesure. Certains auteurs ont caractérisé ce point le long d'un axe et ils ont identifié un certain nombre des points et leurs conclusions ont montré que seuls les points situés aux extrémités et au centre offraient une pertinence significative pour la capture des déformations thermiques. Ces résultats mettent en évidence l'importance d'un positionnement judicieux des capteurs, permettant d'optimiser la représentativité des données tout en limitant le nombre de mesures nécessaires [88]. De plus, ces points sont localisés dans des zones reconnues pour leur sensibilité aux variations thermiques, notamment à proximité des sources de chaleur. Ces zones sont particulièrement exposées aux sollicitations thermomécaniques, ce qui justifie leur inclusion dans le protocole de mesure. La disposition géométrique des points sélectionnés présente également une symétrie intéressante, permettant de comparer les réponses obtenues dans différentes régions de la machine.

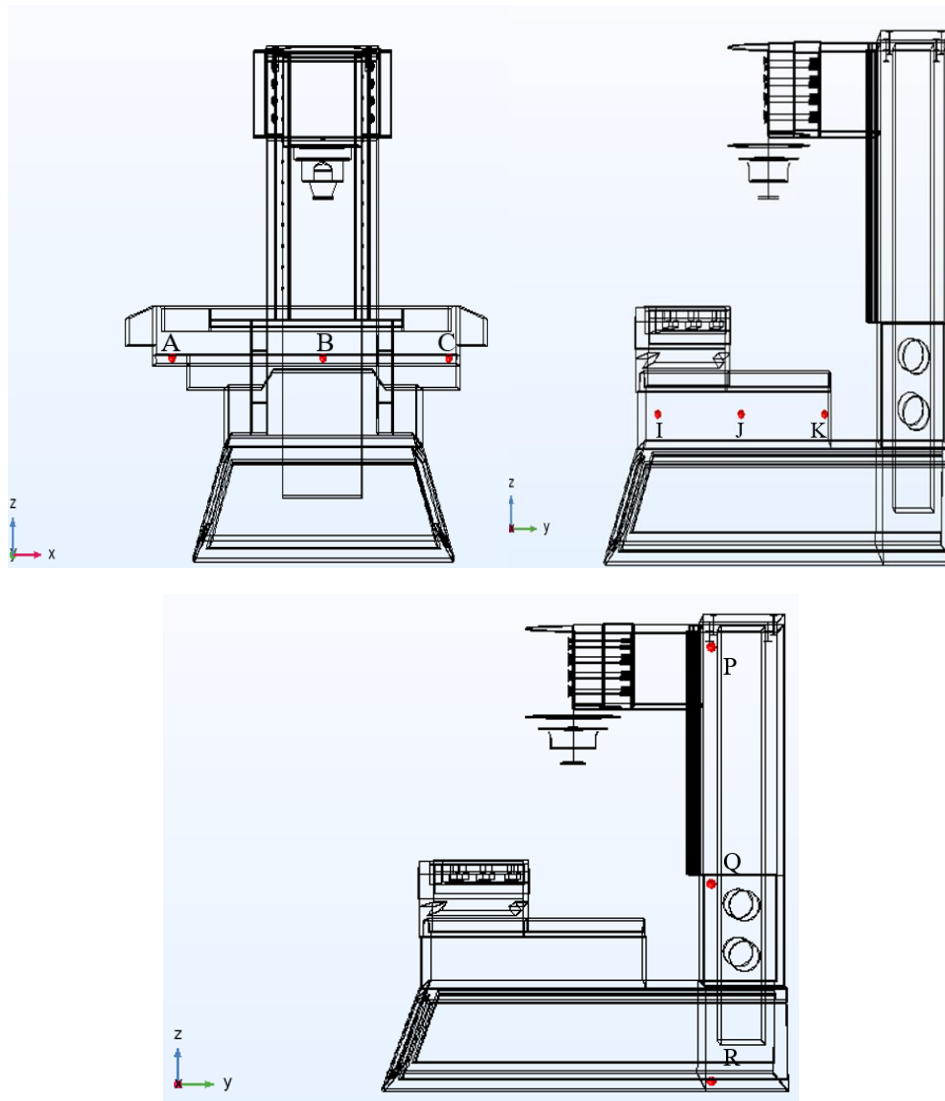


Figure 2.10 : Localisation des points de mesure de déplacement

2.3.1 Comparaison des températures mesurées et prédites

La figure 2.11 illustre les graphiques comparant le comportement thermique observé lors des mesures expérimentales et celui issu de l'analyse numérique, sur une durée de 4 heures. Les paramètres utilisés sont constants et incluent une vitesse de 15 m/min pour les trois axes linéaires et une vitesse de rotation de 1200 rpm pour la broche. L'analyse porte sur les points B, J et Q représentant les points milieux des axes X, Y et Z.

On observe que la température mesurée augmente plus rapidement que celle prédite, en raison de la nécessité d'ajuster la condition limite thermique de convection forcée. Toutefois, les deux températures convergent vers une valeur finale similaire. Les écarts les plus marqués apparaissent au

début du cycle de chauffage, la stabilisation thermique dans la simulation étant plus lente. Durant les 60 premières minutes, l'erreur de prédiction atteint environ 10%.

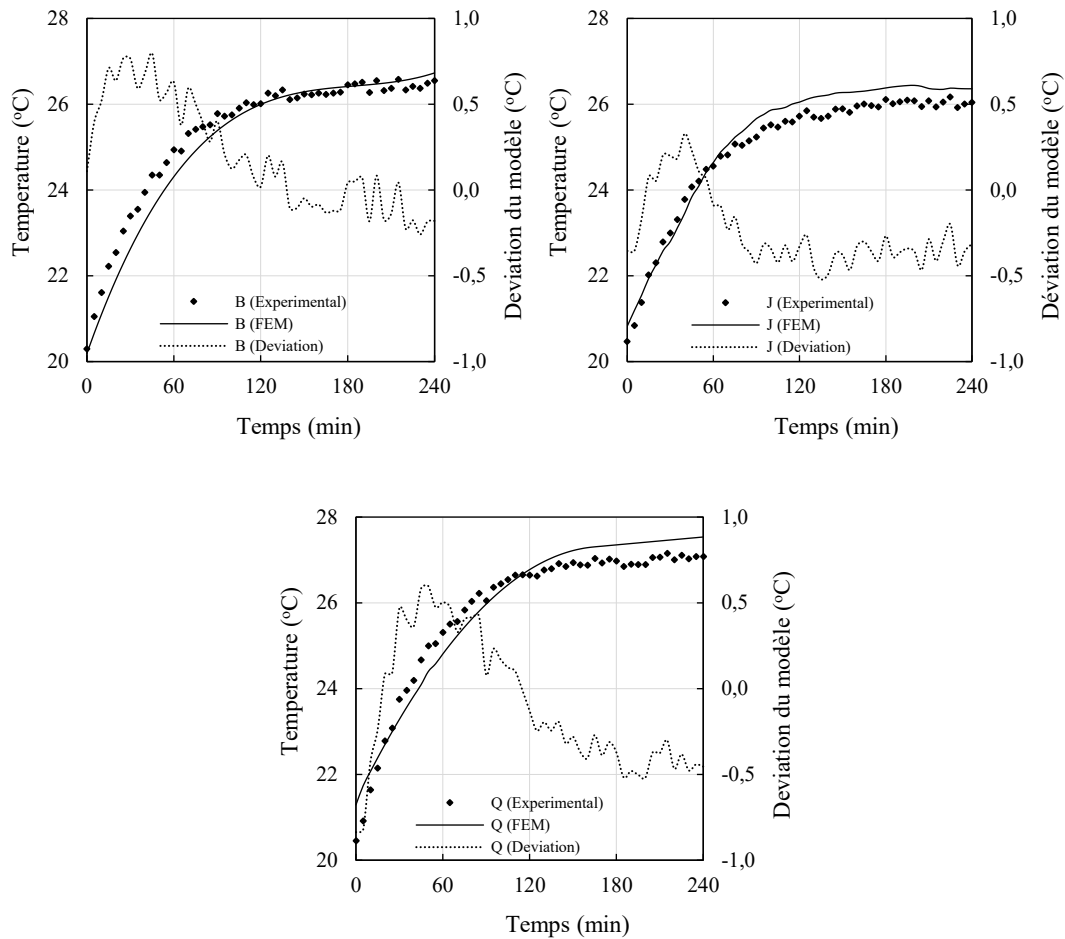


Figure 2.11 : Températures mesurées vs températures prédites

2.3.2 Comparaison par rapport aux déplacements

La figure 2.10 présente la procédure de validation adoptée pour les trois axes, qui repose sur la comparaison de l'erreur thermique mesurée et estimée en neuf points stratégiquement sélectionnés. Trois points sont choisis sur chaque axe : (A, B, C) pour l'axe X, (I, J, K) pour l'axe Y, et (P, Q, R) pour l'axe Z. Cette approche permet d'évaluer précisément l'impact thermique sur la structure de la MO.

Dans le cadre de l'analyse des déplacements induits par la température ambiante, la machine est observée à l'arrêt, sans fonctionnement. Lorsque la variation de température reste inférieure à 1°C, les déplacements des points sont négligeables.

La machine est observée pendant plusieurs heures de fonctionnement en présence des sources de chaleur simultanément sur les trois axes et la broche, afin d'analyser l'impact thermique sur les déplacements des différents points de la structure. Les figures 2.12, 2.13 et 2.14 présentent les résultats expérimentaux et simulés pour les axes X, Y et Z, respectivement. Pour chaque axe, les simulations et les mesures ont été réalisées en maintenant les deux autres axes au repos, permettant ainsi une évaluation plus précise des effets thermiques sur chaque direction.

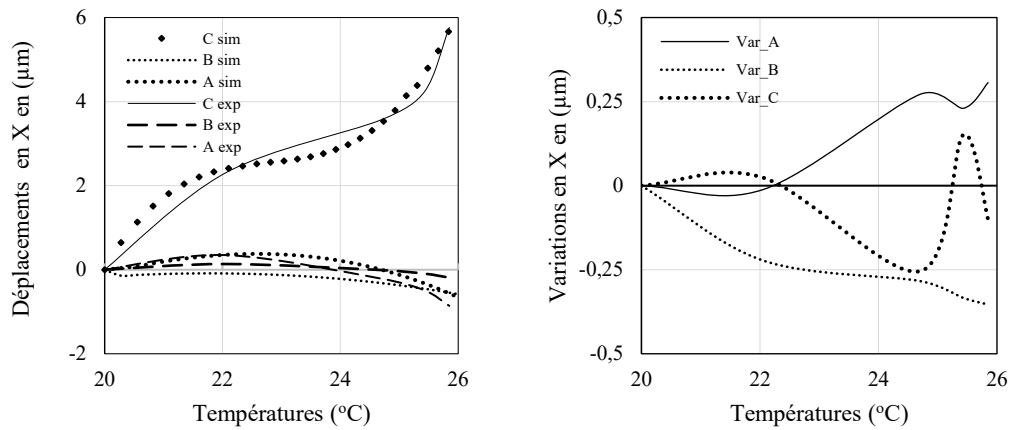


Figure 2.12 : Déplacements mesurés vs déplacements prédits le long de l'axe X

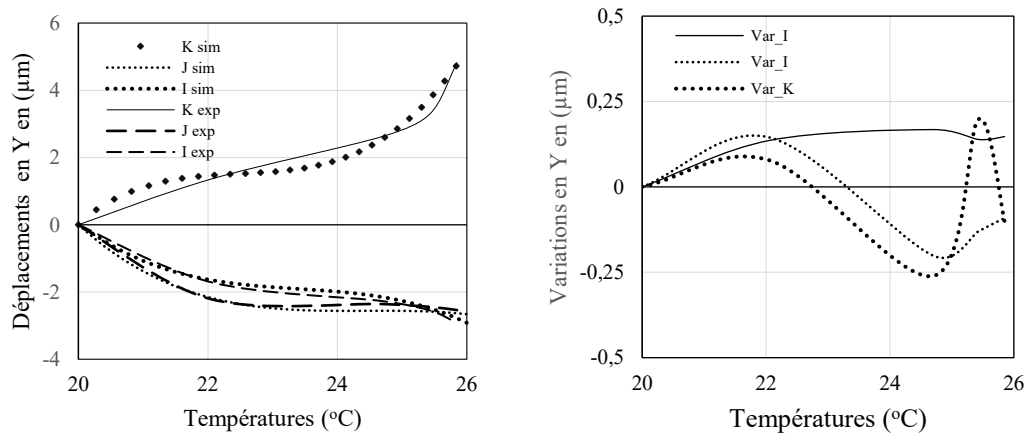


Figure 2.13 : Déplacements mesurés vs déplacements prédits le long de l'axe Y.

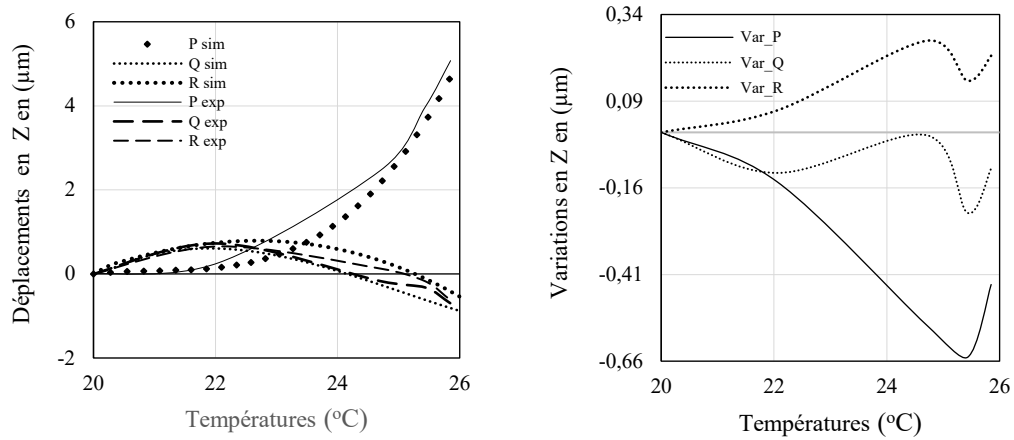


Figure 2.14 : Déplacements mesurés vs déplacements prédits le long de l'axe Z

Les écarts les plus importants entre les résultats simulés et expérimentaux sont observés aux points C, K et R, qui se trouvent à proximité des sources de chaleur. Comme indiqué dans le tableau 2.1, ces zones sont particulièrement sensibles aux variations thermiques, entraînant des déplacements plus marqués. Les erreurs thermiques dans les directions X, Y et Z ont été obtenues numériquement pour différentes variations de température. Ces erreurs, comparées aux valeurs obtenues expérimentalement sur les mêmes points, permettent d'évaluer la précision du modèle thermique et d'approfondir la compréhension des déformations induites par la chaleur.

Les figures précédentes 2.12, 2.13 et 2.14 ainsi que le tableau 2.1 illustrent la procédure de validation et d'évaluation du modèle numérique. Les graphiques des coordonnées des points des axes X, Y et Z dans leurs directions respectives sont comparés aux données expérimentales afin de vérifier la validité des résultats obtenus. Cette analyse permet d'évaluer l'exactitude du modèle en confrontant les déplacements numériques issus de la simulation avec les mesures expérimentales. Les différences observées entre les valeurs simulées et mesurées sont généralement faibles, ce qui confirme la validité du modèle développé pour la prédiction des déformations thermiques de la machine dans les différentes conditions de fonctionnement étudiées. De ce fait, les résultats montrent que les erreurs thermiques obtenues expérimentalement sont en accord avec celles issues des simulations, avec des écarts réduits qui valident la pertinence du modèle numérique présenté.

Tableau 2.1 : Déviations entre déplacements mesurés et déplacements prédits (en μm)

	Points de mesure								
Températures moyennes (°C)	A	B	C	I	J	K	P	Q	R
20.26	0.040	0.120	0.150	0.110	0.260	0.560	0.100	0.230	0.610
22.05	-0.012	-0.222	0.024	0.136	0.145	0.078	-0.142	-0.117	0.063
24.70	0.271	-0.284	-0.254	0.168	-0.202	-0.261	-0.555	-0.008	0.264
25.43	0.230	-0.334	0.151	0.139	-0.130	0.198	-0.649	-0.232	0.149
25.85	0.307	-0.353	-0.100	0.147	-0.091	-0.101	-0.439	-0.104	0.221

Les résultats présentés dans le tableau ci-dessus illustrent les différences de déplacements entre le modèle numérique et les valeurs expérimentales mesurées à quelques diverses températures moyennes. Il est évident que la différence entre les déplacements simulés et les valeurs expérimentales reste faible, ne dépassant pas 1.5 μm à chaque point de mesure. Ces écarts demeurent faibles à travers toutes les températures testées, confirmant ainsi la précision du modèle numérique. Ce qui renforce l'idée que notre modèle est non seulement cohérent avec les données expérimentales, mais également représentatif des phénomènes physiques. Cette faible différence démontre que le modèle numérique est suffisamment précis pour refléter les comportements observés lors des expériences. Cela soutient aussi davantage l'idée que notre modèle numérique constitue une représentation fiable et précise du système étudié, capable de prédire les résultats expérimentaux avec un haut degré de certitude. Ces résultats numériques sont en excellent accord avec les données expérimentales, validant ainsi l'efficacité du modèle dans l'analyse des comportements thermiques des MO.

2.4 SIMULATIONS ET IDENTIFICATION DES POINTS DE MESURE DE TEMPERATURE

Les différentes simulations numériques et analyses thermomécaniques menées sur le modèle numérique de la MO permettent de mieux comprendre son comportement thermique sous diverses conditions de fonctionnement. Ces simulations permettent de caractériser avec précision les variations de température, d'identifier les gradients thermiques présents dans la structure et d'évaluer leur impact sur les erreurs thermiques induites. La compréhension de ces phénomènes se révèle essentielle pour localiser les zones critiques de la machine et anticiper les déformations susceptibles d'affecter sa précision.

Après avoir validé la capacité du modèle numérique à estimer avec précision la distribution des températures ainsi que les erreurs thermiques qui en résultent, une série de simulations numériques a été réalisée. Ces simulations ont permis de mener une analyse thermomécanique transitoire intégrée de l'ensemble du centre de la machine. Elles ont été effectuées sous différentes conditions de fonctionnement des MO : constantes, progressives et aléatoires. Les résultats de ces simulations ont permis de diviser le champ de température en plusieurs régions en fonction des estimations obtenues. Ils ont également permis d'évaluer l'indice d'intensité de la corrélation entre les températures et les erreurs thermiques dans ces régions. Cela a pour objectif d'identifier de manière structurée le nombre optimal et le meilleur emplacement des capteurs de mesure de température.

Les résultats ont mis en évidence d'importantes variations de température selon les différentes régions de la machine, influencées par la position des sources de chaleur, les propriétés thermiques des matériaux et les conditions de fonctionnement. Certaines zones se distinguent par des gradients thermiques particulièrement élevés, tandis que d'autres conservent une relative stabilité. Ces variations sont directement liées aux erreurs thermiques, telles que les déformations structurales et les dilatations des éléments mécaniques, affectant ainsi la précision des déplacements.

L'une des observations majeures concerne la corrélation forte entre la température et les erreurs thermiques. Les zones situées à proximité des principales sources de chaleur, notamment la broche, les moteurs d'entraînement et les glissières, sont les plus impactées. Par exemple, près du moteur de la broche, les simulations montrent une élévation rapide de la température influençant directement les déplacements de l'axe Z. De même, au niveau des glissières et des vis à billes des axes X et Y, la montée en température entraîne des dilatations importantes des composants mécaniques, générant des erreurs de positionnement significatives.

En parallèle, certaines zones thermiquement stables ont été identifiées et caractérisées comme des points de référence pour le suivi thermique de la machine. La partie inférieure du bâti de la MO, située à l'opposé des principales sources de chaleur, se distingue par sa stabilité thermique et sa faible exposition aux flux thermiques. Elle joue un rôle essentiel en tant que référence, permettant de distinguer les variations thermiques locales des effets globaux sur la structure de la machine.

L'étude de la distribution des températures et des flux thermiques a également souligné l'importance de la proximité des zones par rapport aux sources de chaleur. Plus une zone est placée près de la broche ou des moteurs, plus elle capte rapidement et précisément les variations de température.

Cette caractéristique justifie la nécessité d'un positionnement stratégique des lectures de température dans ces zones sensibles afin d'assurer un suivi thermique réactif et pertinent.

L'analyse des gradients thermiques a révélé qu'ils sont non uniformes et présents dans les trois directions de l'espace (X, Y et Z), notamment sur les structures longues ou présentant de grandes variations thermiques. Cette non-uniformité implique des variations thermiques spécifiques à chaque axe de la machine selon les cycles de fonctionnement, rendant nécessaire une surveillance tridimensionnelle et adaptée à chaque zone. La prise en compte de ces gradients longitudinaux s'avère indispensable pour une compréhension fine des déformations thermiques et une anticipation des erreurs de positionnement.

Afin d'assurer la représentativité et la qualité des données thermiques recueillies, les simulations ont validé l'importance d'une répartition homogène et symétrique des lectures de température sur l'ensemble de la machine. Une concentration excessive des lectures des températures dans une zone unique réduit la pertinence des mesures et peut fausser l'interprétation des effets thermiques globaux. Une distribution équilibrée permet au contraire d'obtenir une vision globale et plus fiable du comportement thermique de la structure.

De plus, la symétrie thermique observée dans certaines parties de la machine renforce la pertinence d'une disposition symétrique des lectures de température, ce qui facilite la détection des déséquilibres thermiques potentiels et améliore l'analyse des résultats. Toutefois, l'analyse a également mis en évidence la présence de redondances dans certaines zones de mesure. Certains points de captation des températures n'apportaient pas d'informations supplémentaires par rapport aux zones voisines. Cette observation a conduit à l'optimisation du réseau de lectures de température, en supprimant les positions redondantes afin d'alléger le traitement des données tout en maintenant une couverture thermique optimale.

La bonne compréhension des phénomènes thermiques dans les simulations du modèle numérique passe par une compréhension approfondie des zones critiques et une analyse des gradients thermiques tridimensionnels qui contribuent à mieux comprendre les déformations thermiques.

Les résultats et observations collectés lors des simulations, tant en termes des distributions de température que des corrélations entre température et erreurs thermiques, conduisent aux recommandations suivantes :

- Placer les capteurs à des points correspondants aux régions thermiques identifiées avec une forte corrélation entre les températures et les erreurs thermiques.
- Choisir un point de référence de préférence dans une zone froide.
- Placer les capteurs aussi près que possible des sources de chaleur.
- Positionner les capteurs de manière à refléter les gradients de température dans les trois directions.
- Prendre en compte les variations de température le long de chaque axe.
- Répartir uniformément les capteurs sur l'ensemble de la MO.
- Respecter une certaine symétrie dans la distribution des capteurs.
- Éliminer les redondances et réduire le nombre de sites sélectionnés.

En appliquant ces recommandations, il apparaît que seulement 11 capteurs seraient nécessaires pour caractériser le comportement thermique de la MO et fournir une cartographie thermique précise et fiable, tant en termes des températures que d'erreurs thermiques. Les emplacements des points sensibles à la température sont illustrés à la figure 2.15 et explicitement énumérés au tableau 2.2.

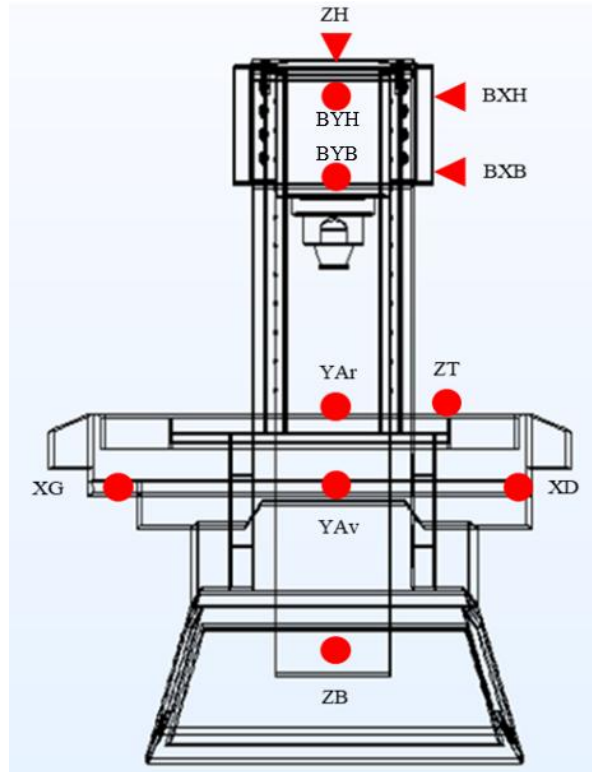


Figure 2.15 : Localisations des capteurs de mesure de température

Tableau 2.2 : Identification des emplacements des capteurs de mesure de température

Capteurs de température	Localisation
<i>BXH</i>	Broche/Côté-Haut sur la direction X
<i>BYH</i>	Broche/Avant-Haut sur la direction Y
<i>BXB</i>	Broche/Côté-bas sur la direction X
<i>BYB</i>	Broche/Avant-bas sur la direction Y
<i>XD</i>	Moteur sur l'axe X/Côté droit
<i>XG</i>	Base de support sur l'axe X/Côté gauche
<i>YAv</i>	Base de support sur l'axe Y/Côté - Avant
<i>YAr</i>	Moteur sur l'axe Y/Côté - Arrière
<i>ZH</i>	Région haute de la colonne/Colonne - Haut
<i>ZB</i>	Région basse de la colonne/Colonne - Bas
<i>ZT</i>	Zone de travail
<i>Amb</i>	À proximité de la machine

CHAPITRE 3

MODÉLISATION GÉOMÉTRIQUE

3.1 INTRODUCTION

La modélisation des erreurs géométriques dans les MO vise à améliorer leur précision en identifiant, quantifiant et intégrant les erreurs dans l'analyse du comportement cinématique. Cette démarche repose sur une approche systématique incluant la description de la structure de la machine, l'utilisation des matrices de transformation homogène (*MTH*) et la prise en compte des imperfections mécaniques qui altèrent le positionnement et l'orientation des différents éléments mobiles de la MO. Les erreurs géométriques se classent généralement en deux catégories principales : les erreurs de position et les erreurs d'orientation. D'après la norme ISO 230 [68], le nombre et la nature des erreurs à considérer dépendent du type d'axe. Ces erreurs trouvent leur origine dans les tolérances d'usinage, les défauts d'alignement ou encore les déformations introduites lors du montage des composants mécaniques de la machine [8], [64-69].

Une MO est typiquement constituée d'une série de liaisons ou de boucles structurelles formant des assemblages fonctionnels de divers éléments tels que le bâti, colonne, chariot, table et broche assurant le positionnement relatif entre la pièce et l'outil. Les imperfections présentes dans ces assemblages engendrent des écarts entre les comportements cinématiques idéals et réels. Cela se manifeste comme l'illustre la figure 3.1, par une différence entre la position désirée de l'outil (P_d) et sa position réelle (P_r).

Ce chapitre présente le développement d'un modèle cinématique permettant d'exprimer les relations spatiales entre les différents composants de la machine. En

s'appuyant sur la cinématique des corps rigides et en utilisant les matrices de transformation homogènes, ce modèle permet d'évaluer les écarts identifiés précédemment (différence entre la position idéale ou désirée et la position réelle de l'outil) en tenant compte des erreurs géométriques cumulées tout au long de la chaîne cinématique [67-72].

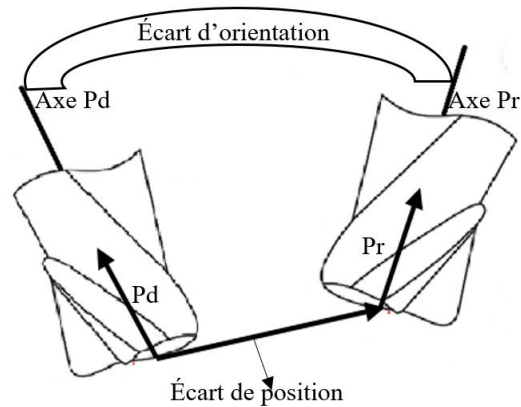


Figure 3.1 : Déviation de position et d'orientation de l'outil

3.2 DESCRIPTION ET MODELISATION DES ERREURS

Les imperfections géométriques dans une MO introduisent diverses erreurs linéaires et angulaires entre ses composants mobiles. Ces imprécisions entraînent des écarts de positionnement et d'orientation de l'outil de coupe par rapport à la pièce. La figure 3.2 illustre clairement les six composantes d'erreur associées à un axe linéaire. δ_{ij} représente l'écart de translation le long de l'axe i lorsque le mouvement s'effectue le long de l'axe j , tandis que ε_{ij} désigne les écarts angulaires, où i correspond à l'axe de rotation lorsque le mouvement s'effectue le long de l'axe j . Enfin, X indique la direction souhaitée du mouvement. À noter que la règle de la main droite est utilisée pour définir la rotation positive.

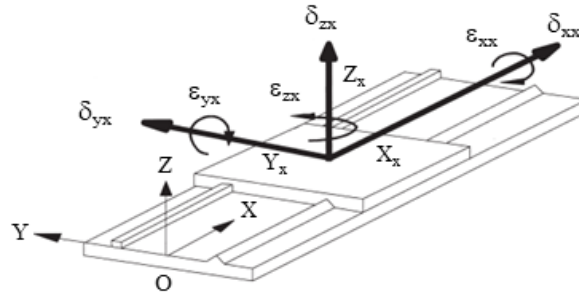


Figure 3.2 : Illustration schématique des erreurs linéaires et angulaires d'un composant en mouvement sur l'axe X [67].

Pour un centre d'usinage vertical (3 axes), chaque axe présente 6 degrés de liberté, auxquels s'ajoutent 3 erreurs d'orthogonalité, représentant le décalage angulaire entre les axes. Ainsi, un total de 21 composantes d'erreur est généralement identifié : 6 par axe, plus les 3 erreurs d'orthogonalité. Le tableau 3.1 propose une synthèse de ces erreurs géométriques affectant une machine à 3 axes.

Tableau 3.1 : Erreurs élémentaires typiques dans le cas d'un centre d'usinage vertical (3 axes).

	Translation			Rotation			Orthogonalité
X	δ_{xx}	δ_{yx}	δ_{zx}	ϵ_{xx}	ϵ_{yx}	ϵ_{zx}	α_{xy} α_{yz} α_{xz}
Y	δ_{xy}	δ_{yy}	δ_{zy}	ϵ_{xy}	ϵ_{yy}	ϵ_{zy}	
Z	δ_{xz}	δ_{yz}	δ_{zz}	ϵ_{xz}	ϵ_{yz}	ϵ_{zz}	

Les MO sont composées d'une séquence de liaisons reliées par des articulations, assurant un mouvement de rotation ou de translation. En appliquant la cinématique des corps rigides, la position relative des axes les uns par rapport aux autres ou par rapport à un système de référence global peut être décrite à l'aide d'une matrice de transformation homogène (MTH) sous forme tridimensionnelle par une matrice 4×4. La MTH exprime la translation pure d'un chariot idéal pour l'axe X sous la forme suivante :

$${}^R T_{X_{ideal}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Où x désigne la position du système de coordonnées de l'axe X (O_x, X_x, Y_x, Z_x) par rapport au système de coordonnées de référence (O, X_R, Y_R, Z_R). En tenant compte de l'erreur de mouvement à 6 degrés de liberté, l'erreur totale de l'axe est caractérisée par une combinaison de composantes de rotation et de translation. En utilisant la MTH et en supposant de faibles écarts angulaires, la translation réelle le long d'un axe X réel est donnée par :

$${}^R T_{X_{R\acute{e}el}} = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{zx} & \varepsilon_{yx} & x + \delta_{xx} \\ \varepsilon_{zx} & 1 & -\varepsilon_{xx} & \delta_{yx} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{xx} & 1 & \delta_{zx} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

L'erreur de positionnement est définie comme l'écart entre la position réelle et la position souhaitée de l'outil. La position réelle peut être obtenue en multipliant successivement tous les MTH réels. La représentation schématique de la chaîne cinématique et l'identification de systèmes de coordonnées sur un centre d'usinage vertical sont illustrées à la figure 3.3.

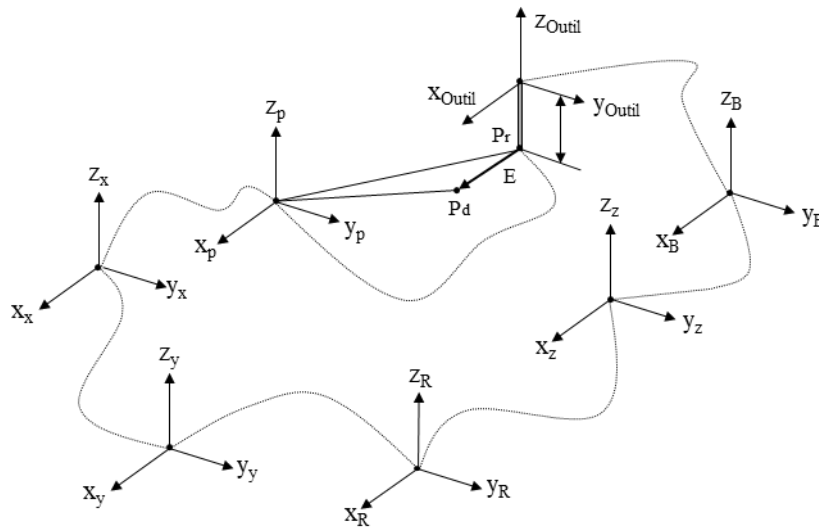


Figure 3.3 : Représentation schématique de la chaîne cinématique pour une MO à 3 axes

La MTH qui décrit la relation spatiale entre le système de coordonnées de référence (R) et le système de coordonnées de l'outil (Ro), est exprimée par l'équation (3.3). La relation entre le système de coordonnées de référence (R) et le système de coordonnées de la pièce (Rp), est donnée par l'équation (3.4).

$$T_{Ro}^R = T_Z^R \ T_{Rb}^Z \ T_{Ro}^{Rb} \quad (3.3)$$

$$T_{Rp}^R = T_Y^R \ T_X^Y \ T_{Rp}^X \quad (3.4)$$

Où X, Y et Z sont les axes de la MO, B représente la broche et P la pièce.

T_{Ro}^{Rb} et T_{Rp}^X sont représentés par les vecteurs suivants dans leurs repères respectifs.

$$T_{Ro}^{Rb} = [T_x \ T_y \ T_z \ 1] \quad (3.5)$$

$$T_{Rp}^X = [P_x \ P_y \ P_z \ 1] \quad (3.6)$$

Comme toutes ces liaisons ne sont pas parfaites, des erreurs relatives entre l'outil et la pièce sont mises en jeu. Par conséquent, la relation spatiale réelle entre l'outil et un point donné de la pièce peut être exprimée comme par la relation suivante :

$$T_{Rp}^R = T_{Ro}^R \ E \quad (3.7)$$

$$E = T_{Ro}^{R^{-1}} \ T_{Rp}^R \quad (3.8)$$

Où E est la matrice de transformation homogène des erreurs volumétriques représentant les erreurs de position et d'orientation entre l'outil de coupe et la pièce. Les composantes du vecteur de position de E représentent les écarts linéaires entre la position idéale et la position réelle, autrement dit, les translations à effectuer pour combler les écarts pour atteindre l'emplacement approprié sur la pièce. Pour calculer les écarts et déplacer les axes à cet emplacement, il est nécessaire de faire appel à la cinématique inverse. Or, comme il n'y a que des axes de translation dans cette MO, les composantes de l'erreur volumétriques E, peuvent être calculées exclusivement à partir des vecteurs de position fournis par les MTH. Le vecteur des composantes de l'erreur volumétrique E par rapport au système de coordonnées de référence peut être obtenu à partir de l'équation suivante :

$$E = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix}_{Rp}^R - \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix}_{Ro}^R = E_{Rp}^R - E_{Ro}^R \quad (3.9)$$

Par conséquent, le vecteur $E = [E_x \ E_y \ E_z]$ représente les déplacements incrémentaux à effectuer sur les axes X, Y et Z pour compenser les erreurs de position de la pointe de l'outil. La forme développée du vecteur des composantes de l'erreur volumétrique est obtenue par les équations (3.10), (3.11) et (3.12).

$$E_x = -\delta_{xy} - \delta_{xx} + \delta_{xz} + T_z(\varepsilon_{yz}) - (T_z + Z)(\varepsilon_{yy} + \varepsilon_{yx}) - (T_y - Y)(-\varepsilon_{zy} - \varepsilon_{zx}) - T_y(\varepsilon_{zz}) - Y(\alpha_{xy}) + Z(\alpha_{xz}) \quad (3.10)$$

$$E_y = -\delta_{yy} - \delta_{yx} + \delta_{yz} - T_z(\varepsilon_{xz}) - X(\varepsilon_{zy}) - (T_z + Z)(-\varepsilon_{xy} - \varepsilon_{xx}) - (T_x - X)(\varepsilon_{zy} + \varepsilon_{zx}) + T_x(\varepsilon_{zz}) - X(\alpha_{xy}) + Z(\alpha_{yz}) \quad (3.11)$$

$$E_z = -\delta_{zy} - \delta_{zx} + \delta_{zz} + T_y(\varepsilon_{xz}) + X(\varepsilon_{zy}) - T_x(\varepsilon_{yz}) - (T_x - X)(-\varepsilon_{zy} - \varepsilon_{yx}) - (T_y - Y)(\varepsilon_{xy} + \varepsilon_{xx}) - X(\alpha_{xz}) - Y(\alpha_{zy}) \quad (3.12)$$

Où X, Y et Z désignent les positions nominales sur les axes de la machine, les δ_{ij} , ε_{ij} et α_{ij} sont les erreurs élémentaires liées à la géométrie de la machine et T_i représentent les dimensions de l'outil.

Pour appliquer le modèle cinématique, il est essentiel de mesurer ses erreurs géométriques. Ces mesures sont généralement effectuées à l'aide d'un interféromètre laser, dont la précision est adaptée pour l'élaboration d'un modèle prédictif fiable [73-77].

Les graphes de la figure 3.4 illustrent les mesures des erreurs géométriques de la MO sur les axes X, Y et Z. Elles présentent un exemple de résultats obtenus à une température moyenne comprise entre 20 et 20.6°C, mettant en évidence des erreurs de déplacement pouvant atteindre 21 μm pour les erreurs linéaires et de 1.2 arcsec pour l'axe X, de 27 μm et 2 arcsec pour l'axe Y, et de 35 μm et 4 arcsec pour l'axe Z.

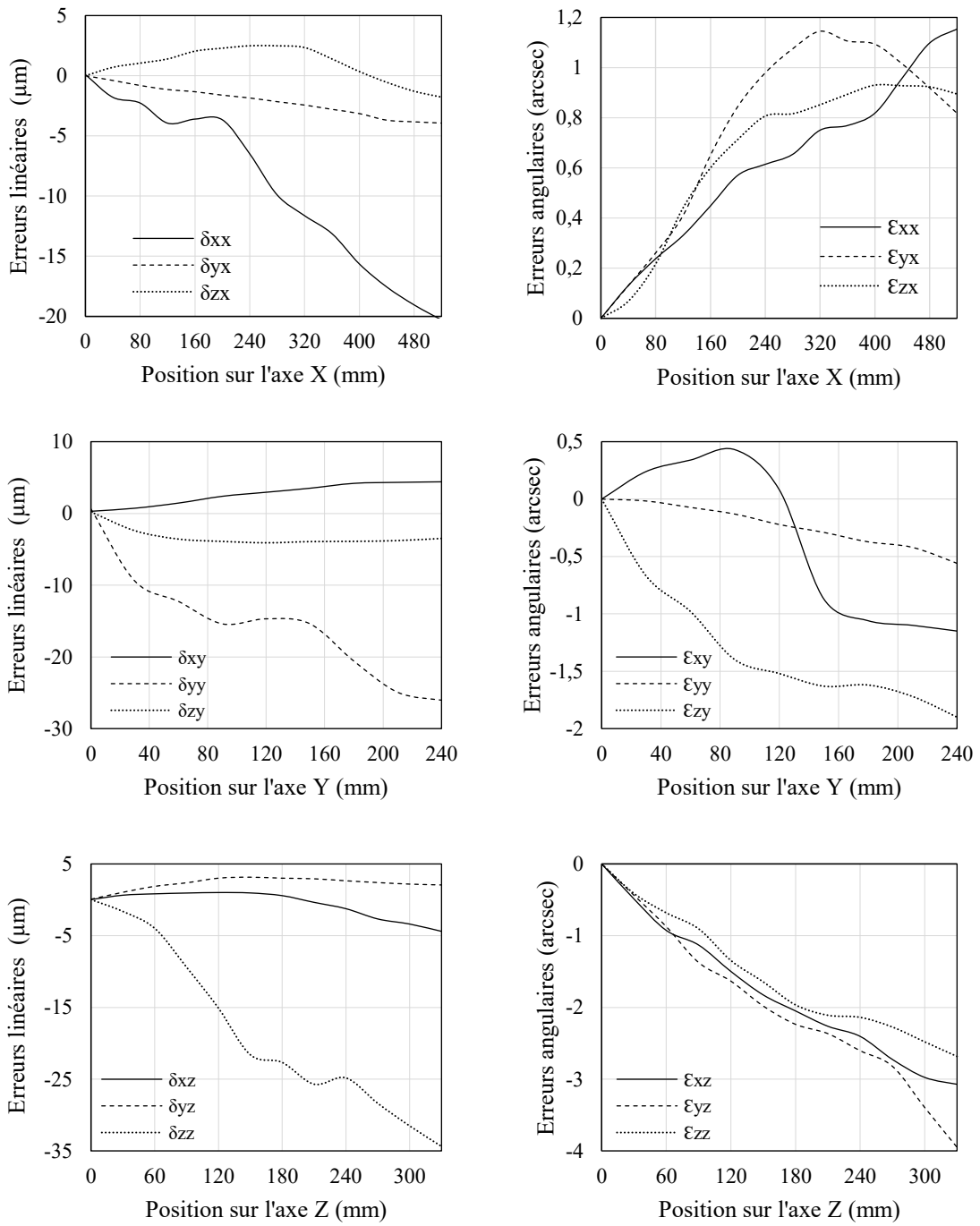


Figure 3.4 : Exemples d'erreurs géométriques mesurées le long des axes X, Y et Z.

Les erreurs géométriques ont été mesurées à des positions spécifiques le long des axes X, Y et Z, selon des pas définis. Cependant, ces mesures ne couvrent qu'un nombre limité de positions, ce qui rend nécessaire la modélisation et la prédiction de ces erreurs à n'importe quelle position dans l'espace de travail. La prédiction des trois composantes de l'erreur volumétrique totale $[E_X, E_Y, E_Z]$ repose sur la qualité de modèles utilisés.

Pour répondre à ce besoin, les réseaux de neurones sont considérés comme étant une option fiable et économique pour cette tâche. Dans cette optique, le perceptron multicouche, avec sa rapidité, ses capacités à prendre en charge des relations multi-entrées multi-sorties hautement non linéaires, son aptitude à la généralisation et sa compatibilité avec des applications en temps réel semble être le modèle le plus approprié. Tel qu'illustré dans la figure 3.5, dans ce type de réseau, chaque neurone représente un modèle non linéaire. O_j est la sortie du neurone courant j , O_i est la sortie d'un neurone de la couche précédente i , θ_j est l'écart associé au neurone j et W_{ij} représente le poids de la connexion entre les neurones i et j . Des architectures de type de $PxQxS$ représentent des réseaux à 3 couches ayant P entrées, Q neurones dans la couche cachée et S sortie [74], [77-79].

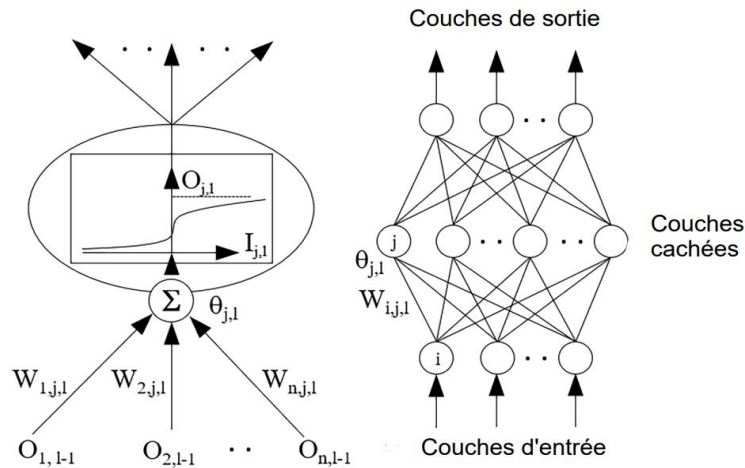


Figure 3.5 : Structure typique d'un réseau de neurones multicouches

3.2.1 Évaluation des composantes de l'erreur volumétrique

L'évaluation des composantes de l'erreur volumétrique $[E_x, E_y, E_z]$ à n'importe quelle position dans l'espace de travail en se basant sur quelques mesures des erreurs géométriques le long des axes X, Y, Z nécessite la mise en œuvre d'une stratégie spécifique combinant modèle cinématique et modèles neuroniques. Deux options peuvent être envisagées : une approche basée sur composantes géométriques et une approche basée sur composantes volumétriques.

L'approche basée sur les composantes géométriques consiste à développer un modèle neuronique par axe pour estimer les trois erreurs de translation et les trois erreurs de rotation en fonction de la position nominale le long de l'axe. Trois modèles sont nécessaires pour être capables d'estimer toutes les composantes géométriques. Ces composantes sont ensuite utilisées dans le modèle cinématique (équations 3.10 à 3.12) pour synthétiser les composantes de l'erreur volumétrique $[E_x, E_y, E_z]$ peu importe la position dans l'espace de travail de la MO. Cette procédure est résumée dans la figure 3.6.

En se basant sur des modèles entraînés à partir de données correspondant à des mesures précises et réelles, cette approche permet de capturer la non-linéarité et la complexité des variations des erreurs géométrique et de les refléter sur l'erreur volumétrique observée sur la machine et reconstruire une estimation tridimensionnelle complète du comportement géométrique de la machine. Cette approche constitue une base solide et fiable pour construire une stratégie de compensation d'erreur.

L'approche basée sur les composantes volumétriques consiste à calculer d'abord les composantes de l'erreur volumétrique $[E_x, E_y, E_z]$ directement à partir des composantes géométriques mesurées pour ensuite les modéliser à l'aide d'un réseau de neurones en fonction des positions nominales X, Y et Z. Cette procédure est illustrée dans la figure 3.7.

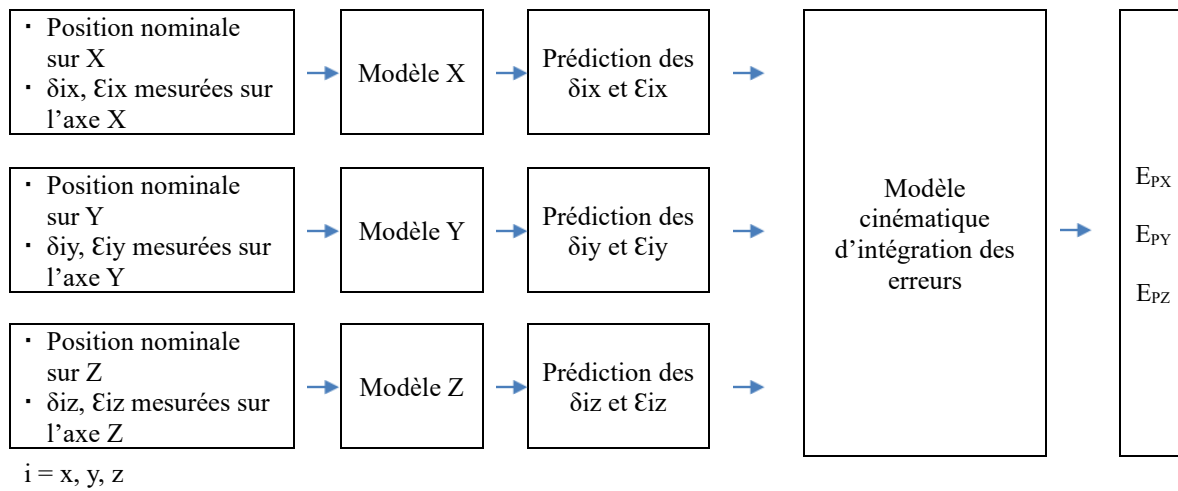


Figure 3.6 : Modélisation prédictive basée sur les composantes géométriques

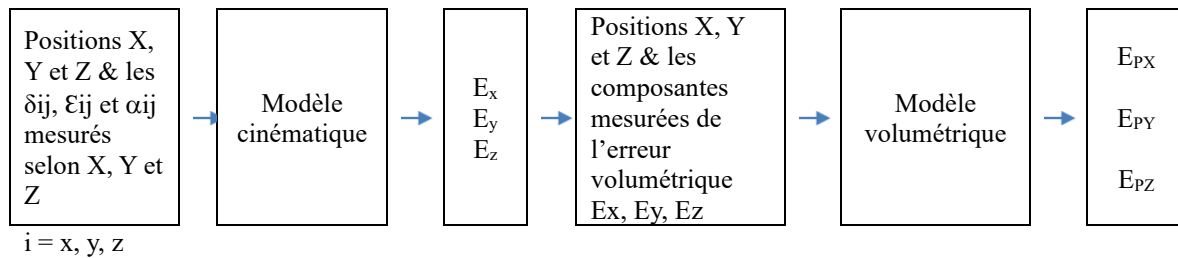


Figure 3.7 : Modélisation basée sur les composantes de l'erreur volumétrique

Afin de déterminer laquelle des deux approches de modélisation est la plus efficace, une évaluation comparative de leurs performances respectives a été réalisée. Les modèles prédictifs correspondants à chacune des deux approches proposées ont été développés. Leur performance a été analysée en tenant compte de la capacité de prédiction et de la cohérence des résultats obtenus lors d'une validation croisée.

L'analyse des résultats a mis en évidence une supériorité nette de l'approche basée sur les composantes géométriques. Cette approche a permis de réduire l'erreur de modélisation à moins de 5% contre 12% pour l'approche volumétrique. Avec une précision au moins deux

fois supérieure, l'approche basée sur les composantes élémentaires a été retenue comme base pour la modélisation prédictive des erreurs pour une compensation dynamique.

3.3 APPLICATIONS

Étant donné que l'erreur volumétrique dans les directions X, Y et Z peut être calculée à l'aide des équations précédemment établies et qu'il est possible d'estimer les erreurs géométriques à n'importe quelle position dans l'espace de travail de la MO, il est alors aisé de modéliser et représenter ces erreurs dans un espace tridimensionnel. De cette manière, il est possible de visualiser les erreurs volumétriques mesurées et prédites ainsi que la différence entre les deux sous forme d'erreurs résiduelles après une éventuelle compensation. Les figures 3.8, 3.9 et 3.10 illustrent, à titre d'exemple, des représentations 3D des composantes de l'erreur volumétrique $[E_X, E_Y, E_Z]$ dans les plans XY, YZ et XZ, pour une température moyenne entre 20 et 20.5°C. Chaque figure présente trois graphiques : les composantes de l'erreur volumétrique mesurées (E_{MX}, E_{MY}, E_{MZ}), les composantes de l'erreur volumétrique prédites (E_{PX}, E_{PY}, E_{PZ}) et les erreurs résiduelles (E_{RX}, E_{RY}, E_{RZ}).

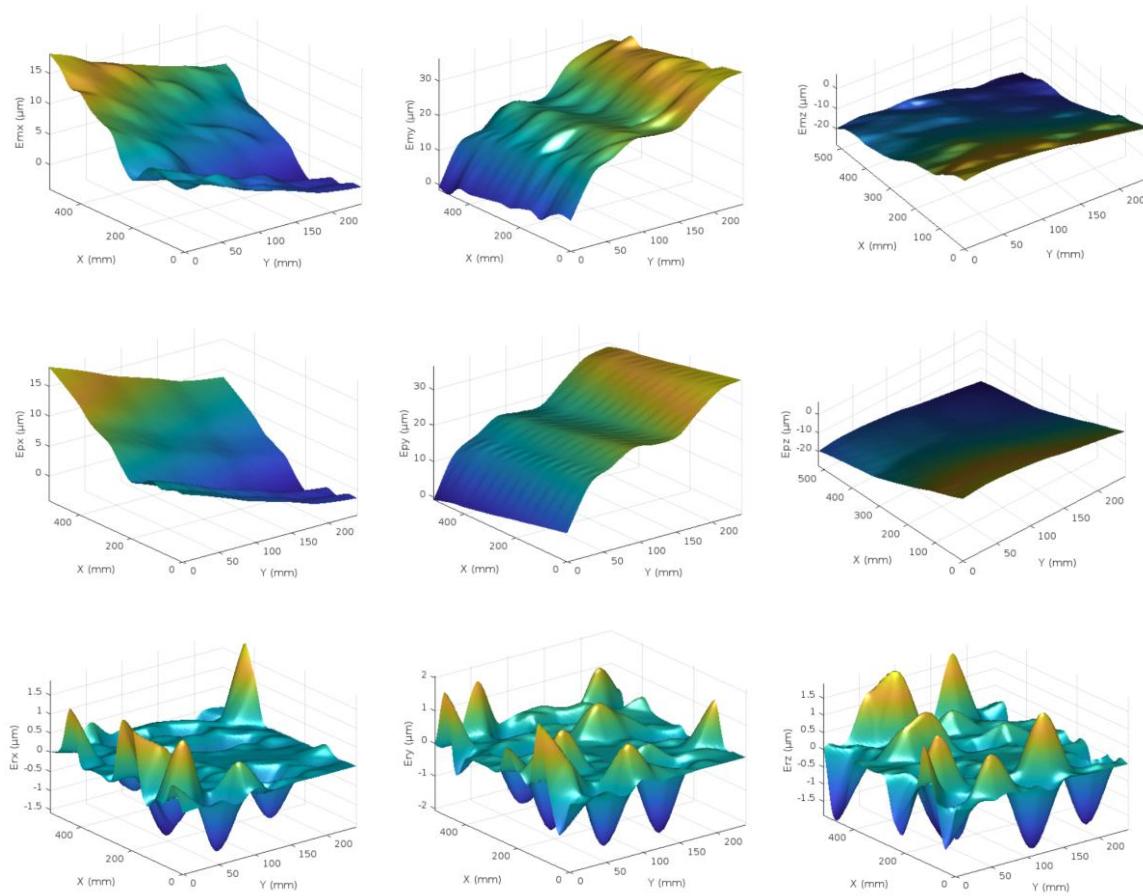


Figure 3.8 : Composantes de l'erreur volumétrique mesurées, prédites et résiduelles dans le plan XY

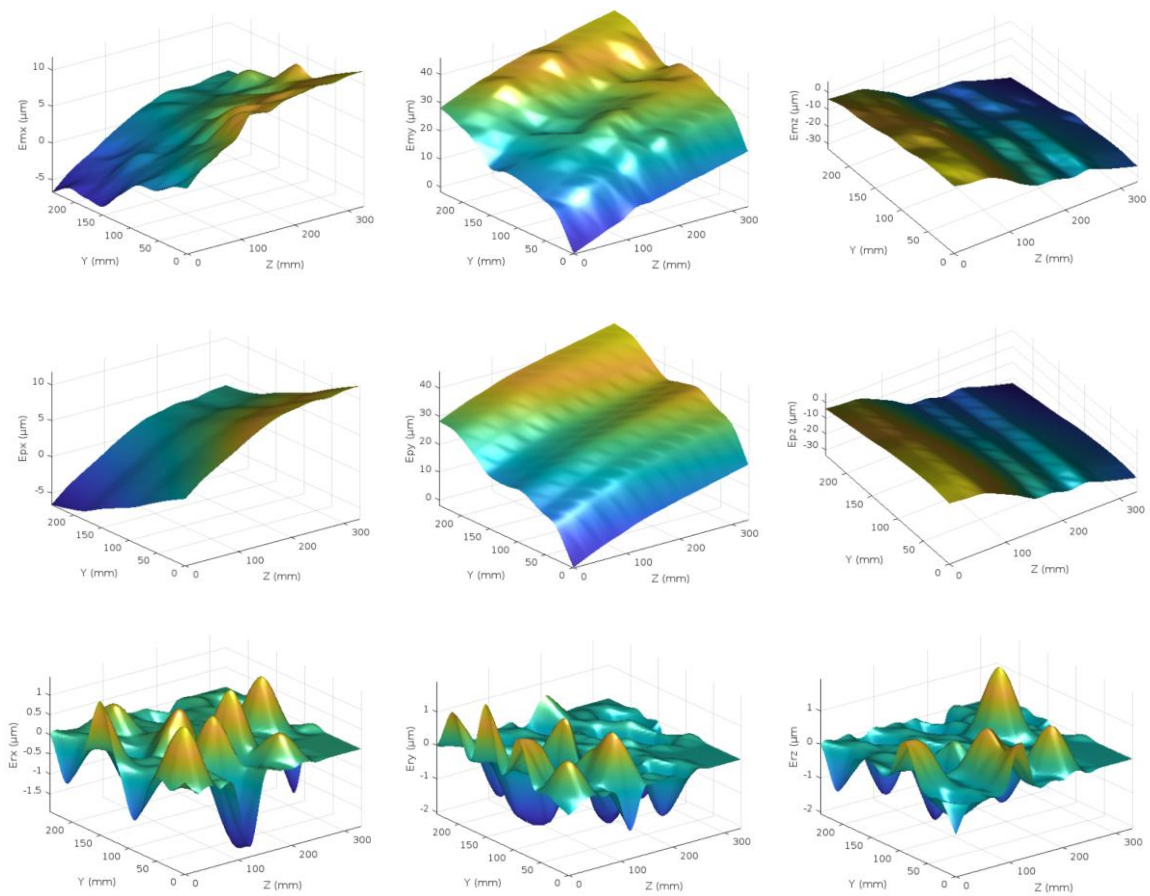


Figure 3.9 : Composantes de l'erreur volumétrique mesurées, prédites et résiduelles dans le plan YZ

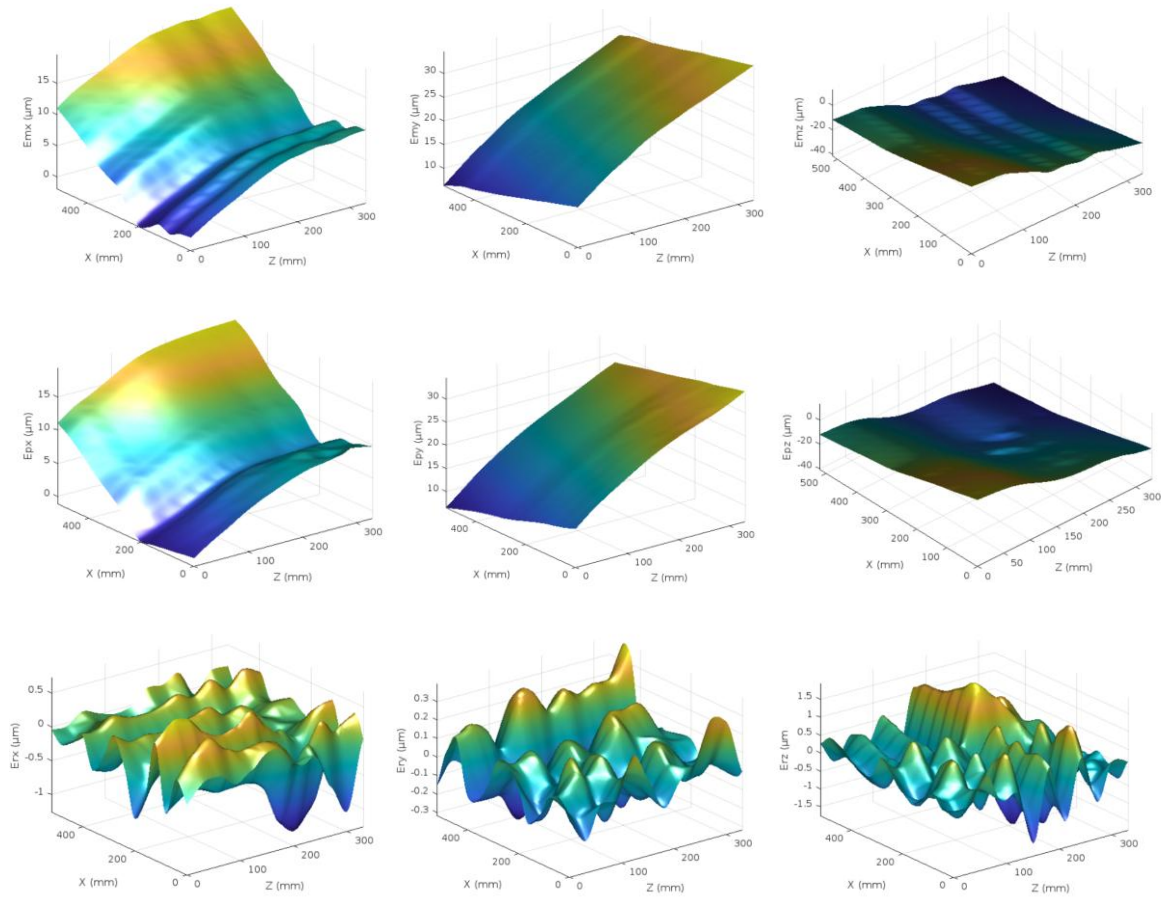


Figure 3.10 : Composantes de l'erreur volumétrique mesurées, prédites et résiduelles dans le plan XZ

3.4 OBSERVATIONS

Les résultats montrent globalement que les erreurs résiduelles maximales ne dépassent pas les 3 μm pour les trois composantes de l'erreur volumétrique. Les erreurs mesurées dans les différents plans révèlent des tendances similaires en termes de comportement et de distribution. Dans toutes les directions, les erreurs présentent des variations faibles et régulières indiquant que les mesures ont été réalisées dans un environnement stable. Elles sont caractérisées par des surfaces relativement régulières avec de légères ondulations

suggérant des comportements linéaires quelquefois quadratiques sans variations brutales. Ces ondulations, présentant des écarts plus marqués dans certaines zones, suggèrent la présence de défauts d'alignement, de petits désaxages ou encore des micro-défauts structurels.

Les résultats renforcent l'idée que la qualité géométrique de la machine est un principal facteur influençant la précision. L'approche de modélisation prédictive utilisée démontre une très bonne capacité à reproduire les erreurs mesurées avec précision. Dans tous les plans, les erreurs prédites suivent étroitement les variations des erreurs mesurées, avec un léger effet de lissage, ce qui montre que les erreurs sont bien anticipées. L'effet de lissage observé prouve également que le modèle s'adapte efficacement aux variations locales en capturant l'essentiel des erreurs sans surmodélisation. Les erreurs résiduelles restent faibles, ce qui atteste de la justesse du modèle. La nature homogène et quasi-aléatoire des surfaces des erreurs résiduelles signifiant que le modèle parvient à expliquer une grande partie des erreurs mesurées. Quelques pics localisés sont présents, mais leur amplitude reste faible et sans impact majeur sur la précision du modèle.

CHAPITRE 4

MODÉLISATION GÉOMÉTRIQUE-THERMIQUE

4.1 INTRODUCTION

L'utilisation prolongée d'une MO engendre des flux de chaleur provenant de différentes sources internes, telles que les moteurs, la broche et les systèmes d'alimentation, ainsi que des sources externes, comme les variations de température de l'environnement. Ces variations thermiques entraînent des dilatations différentielles des composants de la machine, modifiant la structure géométrique de la MO. Pour tenir compte de ces effets, il est essentiel de développer des modèles prédictifs capables de prendre en charge les erreurs géométriques et leur évolution dans le temps sous les effets des gradients thermiques [80-81]. Les modèles prédictifs doivent donc s'appuyer sur les deux composantes principales des erreurs : la composante géométrique et la composante thermique.

4.1.1 Adaptation du modèle cinématique

Le modèle cinématique proposé dans le chapitre 3 est adapté pour permettre d'intégrer la dimension thermique du problème. La nouvelle version du modèle cinématique est présentée par les équations suivantes :

$$E_X = \delta_{xb} - \delta_{xy} - \delta_{xx} + \delta_{xz} + T_z(\varepsilon_{yz} + \varepsilon_{yb}) - (T_z + Z)(\varepsilon_{zy} + \varepsilon_{yx}) - (T_y - Y)(-\varepsilon_{zy} - \varepsilon_{zx}) - T_y(\varepsilon_{zz}) - Y(\alpha_{xy}) + Z(\alpha_{xz}) \quad (4.1)$$

$$E_Y = \delta_{yb} - \delta_{yy} - \delta_{yx} + \delta_{yz} - T_z(\varepsilon_{xz} - \varepsilon_{xb}) - X(\varepsilon_{zy}) - (T_z + Z)(-\varepsilon_x \varepsilon_{xy})(T_x X)(\varepsilon_{zy} + \varepsilon_{zx}) + T_x(\varepsilon_{zz})X(\alpha_{xy}) + Z(\alpha_{yz}) \quad (4.2)$$

$$E_Z = \delta_{zb} - \delta_{zy} - \delta_{zx} + \delta_{zz} + T_y(\varepsilon_{xz}) + X(\varepsilon_{zy}) - T_x(\varepsilon_{yz}) - (T_x - X)(-\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{yx}) - (T_y - Y)(\varepsilon_{xy} + \varepsilon_{xx}) - X(\alpha_{xz}) - Y(\alpha_{zy}) \quad (4.3)$$

Où X, Y et Z sont les positions nominales, T_x, T_y et T_z représentent respectivement les décalages de l'outil dans les directions X, Y et Z, δ_{ib} et ε_{ib} sont les dérivées thermiques de la

broche, α_{ij} sont les erreurs d'orthogonalité et finalement les δ_{ij} et ε_{ij} sont les erreurs géométriques le long des axes X, Y et Z.

Dans ces équations, il est simple de distinguer les 21 erreurs géométriques qui dépendent des positions nominales sur les axes de la machine, dont 9 erreurs de translation, 9 erreurs de rotation et 3 erreurs d'orthogonalité. Ces erreurs sont influencées non seulement par la position le long des axes, mais aussi par les variations thermiques. À partir de ces équations, il est également possible d'identifier certaines composantes de l'erreur qui sont totalement indépendantes de la position, mais fortement dépendantes du champ de température dans la MO. Dans un centre d'usinage vertical, cinq composantes relatives à la dérive thermique de la broche sont responsables de la dégradation de la précision de la machine : la dérive thermique axiale (δ_{zb}), qui provoque un déplacement le long de l'axe Z, les dérives thermiques radiales (δ_{xb} et δ_{yb}), qui se produisent perpendiculairement à l'axe Z dans les directions X et Y, et les dérives thermiques d'inclinaison (ε_{xb} et ε_{yb}), qui reflètent les déviations angulaires de l'axe de la broche dans les plans XZ et YZ respectivement.

4.1.2 Intégration des erreurs

La procédure de modélisation adoptée au chapitre 3 est adaptée pour prendre en charge les erreurs associées à la broche, mais également pour tenir compte de la dimension thermique du problème à résoudre. La procédure de modélisation prédictive des composantes volumétriques de l'erreur quasi-statique (géométrique et thermique) est illustrée dans la figure 4.1. À noter que même si différentes techniques peuvent être utilisées pour modéliser ses composantes, les réseaux de neurones ont été adaptés dans ce cas également.

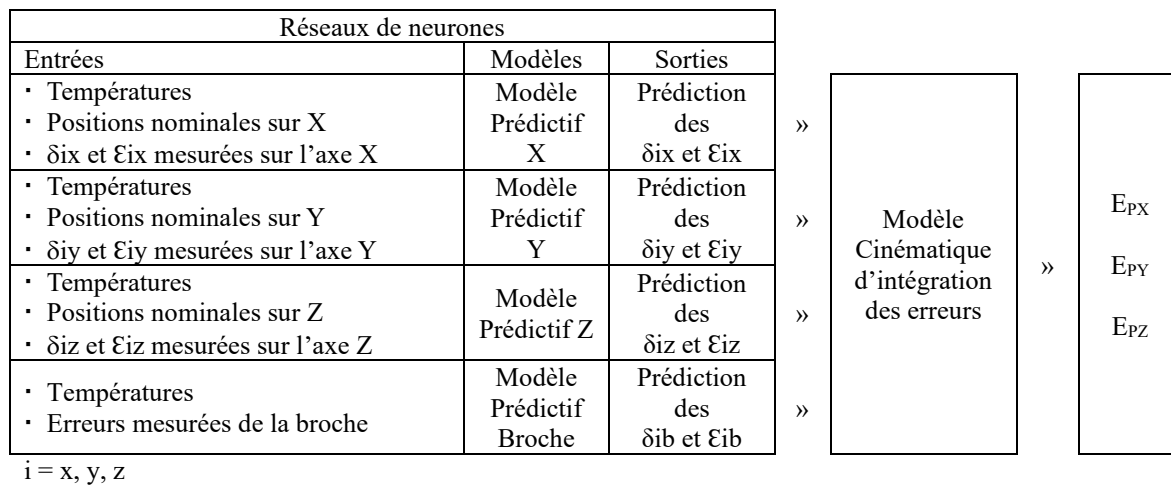


Figure 4.1 : Modèle de prédiction des composantes volumétriques de l'erreur quasi-statique

La mise en œuvre de cette procédure de modélisation nécessite la mesure des différentes composantes de l'erreur dans des conditions thermiques variées afin de refléter les conditions réelles du fonctionnement de la machine. Les dispositifs utilisés pour les mesures des composantes d'erreur sont regroupés en trois catégories : (i) les erreurs de positionnement dans les directions X, Y et Z sont mesurées à l'aide d'un laser interféromètre, (ii) les dérives thermiques de la broche (trois dérives de translation et deux inclinaisons angulaires de l'axe de la broche) sont mesurées conformément à la norme appropriée à l'aide de la traditionnelle méthode des cinq capteurs sans contact [65-66], et (iii) la distribution de température dans les zones sensibles de la MO est surveillée à l'aide d'un réseau de 16 thermistors avec une plage de mesure de -20°C à 120°C et une résolution de 0.0625°C. La figure 4.2 présente une illustration détaillée des dispositifs de mesure adoptés.

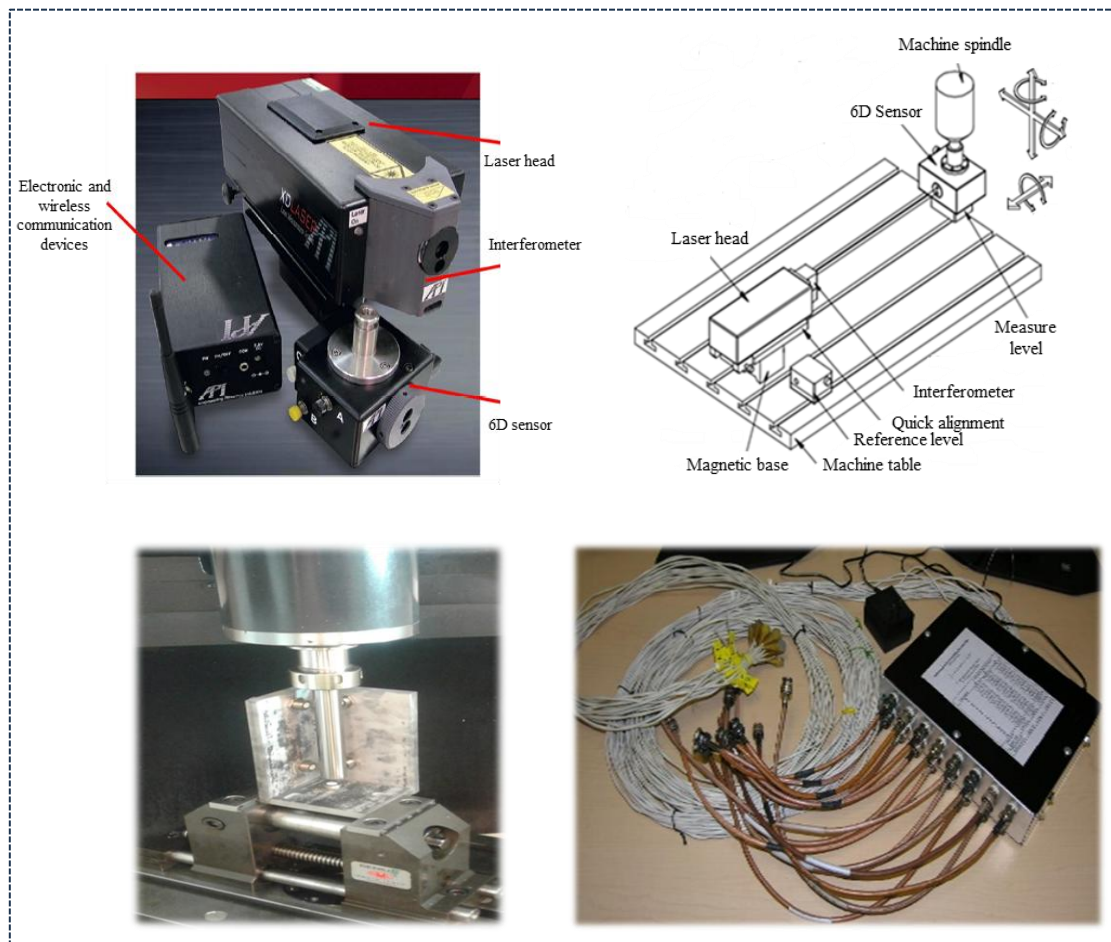


Figure 4.2 : Dispositifs de mesure des erreurs et de la température

4.1.3 Mesure des températures et des erreurs

Pour assurer une meilleure concordance, les températures et les composantes d'erreur géométriques et thermiques sont mesurées simultanément. Cette façon de faire permet de garantir que chaque ensemble d'erreurs géométrique-thermiques soit associé à une distribution de température spécifique [82-87].

Le choix de l'emplacement des capteurs de température est essentiel pour une modélisation structurée et une compensation efficace des erreurs thermiques. Les capteurs de température doivent, si possible, être placés dans les zones de la machine les plus sujettes

aux distorsions thermiques. Les analyses numériques et expérimentales menées précédemment révèlent une corrélation significative entre l'augmentation moyenne de température le long de l'axe de la broche et les erreurs thermiques. Par conséquent, comme le montre la figure 2.15, seuls 11 emplacements de capteurs ont été sélectionnés afin de représenter les gradients de température qui contribuent le plus aux erreurs thermiques. Les emplacements proposés pour les capteurs sont détaillés dans le tableau 2.2 [88].

4.2 EXEMPLE DE RÉSULTATS DE MESURE DES ERREURS

Pour analyser l'impact des sollicitations thermiques sur la géométrie de la machine et sur le niveau des erreurs induites thermiquement, des mesures ont été réalisées selon cinq cycles thermiques représentatifs du fonctionnement typique de la machine. La figure 4.3 illustre un exemple de profil de température où la machine fonctionne en continu pendant des cycles de quatre heures à des conditions prédéfinies en termes de vitesses d'avance et de vitesses de rotation de la broche. Les résultats montrent une différence significative entre la température moyenne près de la broche (près de 30°C) et le long des axes (près de 26°C), tandis que la température maximale enregistrée dans la zone de travail reste inférieure à 23°C. L'analyse des données révèle une corrélation mineure (moins de 1%) entre la température ambiante et les erreurs thermiques, indiquant que l'effet de la température ambiante sur ces erreurs peut être considéré comme négligeable.

Les erreurs dans les directions X, Y et Z ont été mesurées avec des pas de déplacement de 40 mm pour l'axe X et de 30 mm pour les axes Y et Z, afin d'analyser leur évolution en fonction de la température. À titre d'exemple, les erreurs linéaires et angulaires sur l'axe X à une température de 26°C sont présentées dans les graphiques de la figure 4.4. Ces résultats montrent que l'écart linéaire mesuré le long de l'axe X atteint environ 16 μm pour un déplacement de 500 mm, ce qui est supérieur à la limite de précision standard de la MO de $\pm 5 \mu\text{m}$. Les erreurs angulaires, mesurées dans les mêmes conditions thermiques et à des

positions identiques, varient entre 0.65 et 0.9 arcsec. De même, les erreurs de rectitude fluctuent entre 1 et 3 μm .

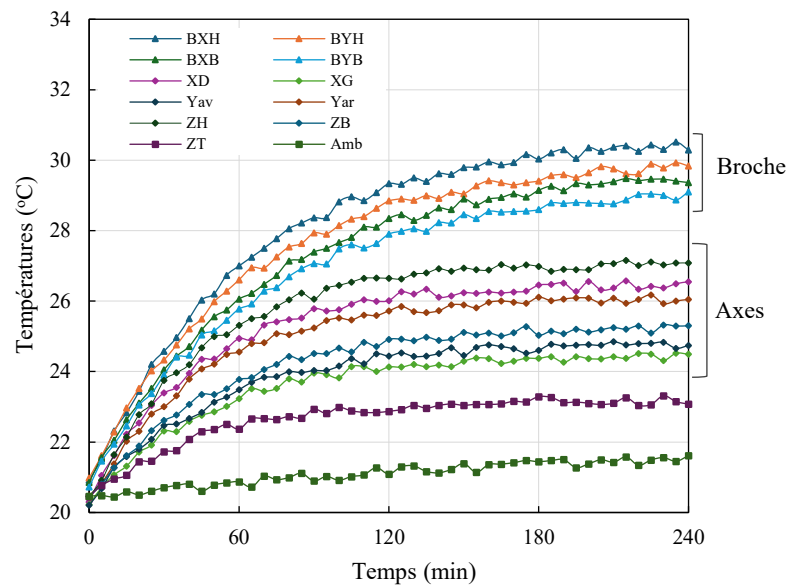


Figure 4.3 : Évolution typique des profils thermiques enregistrés lors de la mesure des erreurs.

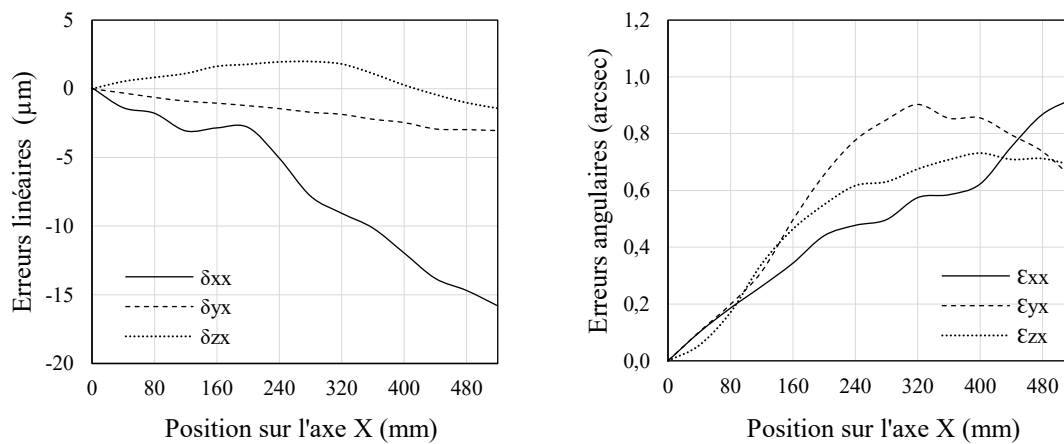


Figure 4.4 : Erreurs géométriques le long de l'axe X à une température moyenne de 26°C

L'analyse de la contribution des différentes sollicitations thermiques dans la variation des erreurs dans la direction X est illustrée dans la figure 4.5. Ce graphique montre que, même si les erreurs évoluent avec la variation de la température moyenne, leurs profils le long des axes restent relativement inchangés. Cette observation s'applique aussi bien aux erreurs de translation qu'aux erreurs angulaires. En conséquence, les erreurs qui dépendent de la position peuvent être décomposées en une composante statique (associée aux erreurs géométriques) et une composante variable, qui évolue au fil du temps en raison des effets thermiques. Les erreurs statiques sont présentes dès le démarrage à froid de la machine, tandis que les erreurs thermiques apparaissent progressivement à mesure que la machine fonctionne et que la température évolue.

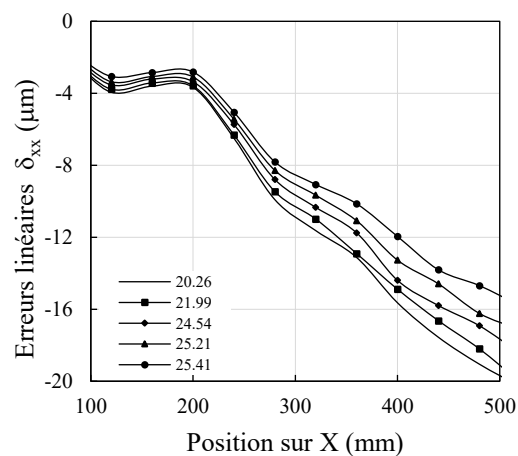


Figure 4.5 : Exemples de variation de l'erreur linéaire δ_{xx} sous l'effet de la variation de la température moyenne

Pour la mesure des dérives thermiques de la broche (3 translations et 2 rotations), la broche est programmée pour tourner à des vitesses de rotation prédéfinies pour des durées de 4 h. Durant chaque période, les dérives thermiques et l'historique de la variation de la température de la broche sont suivis en continu. Les premières observations indiquent des corrélations claires et significatives entre les dérives thermiques de la broche, l'augmentation de la température moyenne le long de la broche ainsi qu'avec la vitesse de rotation de la

broche. Comme le montre la figure 4.6, les dérives thermiques et les profils de température ne suivent pas une progression strictement proportionnelle à la vitesse de rotation de la broche. Il est toutefois important de souligner que l'augmentation des dérives thermiques suit étroitement les variations de température. Cette caractéristique est particulièrement précieuse pour simplifier la modélisation, offrant l'option d'exclure la vitesse de rotation de la broche comme variable d'entrée dans le modèle prédictif des erreurs thermiques.

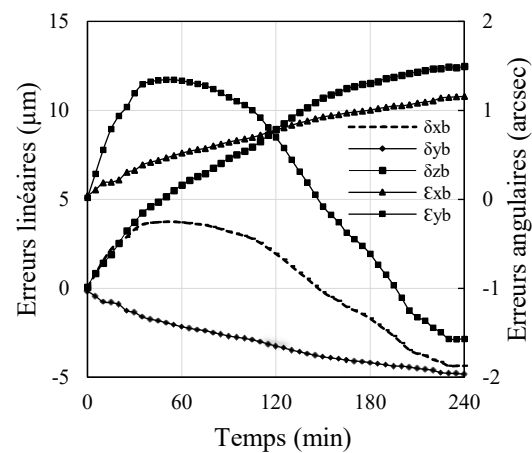


Figure 4.6 : Exemple de dérives thermiques de la broche à une température moyenne variant entre 20 à 32 °C

4.3 MODELISATION PREDICTIVE DES ERREURS GEOMETRIQUES ET THERMIQUES

Les quatre modèles à base de réseaux de neurones ont été développés en utilisant les mesures de température obtenues à partir des 11 capteurs et des 26 composantes géométriques et thermiques de l'erreur (21 pour les trois axes de la machine et 5 pour la broche). Les quatre modèles ont permis de prédire n'importe quelle composante de l'erreur avec une précision acceptable (moins de 5% d'erreur) et ce quelle que soit la position dans l'espace de travail et quelles que soient les conditions thermiques de la machine. Les

composantes géométriques et thermiques de l'erreur mesurées et prédites sont par la suite utilisées dans le modèle cinématique pour synthétiser la prédiction du vecteur de l'erreur volumétrique. De cette manière, il est possible d'évaluer la procédure de la modélisation prédictive en comparant les composantes volumétriques mesurées [E_{MX} , E_{MY} , E_{MZ}] avec les composantes prédites [E_{PX} , E_{PY} , E_{PZ}] à différents cycles thermiques. Les résultats issus de ces comparaisons montrent une corrélation significative entre la température moyenne de la machine et l'erreur volumétrique. Lorsque la température moyenne passe de 20°C à 26°C, l'erreur volumétrique globale varie de près de 10 μm . Ces variations ne sont cependant pas uniformes dans toutes les directions. Ces variations représentent 5, 7 et 2 μm dans les directions X, Y et Z respectivement. Les figures 4.7, 4.8 et 4.9 illustrent à titre d'exemple les profils des composantes de l'erreur volumétrique mesurée, prédites ainsi que la différence entre les deux sous forme d'erreurs résiduelles dans les plans XY, YZ et XZ pour un cycle thermique caractérisé par une température moyenne d'environ 26°C. Ces figures permettent de percevoir la nature de la distribution des erreurs dans l'espace de travail et de saisir comment chaque composante de l'erreur volumétrique agit le long de chaque axe de la machine. Ces profils peuvent facilement être visuellement comparés à ceux illustrés dans les figures 3.7, 3.8 et 3.9 obtenus lors d'un cycle thermique caractérisé par une température moyenne entre 20 et 20.5°C. La figure 4.10 illustre graphiquement, à titre d'exemple, la contribution de la variation de la température dans l'évolution des composantes volumétriques de l'erreur.

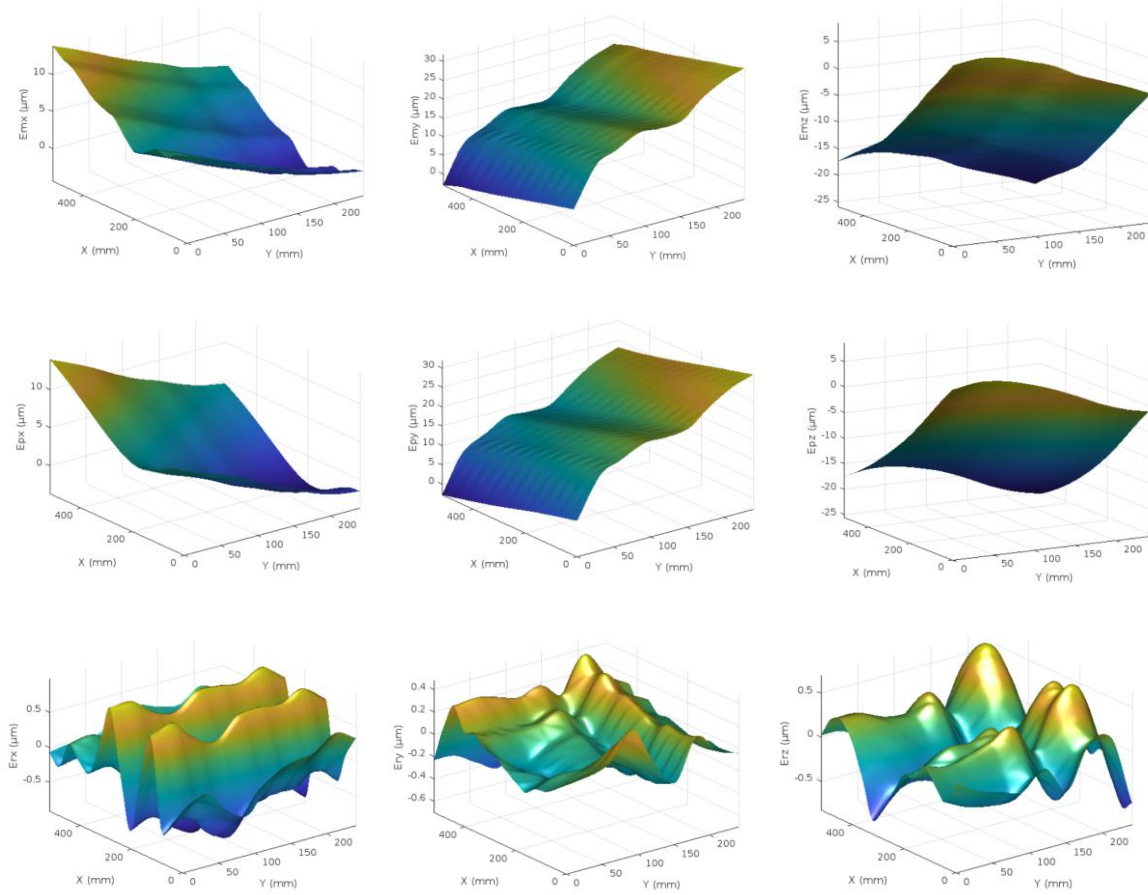


Figure 4.7 : Composantes de l'erreur volumétrique mesurées, prédites et résiduelles à 26°C dans le plan XY

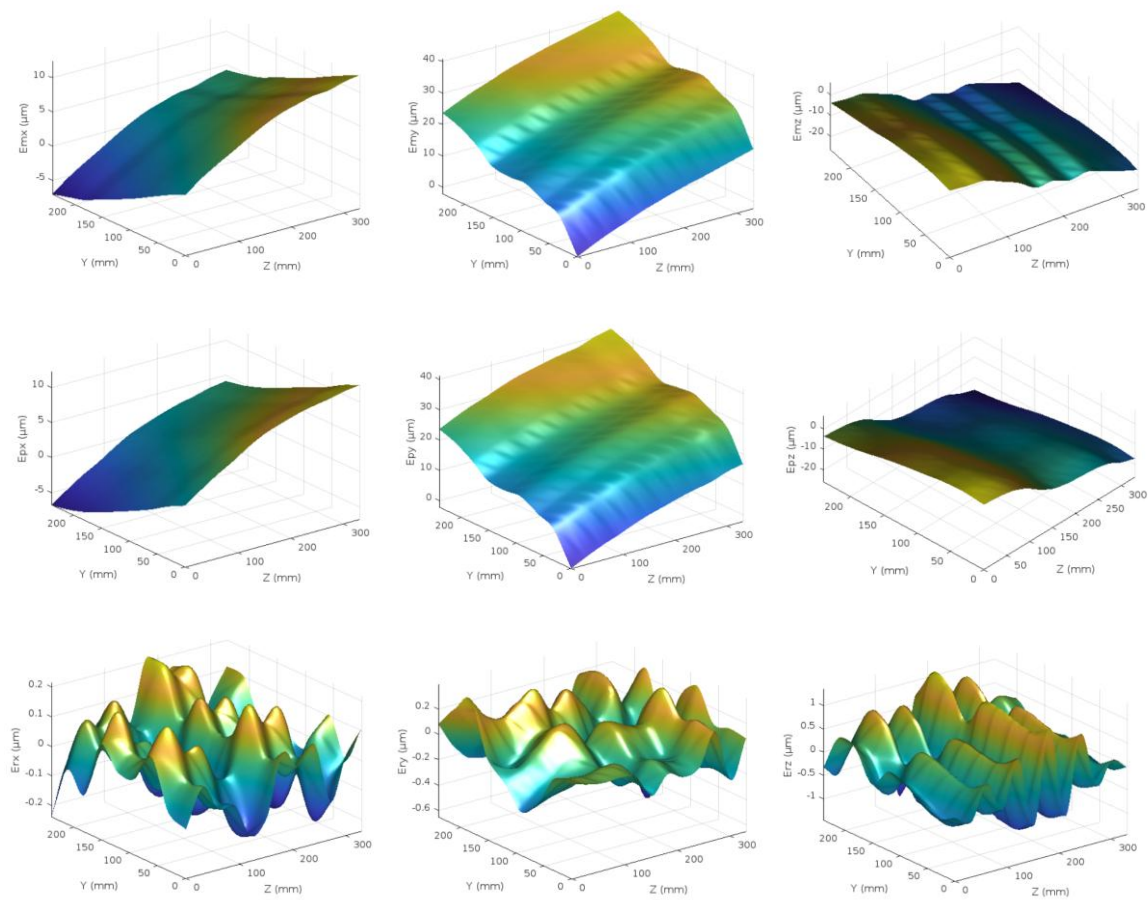


Figure 4.8 : Composantes de l'erreur volumétrique mesurées, prédites et résiduelles à 26°C dans le plan YZ

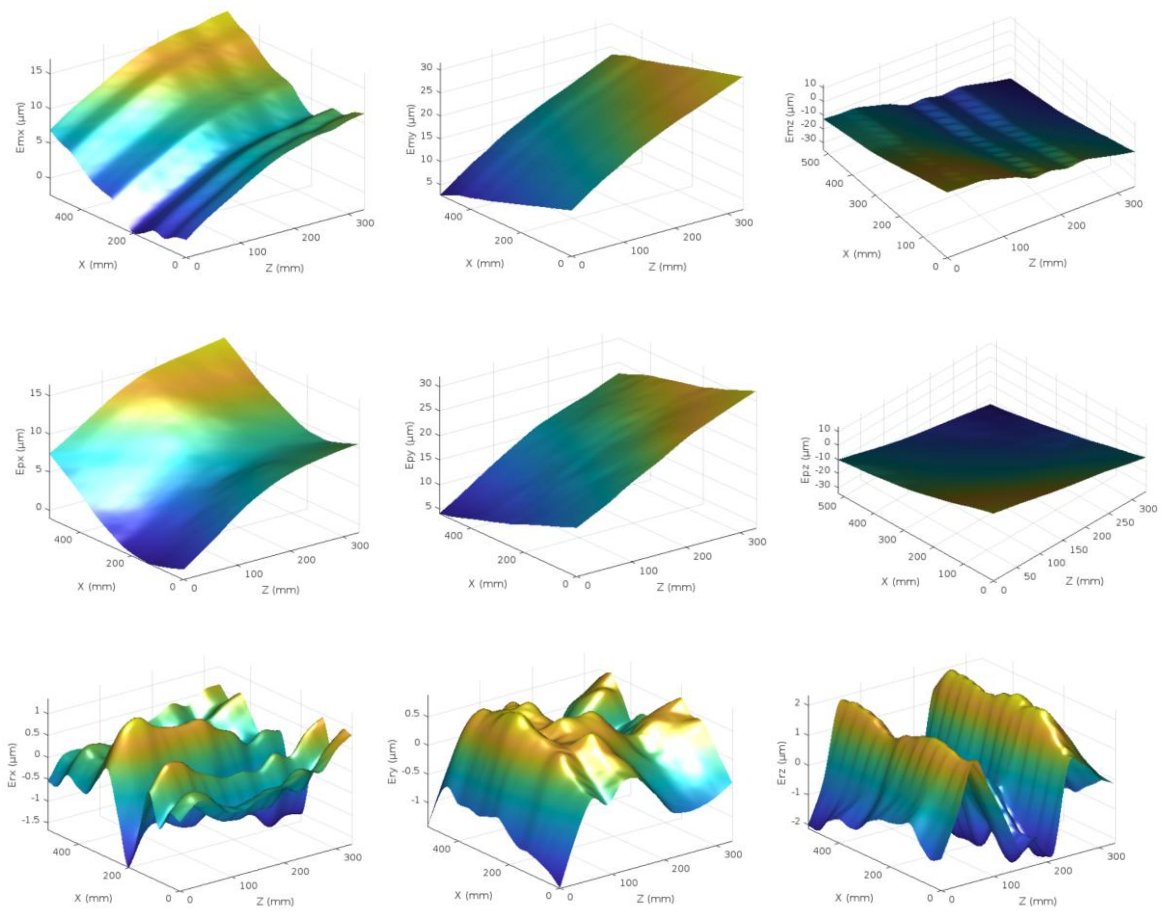


Figure 4.9 : Composantes de l'erreur volumétrique mesurées, prédites et résiduelles à 26°C dans le plan XZ

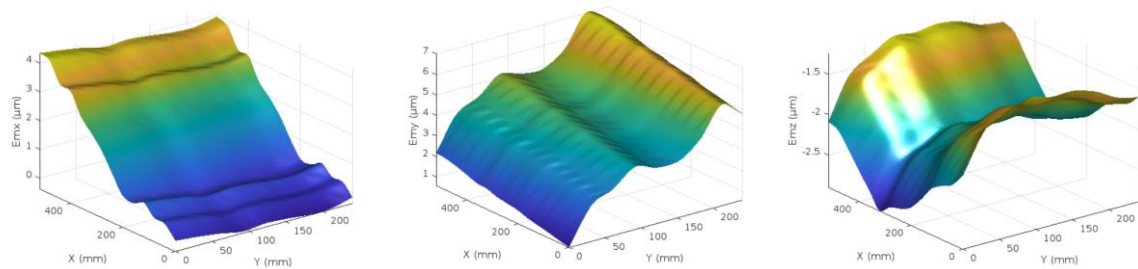


Figure 4.10 : Variations des composantes de l'erreur à la suite de la variation de la température moyenne de 20 à 26°C dans le plan XY

Le modèle démontre sa capacité, en termes de précision et de robustesse, à produire des prédictions fiables des composantes de l'erreur volumétrique en combinant les effets géométriques et thermiques et peu importe le cycle thermique et quelle que soient les positions dans l'espace de travail. Les erreurs résiduelles restent globalement faibles, ne dépassant pas 2 μm pour une erreur volumétrique maximale de 42 μm , ce qui représente moins de 5%.

La forme des surfaces générées par les erreurs résiduelles atteste également de la justesse du modèle. La nature homogène et quasi-aléatoire de ces surfaces signifie que le modèle parvient à prendre en charge l'essentiel des effets des erreurs mesurées. Quelques variations localisées sont présentes, mais leurs amplitudes restent limitées et sans impact significatif sur la qualité du modèle.

Une autre manière d'exploiter la comparaison entre les composantes de l'erreur volumétrique mesurées [E_{MX} , E_{MY} , E_{MZ}] et prédites [E_{PX} , E_{PY} , E_{PZ}] pour évaluer les performances du modèle prédictif consiste à comparer les erreurs résultantes des composantes des erreurs volumétriques mesurées (E_{MXYZ}) et prédites (E_{PXYZ}) obtenues à partir des équations suivantes :

$$E_{MXYZ} = \sqrt{E_{MX}^2 + E_{MY}^2 + E_{MZ}^2} \quad (4.4)$$

$$E_{PXYZ} = \sqrt{E_{PX}^2 + E_{PY}^2 + E_{PZ}^2} \quad (4.5)$$

Les figures 4.11 et 4.12 présentent quelques exemples de résultats qui découlent de deux séries de mesure réalisées à des températures moyennes de 20.8 et 25.85°C. Chacune de ces figures illustre la comparaison entre l'erreur résultante mesurée (E_{MXYZ}) et l'erreur résultante prédite (E_{PXYZ}) ainsi que la différence entre les deux sous forme d'erreur résiduelle le long des diagonales XY, YZ et XZ.

Ces comparaisons montrent que le modèle prédictif est capable de répondre adéquatement à la fois à la distribution spatiale des erreurs et à l'évolution de cette distribution en fonction du statut thermique de la machine. Dans tous les cas les erreurs

restent à l'intérieur d'un intervalle de 2 μm . Des tests statistiques confirment ces résultats en montrant que l'erreur absolue moyenne en pourcentage reste inférieure à 5% et que le R^2 est supérieur à 99% quel que soit l'état thermique de la MO.

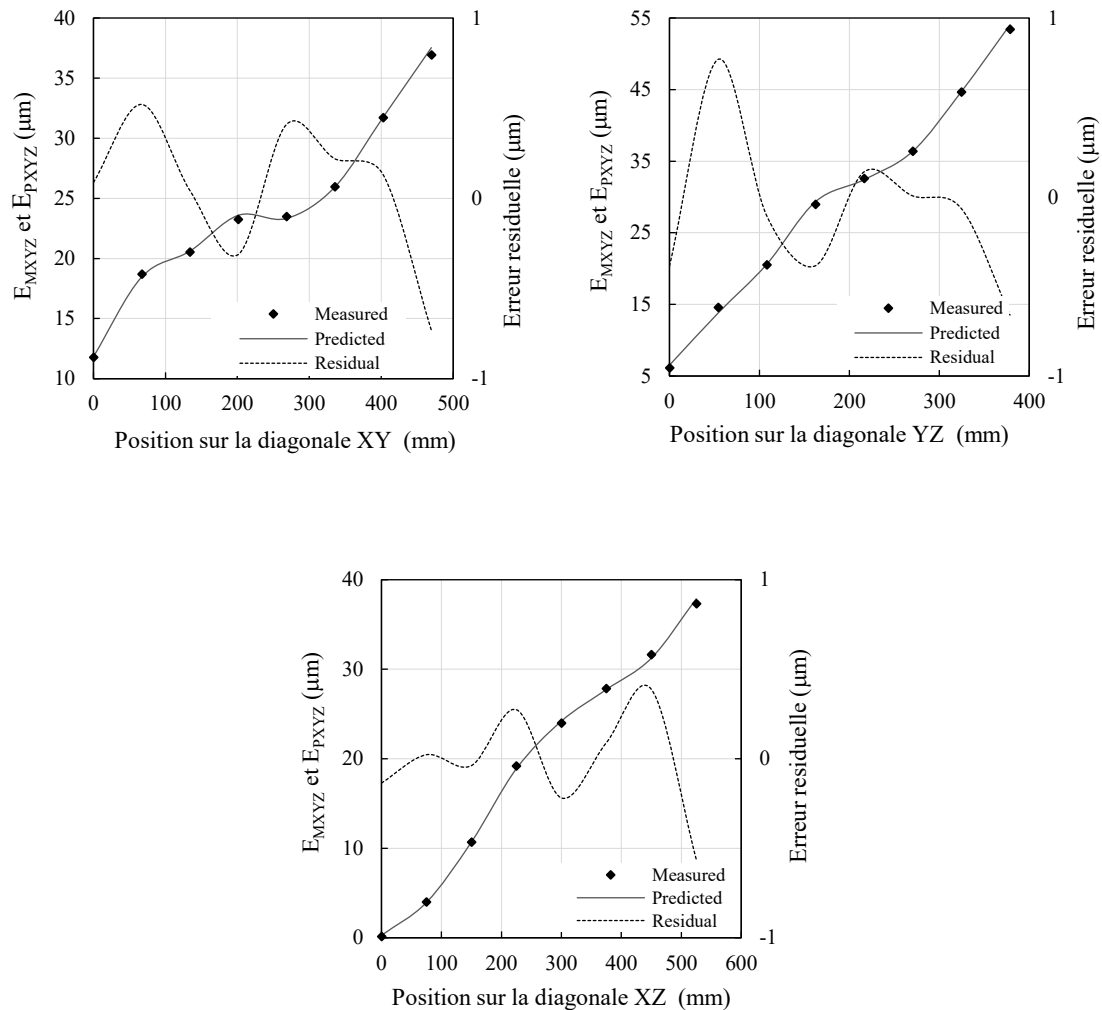


Figure 4.11 : Erreurs résultantes mesurées et prédites dans les plans XY, YZ et XZ à une température moyenne d'environ 20°C

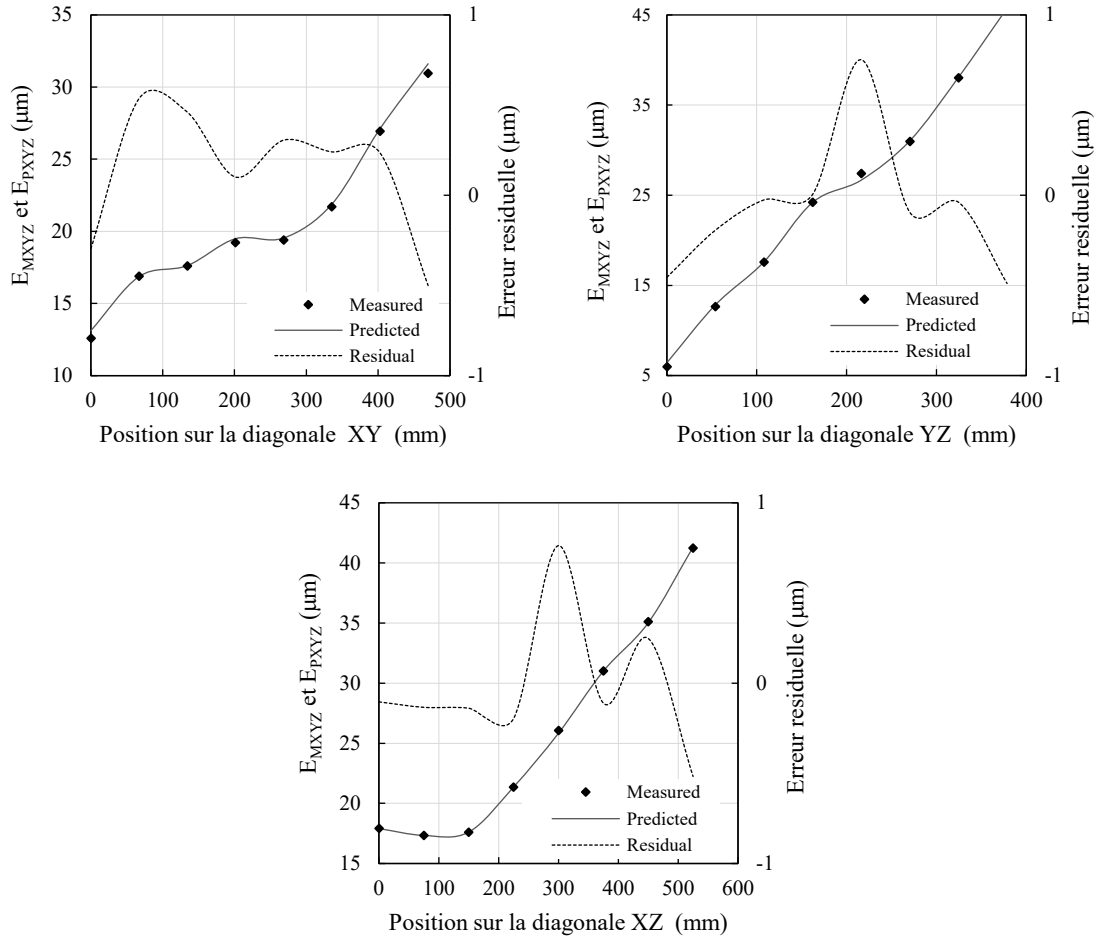


Figure 4.12 : Erreurs résultantes mesurées et prédites dans les plans XY, YZ et XZ à une température moyenne d'environ 26°C

CHAPITRE 5

ÉVALUATION DU MODÈLE ET COMPENSATION DES ERREURS

5.1 INTRODUCTION

Les évaluations réalisées sur le modèle géométrique et sur le modèle quasi-statique (géométrique et thermique) dans les chapitres précédents ont permis de déterminer de façon globale la précision typique que l'on peut obtenir avec ce type de modèles. Cependant, ces évaluations ne tiennent pas compte de toutes les caractéristiques du fonctionnement de la machine. Pour évaluer la capacité réelle de prédiction du modèle et déterminer l'amélioration potentielle ou effective de la précision de la machine, il est nécessaire de le tester dans des cas réels. En effet, sachant que les modèles neuroniques intermédiaires ont été établis en utilisant les erreurs élémentaires mesurées séparément le long de chaque axe, la procédure consiste à évaluer la capacité d'estimation du modèle dans le cas de la combinaison des mouvements sur l'ensemble des axes. Cette procédure représente ce que l'on peut qualifier de test de diagonale. Ce test consiste à programmer une trajectoire le long de chaque diagonale des plans XY, YZ et XZ dans des conditions thermiques spécifiques. Les composantes de l'erreur mesurées et prédites sont alors comparées pour évaluer l'approche de modélisation prédictive proposée. Ce chapitre présente les modalités de mise en œuvre de cette procédure de validation et d'évaluer son impact sur le processus de compensation.

5.2 PROCESSUS DE COMPENSATION

La compensation dynamique repose sur un ajustement en temps réel de la position afin de corriger les effets des erreurs géométriques. La dimension temps réel repose sur trois éléments clés : un réseau de capteurs alimentant constamment le modèle prédictif avec des données fiables et précises sur les trajectoires planifiées et sur le statut thermique de la machine, un modèle prédictif robuste et adapté à la tâche désirée et une interface de communication et de rétroaction et avec le système de commande numérique de la machine.

L'efficacité de la compensation dynamique repose sur l'interaction étroite entre les capteurs, le modèle prédictif et le système de contrôle. La figure 5.1 présente une représentation intégrée et simplifiée du processus de compensation.

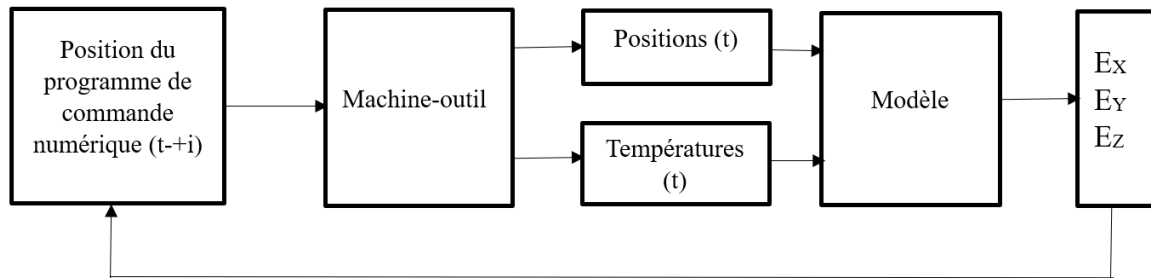


Figure 5.1 : Représentation simplifiée du processus de compensation des erreurs dans les MO.

5.3 SIMULATION DE TRAJECTOIRE ET APPLICATION DE LA COMPENSATION

Les trajectoires programmées ont été conçues de manière à intégrer les déplacements combinés d'au moins deux axes à la fois le long des diagonales des plans XY, YZ et XZ dans des conditions thermiques spécifiques. Les déviations entre les trajectoires idéales et les trajectoires réelles ont été évaluées en comparant les composantes des erreurs volumétriques mesurées $[E_{MX}, E_{MY}, E_{MZ}]$ et prédites $[E_{PX}, E_{PY}, E_{PZ}]$. Ces erreurs ont été synthétisées à partir des mesures des 21 erreurs élémentaires associées aux trois axes et des 5 erreurs liées à la broche, enregistrée sous les mêmes conditions géométriques et thermiques. Les mesures ont été effectuées à des intervalles réguliers de 60 mm sur l'axe X, 30 mm sur l'axe Y et 45 mm sur l'axe Z. Cela correspond à des distances diagonales de 67.10 mm dans le plan XY, 54.10 mm dans le plan YZ et 75 mm dans le plan XZ.

Pour s'assurer de la validité des conditions expérimentales, les mêmes cycles de mesure ont été répétés à trois reprises sur une période de mesure de 8 heures. Chaque cycle de mesure commence immédiatement après la mise en marche de la machine avec une température moyenne autour de 20°C.

Plusieurs critères statistiques ont été utilisés pour analyser et évaluer les performances prédictives du modèle. Cette évaluation quantitative a été basée sur quatre indicateurs statistiques éprouvés. Ces indicateurs sont la déviation moyenne absolue de l'erreur de prédiction (MAD), l'erreur absolue moyenne en pourcentage (MAPE), l'écart quadratique moyen de l'erreur de prédiction (MRSE) et le coefficient de détermination R^2 . Ces critères sont explicitement présentés ci-dessous par les équations 5.1 à 5.4.

$$MAD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (5.1)$$

$$MAPE = x100\% \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \quad (5.2)$$

$$MRSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (5.3)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (5.4)$$

Les résultats qui découlent de cette série de la procédure d'évaluation du modèle sont analysés et commentés selon deux perspectives. D'abord, le tableau 5.1 présente les indicateurs statistiques produits pour évaluer la qualité des prédictions pour les trois composantes de l'erreur volumétrique, le long des diagonales dans les plans XY, YZ et XZ et ce, selon deux cycles thermiques différents. Ces indicateurs montrent que le modèle prédictif présente d'excellentes performances. En effet, bien que les erreurs aient atteint 18, 44 et 50 μm dans les directions X, Y et Z respectivement, la déviation moyenne absolue (MAD) reste inférieure à 1 μm , MAPE demeure inférieure à 10% et RMSE est relativement faible, tandis que R^2 varie de 86 à 100% dépendamment de la composante d'erreur évaluée. Les prévisions sont légèrement meilleures quand la température est entre 20 et 20.5°C par rapport à une plage de température entre 25.5 et 26.5°C. Cela s'explique par le fait que la température n'augmente pas de façon uniforme dans toute la structure de la machine avec un impact inégal sur les erreurs le long des axes. Certaines erreurs augmentent avec l'augmentation de la

température alors que d'autres erreurs diminuent. Cependant, les prédictions restent très bonnes pour fournir une base fiable pour la compensation.

Tableau 5.1 : Performance des prédictions des composantes de l'erreur volumétrique

Températures	Critères	Composantes de l'erreur volumétrique le long des diagonales								
		XY			YZ			XZ		
		E _X	E _Y	E _Z	E _X	E _Y	E _Z	E _X	E _Y	E _Z
≈ 20°C	MAD	0.32	0.18	0.24	0.16	0.27	0.26	0.21	0.23	0.06
	MAPE (%)	8.98	2.01	4.96	4.11	2.37	3.62	5.27	2.16	1.87
	MRSE	0.47	0.21	0.37	0.26	0.34	0.35	0.35	0.30	0.09
	R ² (%)	94.79	99.96	99.88	93.09	99.96	99.93	99.70	99.57	99.99
≈ 26°C	MAD	0.28	0.18	0.26	0.31	0.26	0.30	0.24	0.17	0.29
	MAPE (%)	9.98	2.28	6.26	8.97	2.68	5.57	9.43	1.94	4.52
	MRSE	0.48	0.33	0.33	0.44	0.45	0.36	0.36	0.28	0.33
	R ² (%)	97.26	99.81	99.96	86.29	99.89	99.88	99.39	99.46	99.95

Les figures 5.2, 5.3 et 5.4 présentent une autre facette de la performance du modèle prédictif quand il est utilisé dans le processus de compensation. L'exemple présenté dans ces graphiques concerne les résultats d'une compensation réalisée à une température moyenne d'environ 24°C le long des diagonales dans les plans XY, YZ et XZ. Chaque graphique présente le niveau des erreurs avant et après la compensation. Les résultats montrent qu'en moyenne, plus de 80% des erreurs ont été compensées sans difficulté. Plus précisément, lorsque le vecteur de compensation est appliqué, les composantes de l'erreur volumétrique sont contrôlées à $\pm 1 \mu\text{m}$.

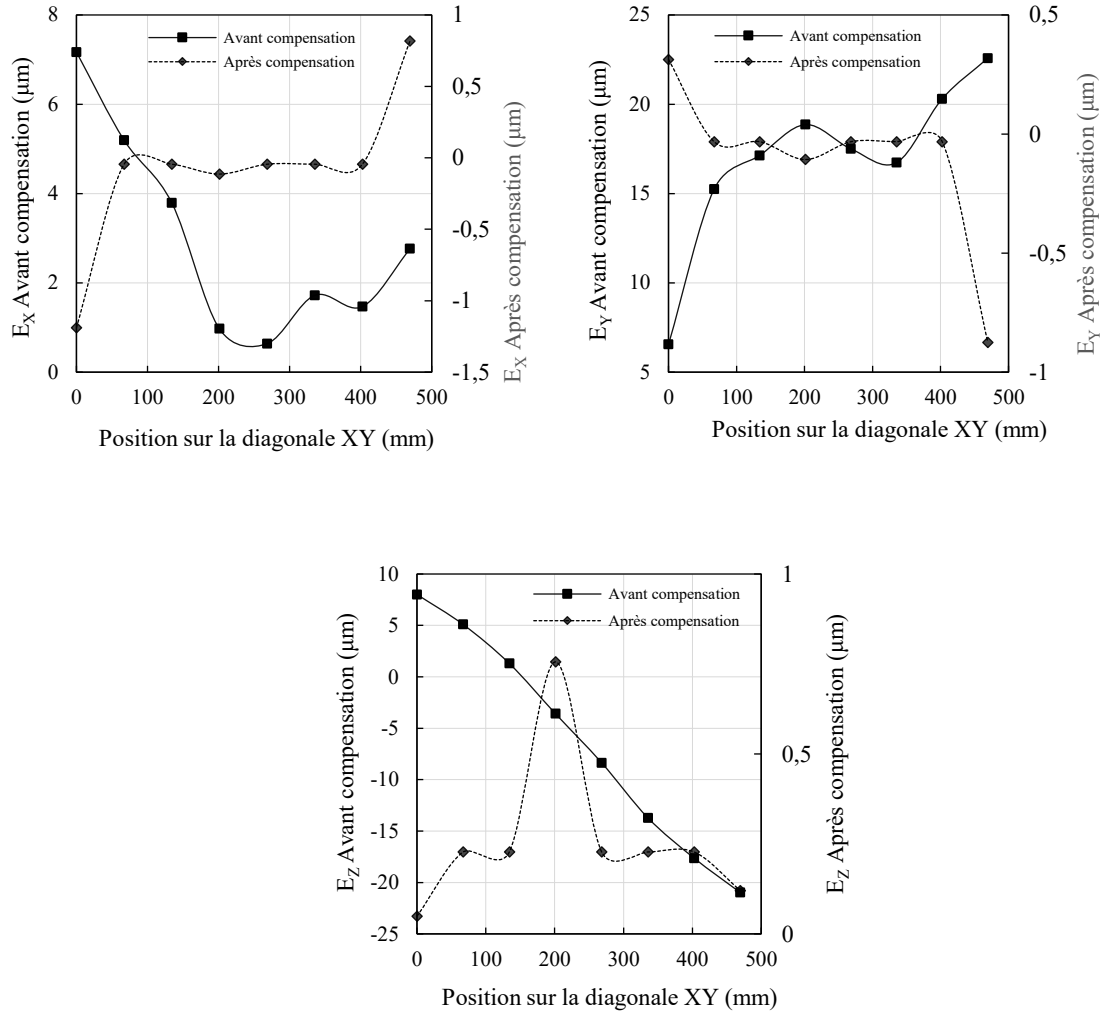


Figure 5.2 : Composantes de l'erreur volumétrique avant et après compensation dans le plan XY à une température moyenne d'environ 24°C.

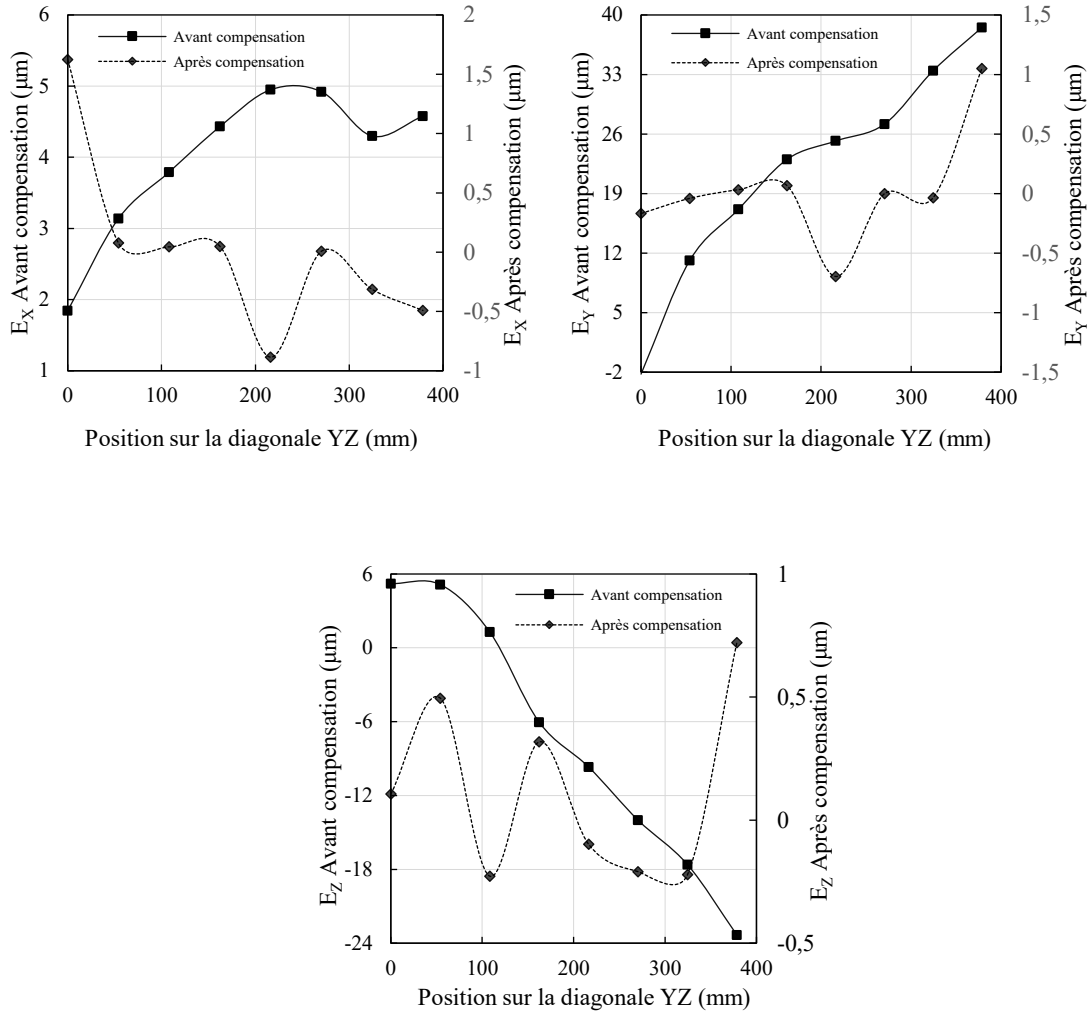


Figure 5.3 : Composantes de l'erreur volumétrique avant et après compensation dans le plan YZ à une température moyenne d'environ 24°C.

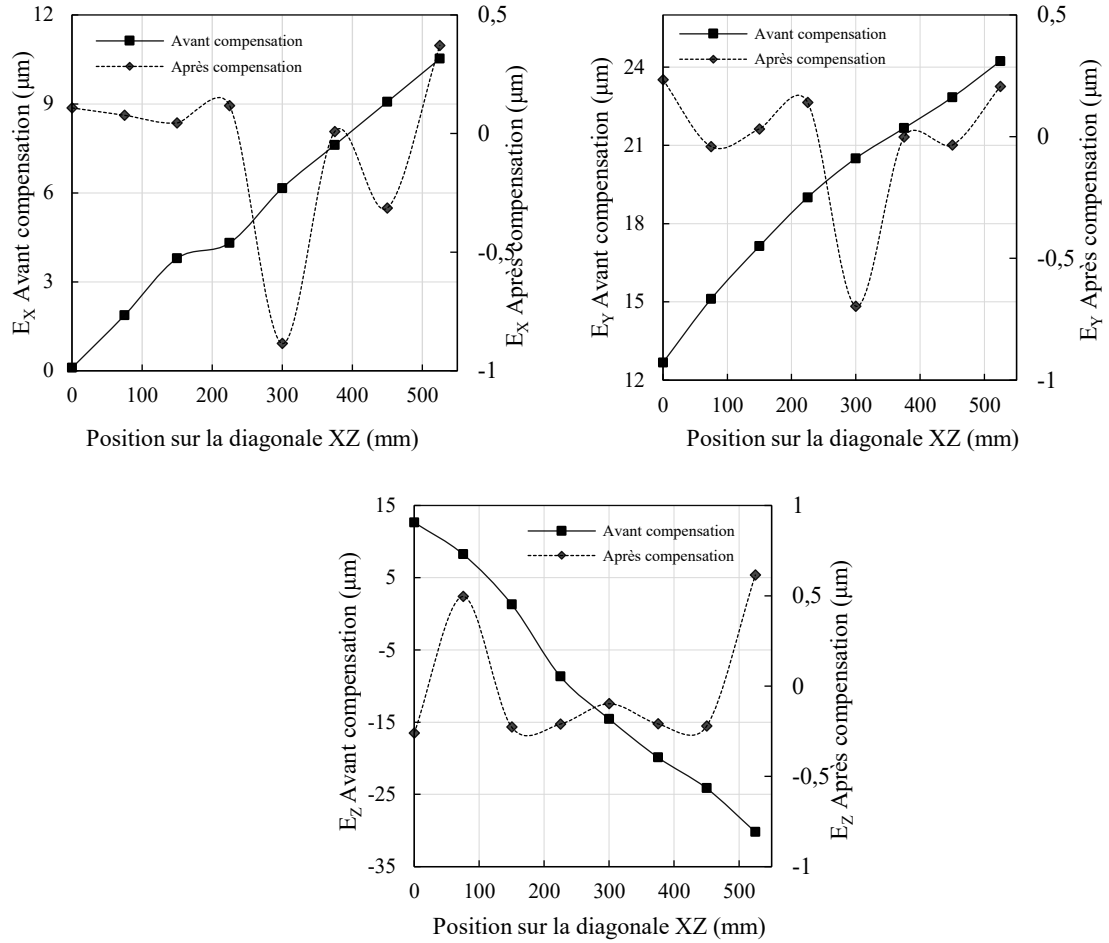


Figure 5.4 : Composantes de l'erreur volumétrique avant et après compensation dans le plan XZ à une température moyenne d'environ 24°C.

5.4 OBSERVATIONS

L'approche de modélisation prédictive présentée dans cette thèse introduit une nouvelle architecture de modélisation hybride qui intègre les erreurs géométriques et les erreurs thermiques en combinant réseaux de neurones pour la prédiction des composantes élémentaires des erreurs et matrices de transformation homogène pour l'intégration volumétrique des erreurs. Cette approche répond aux limitations des modèles de compensation des erreurs dans les MO constatées de longue date qui se concentraient

traditionnellement sur les domaines géométrique ou thermique, mais pas nécessairement les deux en même temps. Bien que des études récentes ont proposé des stratégies avancées de compensation thermique, ces modèles se limitent généralement à la prédiction d'erreurs thermiques, sans tenir compte ni de la synthèse volumétrique ni de l'adaptabilité des modèles prédictifs aux applications en temps réel.

Le modèle proposé dans cette thèse fournit une solution entièrement intégrée qui compense simultanément les erreurs géométriques et thermiques, permettant une correction d'erreur volumétrique en temps réel. Ce modèle a permis d'obtenir des performances remarquables en termes d'amélioration de la précision en réduisant l'erreur volumétrique d'au moins 80% avec une déviation moyenne absolue en pourcentage inférieure à 5% et ce, sous des cycles thermiques variés. Ces niveaux de précision sont supérieurs à ceux rapportés dans la littérature, ce qui démontre la justesse et la robustesse de l'approche proposée. De plus, la sélection structurée de la configuration d'un réseau de capteurs a énormément aidé à améliorer la qualité du modèle par une meilleure sensibilité des données tout en réduisant la complexité du système. L'utilisation des réseaux de neurones dans une structure modulaire a permis le déploiement du modèle de manière structuré et évolutif.

Globalement, ce travail apporte une contribution importante au domaine de la précision des MO et les fait évoluer vers des systèmes d'usinage fiables et intelligents en proposant un processus de compensation d'erreur validée, adapté et évolutif. Il comble l'écart entre les modèles géométriques et les modèles thermiques en ouvrant des perspectives nouvelles pour l'amélioration de la précision volumétrique et la compensation d'erreur en temps réel dans les MO pour l'usinage de haute précision.

Bien que le modèle proposé démontre une grande précision et une grande robustesse dans l'intégration de la compensation d'erreurs géométriques et thermiques, certaines limites subsistent. La version actuelle du modèle est adaptée à une configuration de trois axes et ne peut être appliquée à des systèmes d'usinage à cinq axes ou à plusieurs têtes, où le couplage cinématique et les sources d'erreurs de rotation deviennent plus importants. De plus, les erreurs dynamiques, telles que celles induites par les vibrations, les accélérations, les effets

inertiels n'ont pas été considérées. La prise en compte de leurs influences reste une piste ouverte à l'investigation. Enfin, des recherches plus approfondies sur des stratégies de fusion de capteurs et de données impliquant erreurs géométriques, erreurs thermiques, erreurs dynamiques et effet du procédé pourraient améliorer davantage le processus de compensation en temps réel.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objet de cette thèse consiste à remédier à quelques-unes des limitations des modèles prédictifs utilisés comme support pour la compensation des erreurs dans les MO, constatées depuis plusieurs années. Puisque ces modèles ont souvent été orientés vers la prédiction des erreurs soit géométriques soit thermiques, mais pas nécessairement les deux en même temps, et ce sans tenir compte ni de la synthèse volumétrique des erreurs ni de l'adaptabilité des modèles prédictifs aux applications en temps réel. La présente thèse a nourri l'ambition de développer une approche de modélisation prédictive des erreurs quasi-statiques dans les MO pour une compensation dynamique. L'approche proposée introduit une nouvelle architecture de modélisation hybride qui intègre les erreurs géométriques et les erreurs thermiques dans le même modèle en combinant l'utilisation des réseaux de neurones pour la prédiction des composantes élémentaires des erreurs avec la cinématique des corps et les matrices de transformation homogène pour l'intégration et la synthèse volumétrique des erreurs.

Le processus de développement du modèle prédictif commence par une investigation numérique afin de mettre en relief et d'évaluer les relations de cause à effet entre la cartographie thermique et les profils de déformations et de déplacement dans la structure de la machine et d'identifier les variables susceptibles de faire partie des entrées dans le modèle. Des efforts exhaustifs de modélisation numérique, d'expérimentation et de simulation ont été conduits pour réaliser une analyse thermomécanique de la structure de la MO sous des conditions thermiques diversifiées. L'intensité des sources de chaleur et les distorsions thermiques induites dans les composants de la machine ont été utilisées pour évaluer la distribution de température et les caractéristiques des erreurs thermiques ainsi que leurs effets sur la précision des déplacements le long des axes de la machine. Un plan d'expériences structuré, combiné à des outils d'analyse statistique éprouvés, a été utilisé pour valider les performances du modèle numérique 3D de la MO. Les mesures ont été réalisées en utilisant un réseau de 16 capteurs de température, une caméra thermique et un laser interféromètre. Cette validation a révélé que le modèle numérique est capable d'estimer la distribution de température dans la MO avec précision. L'erreur maximale ne dépassant pas 10% est

confirmée par un coefficient de détermination dépassant 95%. Les erreurs maximales ont été observées en début de cycle de chauffage, car la stabilisation thermique dans la MO se produit relativement lentement. Lorsque le modèle numérique est utilisé pour estimer les erreurs thermiques en fonction de la température et du temps sur une période de 2 à 4 heures, les erreurs maximales d'estimation varient entre 5 à 10% selon les axes et l'intensité des sources de chaleur.

Le modèle numérique validé a par la suite été utilisé pour mener une analyse thermomécanique transitoire unifiée de l'ensemble de la MO sous des conditions de fonctionnement constantes, progressives ou aléatoires. Les résultats de ces simulations ont permis de diviser le champ de température en plusieurs régions et d'évaluer les indices d'intensité de corrélation entre les températures et les erreurs thermiques dans ces régions. Ces actions ont permis de déterminer de manière structurée les meilleurs emplacements possibles pour les capteurs de mesure de température et d'identifier l'ensemble des variables à prendre en compte dans une éventuelle modélisation prédictive des erreurs. Pour évaluer la pertinence des points de mesure proposés, une série d'expériences a été menée afin de produire des données pour établir des modèles simplifiés pour estimer quelques erreurs thermiques en fonction des températures mesurées. Ces modèles préliminaires ont montré que les points de mesure sélectionnés sont appropriés.

En se basant sur ces résultats et sur la cinématique des corps rigides et les matrices de transformation homogène, un modèle cinématique a été élaboré pour offrir un formalisme conceptuel structuré pour l'intégration des erreurs élémentaires, qu'elles soient de nature géométrique ou thermique dans le but de les synthétiser sous forme de composantes volumétriques. Pour mieux préparer la modélisation prédictive à venir, des modèles préliminaires ont été développés pour comparer deux options d'intégration et synthèse des erreurs. La première repose sur une approche basée sur les erreurs élémentaires et la seconde basée sur les composantes volumétriques. La première s'est révélée largement supérieure à la seconde en termes de réduction de l'erreur de modélisation avec 5% et 12% respectivement.

L'exploitation de ce modèle nécessite la mesure des différentes composantes de l'erreur dans des conditions thermiques variées afin de refléter les conditions réelles du fonctionnement de la machine. Les mesures ont été regroupées en trois catégories : les erreurs de positionnement le long des axes mesurés à l'aide d'un laser interféromètre, les dérives thermiques de la broche mesurées en utilisant la traditionnelle méthode des cinq capteurs de déplacement sans contact, et la distribution de température par un réseau de 11 thermistors.

En se basant sur les données produites à l'aide des différentes mesures, la phase suivante a été consacrée à la modélisation prédictive des erreurs quasi-statiques. Dans cette phase, quatre modèles à base de réseau de neurones ont été développés en utilisant les mesures de température obtenues à partir des 11 capteurs et des 26 erreurs géométriques et thermiques. Trois modèles spécifiquement pour la prédiction des erreurs géométriques et thermiques le long des trois axes et un modèle pour la prédiction des erreurs thermiques le long de la broche. Les quatre modèles ont permis de prédire n'importe quelle erreur avec une précision acceptable (moins de 5% d'erreur), peu importe la position dans l'espace de travail et les conditions thermiques de la machine. Les prédictions obtenues sont par la suite utilisées pour alimenter le modèle cinématique et produire les composantes volumétriques de l'erreur quasi-statique. Le modèle démontre sa capacité, en termes de précision et de robustesse. Les erreurs résiduelles restent globalement faibles, ne dépassant pas 2 μm pour une erreur volumétrique maximale de 42 μm , ce qui représente moins de 5%.

Finalement, une procédure d'évaluation du modèle prédictif a été conduite pour s'assurer de ses performances et pour évaluer son impact sur le processus de compensation. Cette évaluation a été réalisée selon des trajectoires et des cycles thermiques variés en utilisant plusieurs indicateurs statistiques. Les résultats montrent que le modèle prédictif présente d'excellentes performances. Bien que les erreurs aient atteint 18, 44 et 50 μm dans les directions X, Y et Z respectivement, la déviation moyenne absolue reste inférieure à 1 μm , tandis que R^2 varie de 86 à 100% dépendamment de la composante d'erreur évaluée. Ces performances sont réalisées dans une plage de température variant entre 20 et 26,5°C. Les résultats montrent également qu'en moyenne, plus de 80% des erreurs ont été compensées

sans difficulté. Plus précisément, lorsque le vecteur de compensation est appliqué, les composantes de l'erreur volumétrique sont contrôlées à $\pm 1 \mu\text{m}$.

Néanmoins, certaines limites doivent être reconnues. Le modèle proposé est actuellement adapté à des erreurs quasi-statiques et n'intègre pas encore les erreurs dynamiques, telles que les vibrations ou les perturbations liées aux servomoteurs. Le modèle est également conçu pour des configurations de trois axes orthogonaux, ce qui nécessite des ajustements pour être appliqué à d'autres configurations. De plus, bien qu'adaptables, les modèles à base de réseaux de neurones nécessitent des données bien structurées obtenues dans des conditions contrôlées pour leurs apprentissages, cela peut limiter leur adaptation dans des environnements industriels incertains. Les travaux pourraient étendre ce modèle aux erreurs dynamiques, intégrer la fusion de capteurs multi-sources et prévoir un apprentissage en continu des modèles pour améliorer leur capacité de généralisation.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Bryan, J. (1990). International status of thermal error research (1990). *CIRP annals*, 39(2), 645-656.
- [2] Zhang, Z., Jiang, F., Ming, L. U. O., Baohai, W. U., Zhang, D., & Kai, T. A. N. G. (2024). Geometric error measuring, modeling, and compensation for CNC machine tools: a review. *Chinese Journal of Aeronautics*, 37(2), 163-198.
- [3] Acero, R., Brosed, F. J., Pueo, M., Aguado, S., Aguilar, J. J., & Velazquez, J. (2024). Evaluation of a telescopic simultaneous ballbar in a 3-axis machine tool using a reference equipment. *Precision Engineering*.
- [4] Aguado, S., Santolaria, J., Aguilar, J., Samper, D., & Velazquez, J. (2015). Improving the accuracy of a machine tool with three linear axes using a laser tracker as measurement system. *Procedia engineering*, 132, 756-763.
- [5] Clément, A., Bourdet, P., & Weill, R. (1981). Commande adaptive dimensionnelle d'une machine à mesurer tridimensionnelle. *CIRP Annals*, 30(1), 429-432.
- [6] Makki, M., Lavernhe, S., Thiébaut, F., Tournier, C., & Lartigue, C. (2006, May). Identification de la géométrie de machines CN par mesure d'artefacts. In *1er Congrès International Francophone de Mécanique Avancée*.
- [7] Ouafi, A. E., Guillot, M., & Bedrouni, A. (2000). Accuracy enhancement of multi-axis CNC machines through on-line neurocompensation. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 11(6), 535-545.
- [8] Ramesh, R., Mannan, M. A., & Poo, A. N. (2000). Error compensation in machine tools—a review: part I: geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40(9), 1235-1256.
- [9] Raksiri, C., & Parnichkun, M. (2004). Geometric and force errors compensation in a 3-axis CNC milling machine. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(12-13), 1283-1291.
- [10] Rao, V. S., & Rao, P. V. M. (2006). Tool deflection compensation in peripheral milling of curved geometries. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(15), 2036-2043.

- [11] Chen, X. B., Geddam, A., & Yuan, Z. J. (1997). Accuracy improvement of three-axis CNC machining centers by quasi-static error compensation. *Journal of Manufacturing Systems*, 16(5), 323-336.
- [12] Brecher, C., Fey, M., Brockmann, B., & Chavan, P. (2018). Multivariable control of active vibration compensation modules of a portal milling machine. *Journal of vibration and control*, 24(1), 3-17.
- [13] Ballah, Y. (2018). Contribution à l'étude des déformations structurelles des machines-outils (Doctoral dissertation, Université Mohamed Boudiaf-M'sila).
- [14] DJAHEL, E., & ABBOU, A. (2021). Modélisation des erreurs de positionnement induites thermiquement d'une articulation prismatique d'une machine-outil à commande numérique (Doctoral dissertation, university of M'sila).
- [15] Tan, B., Mao, X., Liu, H., Li, B., He, S., Peng, F., & Yin, L. (2014). A thermal error model for large machine tools that considers environmental thermal hysteresis effects. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 82, 11-20.
- [16] Li, Y., Dai, Y., Gao, Y., Tao, X. et Wang, G. (2022) Review on Thermal Error Suppression and Modeling Compensation Methods of High-Speed Motorized Spindle. *Recent Patents on Engineering*, 17, Article ID : e080622205713.
- [17] Kim, S. K., & Cho, D. W. (1997). Real-time estimation of temperature distribution in a ball-screw system. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 37(4), 451-464.
- [18] Kim, K. D., & Chung, S. C. (2004). Synthesis of the 3D artefact for quick identification of thermal errors in machine tools. *International journal of production research*, 42(6), 1167-1187.
- [19] Zhu, J., Ni, J., & Shih, A. J. (2008). Robust machine tool thermal error modeling through thermal mode concept. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 130(6).
- [20] Liu, K., Liu, H., Li, T., Liu, Y., & Wang, Y. (2019). Intelligentization of machine tools: comprehensive thermal error compensation of machine-workpiece system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102(9), 3865-3877.
- [21] Takabi, J., & Khonsari, M. M. (2013). Experimental testing and thermal analysis of ball bearings. *Tribology international*, 60, 93-103.

- [22] dos Santos, M. O., Batalha, G. F., Bordinassi, E. C., & Miori, G. F. (2018). Numerical and experimental modeling of thermal errors in a five-axis CNC machining center. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96(5), 2619-2642.
- [23] Xu, Z. Z., Liu, X. J., Kim, H. K., Shin, J. H., & Lyu, S. K. (2011). Thermal error forecast and performance evaluation for an air-cooling ball screw system. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51(7-8), 605-611.
- [24] Verl, A., & Frey, S. (2010). Correlation between feed velocity and preloading in ball screw drives. *CIRP annals*, 59(1), 429-432.
- [25] Jang, S. H., Khim, G., & Park, C. H. (2017). Estimation of friction heat in a linear motion bearing using Box–Behnken design. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89(5), 2021-2029.
- [26] Ramesh, R., Mannan, M. A., & Poo, A. N. (2000). Error compensation in machine tools—a review: part I: geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40(9), 1235-1256.
- [27] Veldhuis, S. C., & Elbestawi, M. A. (1995). A strategy for the compensation of errors in five-axis machining. *CIRP annals*, 44(1), 373-377.
- [28] Abdulshahed, A. M., Longstaff, A. P., Fletcher, S., & Myers, A. (2015). Thermal error modelling of machine tools based on ANFIS with fuzzy c-means clustering using a thermal imaging camera. *Applied Mathematical Modelling*, 39(7), 1837-1852.
- [29] Abdulshahed, A. M., Longstaff, A. P., & Fletcher, S. (2015). The application of ANFIS prediction models for thermal error compensation on CNC machine tools. *Applied soft computing*, 27, 158-168.
- [30] Abdulshahed, A.M., Longstaff, A.P., Fletcher, S. et Potdar, A. (2016) Thermal Error Modelling of a Gantry-Type 5-Axis Machine Tool Using a Grey Neural Network Model. *Journal of Manufacturing Systems*, 41, 130-142.
- [31] Li, J. W., Zhang, W. J., Yang, G. S., Tu, S. D., & Chen, X. B. (2009). Thermal-error modeling for complex physical systems: the-state-of-arts review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 42, 168-179.

- [32] Li, Y., Zhao, W., Lan, S., Ni, J., Wu, W., & Lu, B. (2015). A review on spindle thermal error compensation in machine tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 95, 20-38.
- [33] Li, Y., Yu, M., Bai, Y., Hou, Z., & Wu, W. (2021). A review of thermal error modeling methods for machine tools. *Applied Sciences*, 11(11), 5216.
- [34] Fan, K., Yang, J., & Yang, L. (2013). Orthogonal polynomials based thermally induced spindle and geometric error modeling and compensation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 65, 1791-1800.
- [35] Zhang, T., Ye, W., & Shan, Y. (2016). Application of sliced inverse regression with fuzzy clustering for thermal error modeling of CNC machine tool. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 85, 2761-2771.
- [36] Liu, H., Miao, E. M., Wei, X. Y., & Zhuang, X. D. (2017). Robust modeling method for thermal error of CNC machine tools based on ridge regression algorithm. *International journal of machine tools and manufacture*, 113, 35-48.
- [37] Wei, X., Ye, H., Miao, E., & Pan, Q. (2022). Thermal error modeling and compensation based on Gaussian process regression for CNC machine tools. *Precision Engineering*, 77, 65-76.
- [38] Li, D., Feng, P., Zhang, J., Wu, Z., & Yu, D. (2014). Calculation method of convective heat transfer coefficients for thermal simulation of a spindle system based on RBF neural network. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70, 1445-1454.
- [39] Zhang, Y., Yang, J. et Jiang, H. (2012). Machine tool thermal error modeling and prediction by grey neural network. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 59, 1065- 1072.
- [40] Yin, Q., Tan, F., Chen, H., & Yin, G. (2019). Spindle thermal error modeling based on selective ensemble BP neural networks. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 101, 1699-1713.
- [41] Shi, H., Jiang, C., Yan, Z., Tao, T., & Mei, X. (2020). Bayesian neural network–based thermal error modeling of feed drive system of CNC machine tool. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 108, 3031-3044.
- [42] Meireles, M. R., Almeida, P. E., & Simões, M. G. (2003). A comprehensive review for industrial applicability of artificial neural networks. *IEEE transactions on industrial electronics*, 50(3), 585-601.

- [43] Huang, S. H., & Zhang, H. C. (1994). Artificial neural networks in manufacturing: concepts, applications, and perspectives. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part A*, 17(2), 212-228.
- [44] Wang, H., Wang, L., Li, T., & Han, J. (2013). Thermal sensor selection for the thermal error modeling of machine tool based on the fuzzy clustering method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69, 121-126.
- [45] Li, Q., & Li, H. (2019). A general method for thermal error measurement and modeling in CNC machine tools' spindle. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103, 2739-2749.
- [46] Mason, R. L. Gunst, R. F. & Hess, J. L. (2003). *Statistical Design and Analysis of Experiments: With Applications to Engineering and Science*. John Wiley & Sons.
- [47] Box, G. E. P., Hunter, W. G. & Hunter, J. S. (1978). *Statistics for experimenters: An introduction to design, data analysis, and model building*. John Wiley & Sons.
- [48] Miao, E., Liu, Y., Liu, H., Gao, Z., & Li, W. (2015). Study on the effects of changes in temperature-sensitive points on thermal error compensation model for CNC machine tool. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 97, 50-59.
- [49] Hey, J., Sing, T. C., & Liang, T. J. (2017). Sensor selection method to accurately model the thermal error in a spindle motor. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(7), 2925-2931.
- [50] Li, Z., Li, G., Xu, K., Tang, X., & Dong, X. (2021). Temperature sensitive point selection and thermal error modeling of spindle based on synthetical temperature information. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 113, 1029-1043.
- [51] Li, Y., Zhao, J., Ji, S., & Liang, F. (2019). The selection of temperature-sensitivity points based on K-harmonic means clustering and thermal positioning error modeling of machine tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100, 2333-2348.
- [52] Kiss, A. K., & Bachrathy, D. (2022). Bifurcations analysis in implicit maps through the dynamics of cumulated surface errors in milling. *Nonlinear Dynamics*, 1-14.

- [53] Eskandari, S., Arezoo, B., & Abdullah, A. (2013). Positional, geometrical, and thermal errors compensation by tool path modification using three methods of regression, neural networks, and fuzzy logic. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 65, 1635-1649.
- [54] Hou, R., Yan, Z., Du, H., Chen, T., Tao, T., & Mei, X. (2018). The application of multi-objective genetic algorithm in the modeling of thermal error of NC lathe. *Procedia CIRP*, 67, 332-337.
- [55] Xiang, S., Lu, H., & Yang, J. (2015). Thermal error prediction method for spindles in machine tools based on a hybrid model. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 229(1), 130-140.
- [56] Gao, X., Guo, Y., Hanson, D. A., Liu, Z., Wang, M., & Zan, T. (2021). Thermal error prediction of ball screws based on PSO LSTM. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 116(5), 1721-1735.
- [57] Liu, P., Yao, X., Ge, G., Du, Z., Feng, X., & Yang, J. (2021). A dynamic linearization modeling of thermally induced error based on data-driven control for CNC machine tools. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 22, 241-258.
- [58] Yang, Y., Du, Z., Feng, X., & Yang, J. (2021). Real-time thermal modelling approach of a machine tool spindle based on bond graph method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 113(1), 99-115.
- [59] Haitao, Z., Jianguo, Y., & Jinhua, S. (2007). Simulation of thermal behavior of a CNC machine tool spindle. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(6), 1003-1010.
- [60] Liu, J., Ma, C., Wang, S., Wang, S., Yang, B., & Shi, H. (2019). Thermal-structure interaction characteristics of a high-speed spindle-bearing system. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 137, 42-57.
- [61] Ma, F., Li, Z., Qiu, S., Wu, B., & An, Q. (2016). Transient thermal analysis of grease-lubricated spherical roller bearings. *Tribology International*, 93, 115-123.
- [62] Harris, T. A. (2007). *Rolling bearing analysis*.

- [63] Mao, X., Mao, K., Wang, F., Yan, B., & Lei, S. (2018). A convective heat transfer coefficient algorithm for thermal analysis of machine tools considering a temperature change. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 99(5), 1877-1889.
- [64] Cheng, D. J., Yang, W. S., Park, J. H., Park, T. J., Kim, S. J., Kim, G. H., & Park, C. H. (2014). Friction experiment of linear motion roller guide THK SRG25. *International journal of precision engineering and manufacturing*, 15(3), 545-551.
- [65] ISO 230-3. (2007). Test code for machine tools part 3: determination of thermal effects. (International Organisation for Standardization).
- [66] Liu, Y., Lu, Y., Gao, D., & Hao, Z. (2013). Thermally induced volumetric error modeling based on thermal drift and its compensation in Z-axis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69(9), 2735-2745.
- [67] Echerfaoui, Y., El Ouafi, A., & Chebak, A. (2017). Laser interferometer based measurement for positioning error compensation in cartesian multi-axis systems. *Journal of Analytical Sciences, Methods and Instrumentation*, 7(3), 75-92.
- [68] ISO 230-1: 2012 Code d'essai des machines-outils — Partie 1: Exactitude géométrique des machines fonctionnant à vide ou dans des conditions quasi-statiques.
- [69] Viprey, F., Lavernhe, S., Tournier, C., & Nouira, H. (2015, March). Modélisation géométrique des machines-outils 5 axes pour la compensation de l'exactitude volumétrique. In 14eme colloque national AIP Primeca.
- [70] AZZOUZ, S. (2021). Étude de la relation entre les écarts angulaires et les écarts de rectitudes d'un axe prismatique d'une machine-outil à commande numérique (Doctoral dissertation, university of M'sila).
- [71] Ni, J. (1997). CNC machine accuracy enhancement through real-time error compensation.
- [72] Liu, Q., Guo, H., Ma, Y., Tian, W., Zhang, Z., & Li, B. (2022). Real-time error compensation of a 5-axis machining robot using externally mounted encoder systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 120(3), 2793-2802.
- [73] Ni, J., & Wu, S. M. (1993). An on-line measurement technique for machine volumetric error compensation.

- [74] Postlethwaite, S. R., & Ford, D. G. (1970). A practical system for 5-axis volumetric compensation. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, 23.
- [75] Echerfaoui, Y., El Ouafi, A., & Sattarpanah Karganroudi, S. (2022). Dynamic errors compensation of high-speed coordinate measuring machines using ANN-based predictive modeling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 122(5), 2745-2759.
- [76] Wang, C. (2000). Laser vector measurement technique for the determination and compensation of volumetric positioning errors. Part I: Basic theory. *Review of scientific instruments*, 71(10), 3933-3937.
- [77] Turek, P., Kwaśny, W., & Jędrzejewski, J. (2010). Zaawansowane metody identyfikacji błędów obrabiarek. *Inżynieria Maszyn*, 15, 7-37.
- [78] Maconachie, T., Leary, M., Zhang, J., Medvedev, A., Sarker, A., Ruan, D., ... & Brandt, M. (2020). Effect of build orientation on the quasi-static and dynamic response of SLM AlSi10Mg. *Materials Science and Engineering: A*, 788, 139445.
- [79] Brinksmeier, E., Cammett, J. T., König, W., Leskova, P., Peters, J., & Tönshoff, H. K. (1982). Residual stresses—measurement and causes in machining processes. *CIRP annals*, 31(2), 491-510.
- [80] Week, M., & Bibring, H. (1984). *Handbook of Machine Tools: Metrological Analysis and Performance Tests*, Vol. 4.
- [81] Zhang, J., Feng, P., Chen, C., Yu, D., & Wu, Z. (2013). A method for thermal performance modeling and simulation of machine tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 68(5), 1517-1527.
- [82] Liang, J. C., Li, H. F., Yuan, J. X., & Ni, J. (1997). A comprehensive error compensation system for correcting geometric, thermal, and cutting force-induced errors. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 13(10), 708-712.
- [83] Jędrzejewski, J., & Modrzycki, W. (1997). Intelligent supervision of thermal deformations in high precision machine tools. In *Proceedings of the Thirty-Second International Matador Conference* (pp. 457-462). Palgrave, London.
- [84] Mou, J., Donmez, M. A., & Cetinkunt, S. (1995). An adaptive error correction method using feature-based analysis techniques for machine performance improvement, Part 1: Theory derivation.

- [85] Fan, J. M., & XU LM, Z. X. (2005). Sensor placement strategy for thermal error compensation on machine tools. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 26(8), 83-84.
- [86] Vissiere, A., Noura, H., Damak, M., Gibaru, O., & David, J. M. (2012). A newly conceived cylinder measuring machine and methods that eliminate the spindle errors. *Measurement Science and Technology*, 23(9), 094015.
- [87] Tagne, S. C. T., Vissiere, A., Damak, M., Mehdi-Souzani, C., Anwer, N., Alzahrani, B. A. M., ... & Noura, H. (2022). An advanced Fourier-based separation method for spindle error motion identification. *Precision Engineering*, 74, 334-346.
- [88] Matezo-Ngoma, E., El Ouafi, A., & Chebak, A. (2024). Numerical Investigation of Thermal Behavior of CNC Machine Tool and Its Effects on Dimensional Accuracy of Machined Parts. *Journal of Software Engineering and Applications*, 17(8), 617-637.

INDEX

