



HAL
open science

Contrôle automatique non-invasif de la qualité des produits : Application au procédé d'injection-moulage des thermoplastiques

Pierre Nagorny

► **To cite this version:**

Pierre Nagorny. Contrôle automatique non-invasif de la qualité des produits : Application au procédé d'injection-moulage des thermoplastiques. Systèmes et contrôle [cs.SY]. Université Savoie Mont Blanc, 2020. Français. NNT : 2020CHAMA008 . tel-03181778

HAL Id: tel-03181778

<https://theses.hal.science/tel-03181778>

Submitted on 25 Mar 2021

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

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

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ SAVOIE MONT BLANC

Spécialité : **Sciences pour l'Ingénieur**

Arrêtée ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

Pierre Nagorny

Thèse dirigée par **Maurice Pillet**
et codirigée par **Éric Pairel**

préparée au sein du **Laboratoire SYMME**
dans **l'École Doctorale SISEO**

Contrôle automatique non-invasif de la qualité des produits

Application au procédé d'injection-moulage des
thermoplastiques

Thèse soutenue publiquement le **9 mars 2020**,
devant le jury composé de :

Gilles Régnier

Professeur des Universités, Arts et Métiers-ENSAM, Président

Christophe Cudel

Professeur des Universités, Université Haute-Alsace, Rapporteur

Fabrice Mériaudeau

Professeur des Universités, Université de Bourgogne, Rapporteur

Ronan Le Goff

Ingénieur de Recherche, Centre Technique IPC, Examineur

Maurice Pillet

Professeur des Universités, Université Savoie Mont Blanc, Directeur de thèse

Éric Pairel

Maître de conférences Habilité à Diriger les Recherches, Université Savoie Mont
Blanc, Co-Directeur de thèse

Émilio Vitale

Ingénieur Statisticien, Plastic Omnium Intelligent Exterior Systems, Invité

Remerciements

Ces quelques lignes seront insuffisantes pour remercier tous ceux qui doivent l'être. Le lecteur se devra d'effectuer une recherche bibliographique pour réunir la liste complète de ces personnes : co-auteurs, membres de groupements de travaux, doctorants de l'École Doctorale SISEO en 2017-2020, les étudiants de l'IUT d'Annecy et de l'école d'ingénieur Polytech Annecy qui ont été d'excellents cobayes.

Je souhaite remercier les professeurs Christophe Cudel et Fabrice Mériaudeau pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail et pour leurs commentaires détaillés qui ont permis d'améliorer ce manuscrit. Merci au professeur Gilles Régner d'avoir accepté de présider le jury ; ainsi qu'à messieurs Ronan Le Goff, Emilio Vitale pour leurs présences le jour J et leurs aides pour la réalisation des essais expérimentaux industriels, indispensable pour avancer dans mon travail.

Je remercie particulièrement Éric Pairel et Maurice Pillet pour :

- la direction idéale de ces travaux de recherche,
- leur soutien humain infaillible,
- le partage de leurs expériences académique, professorale et de recherche.

Le financement de ce travail et son accomplissement, n'aurait pu être obtenu sans leur persévérance. Je remercie BPI France et de manière générale l'effort de la France pour le financement de la Recherche. Merci aux Bibliothèques Universitaires pour leur travail de préservation des ouvrages de références, et à tous les sites de l'Internet qui rendent accessibles une vaste connaissance librement, *HAL*, *arXiv*, *Science-Hub* qui ont rendus possible l'étude bibliographique.

Cette ligne me permet de remercier efficacement l'ensemble des membres du laboratoire SYMME d'Annecy-Le Bourget-du-Lac pour la bonne ambiance qu'ils entretiennent. Je garde un excellent souvenir de tous les fructueux échanges qui m'ont permis d'approfondir ou de faire germer des idées. Merci aux chercheurs, ingénieurs, administratifs et aux doctorants pour avoir égayés tous ces moments ; en particulier mon voisin de bureau Orlando ; le couloir du haut : Amandine, Florian, Jérémy, Koki, Luc, Marine, Mathias, Mickaël, Thomas, Thomas, Thomas ; le couloir du bas : Amélie, Aurélien, Christian, Ludovic, Mathias, Thibault ; les voisines de l'IREGE / label RES : Camille, Caroline, Olga ; les voisins du Bourget, Jean, Marie ; et pour la fabrication additive Blaise et Hugues.

Coté famille, je dois d'énormes mercis à mes grands-parents, mes parents modèles —Monique et Fred—, la merveilleuse Margot et un joyeux enfant qui a égayé la rédaction de ce manuscrit.

Enfin, merci à vous, lecteurs, qui faites vivre ce manuscrit. J'espère qu'il vous permettra d'obtenir des réponses ou qu'il saura créer de nombreuses interrogations, tout en vous divertissant, avant de vous endormir.

Dédicace

À ma généreuse famille, pour tout le soutien reçu, qui m'a permis de mener à bien ce travail.

CHANSON AIGRE-DOUCE

J'ai huit ans et je vais à l'école.

Un cochin m'attend une comptine!

Je ne comprends pas ce que ça veut dire. Mais après tout AM-STRAM-GRAM, ça ne veut rien dire non plus. Alors...

Il paraît aussi qu'au loin, tout là-bas, il fait un sacré orage. Je ne comprends pas non plus. Il fait si beau, ici.

LEBLÉSMOUTI
LABISCOUTI
OUILEBLÉSMOU
LABISCOU

c'est l'orage dehors au loin mais dans l'étable je suis bien silence obscurité chaleur

Papa et maman sont restés sous l'orage, là-bas, au loin. Moi, je suis ici, à la campagne. Il fait si beau.

Les poules du père Coudray sont marrantes. Ses lapins sont chouettes. (parce que j'habite chez le père Coudray).

Et la chèvre est tellement sympa que je lui chante ma comptine.

LEBLÉSMOUTI
LABISCOUTI
OUILEBLÉSMOU
LABISCOU

c'est l'orage dehors au loin mais dans l'étable je suis bien silence obscurité chaleur

Aujourd'hui, le père Coudray m'a dit qu'il ne fallait plus que j'aille à l'école. A cause de l'orage.

Aujourd'hui, la mère Coudray m'a dit qu'il fallait que j'aille garder la chèvre. Parce que je n'allais plus à l'école.

Et pourtant, il fait toujours aussi beau. Bah, après tout, aller à l'école ou garder la chèvre, hein...

LEBLÉSMOUTI
LABISCOUTI
OUILEBLÉSMOU
LABISCOU

c'est l'orage dehors au loin mais dans l'étable je suis bien silence obscurité chaleur

Dans l'étable il n'y a pas de bruit. Il fait noir. Il fait bien chaud. Je m'assois dans la paille, à côté de la chèvre.

Je lui chante ma comptine. Elle semble assez l'aimer. Elle a un long bêlement discret et admiratif.

Je lui caresse le museau. Et doucement, elle m'embrasse au creux de la main.

LEBLÉSMOUTI
LABISCOUTI
OUILEBLÉSMOU
LABISCOU

c'est l'orage dehors au loin mais dans l'étable je suis bien silence obscurité chaleur

C'était en l'an de grâce 1944. L'orage a duré longtemps, mais moi, douilletement niché au fond d'une étable, bien au chaud et caressant un museau de chèvre, je m'en fichais bien.

Aujourd'hui, en l'an de grâce 1969, j'ai enfin compris la comptine. Ça voulait dire :

LE BLÉ SE MOLID-IL ?
L'HABIT SE COULD-IL ?
OUI, LE BLÉ SE MOLID,
L'HABIT SE COULD.

J'ai également compris l'orage.

En l'an de grâce 1977, ma fille aura à son tour huit ans. J'espère alors qu'il n'y aura pas d'orage.

Pour qu'elle puisse avoir, de son enfance, autre chose qu'une comptine, autre chose qu'un museau de chèvre, tiède et humide, dans le creux d'une paume, au fond d'une étable obscure, comme souvenir à se mettre sous la dent.

.. en l'an de grâce 2004, quand elle aura 35 ans.

© Gotlib / Dargaud¹

Mes grands-parents ont connu l'orage.
En 2000, j'avais huit ans, il n'y avait pas d'orage chez moi. Je suis allé à l'école.
En 2027, ma fille aura à son tour huit ans. J'espère qu'il n'y aura pas d'orage.

1. Extrait de deux planches de Marcel Gotlib, publiées en Novembre 1969 dans le N°525 de l'hebdomadaire Pilote, puis dans la Rubrique-à-Brac Taume 2, publiée aux éditions Dargaud.

Table des matières

Remerciements & Dédicace	i
Épigraphe	iii
Table des matières	v
Introduction	1
1 Contexte industriel et problématique de recherche	5
1.1 Le procédé d'injection-moulage des thermoplastiques	6
1.1.1 Paramètres réglables d'une presse à injecter	8
1.2 La qualité d'un produit en injection-moulage des thermoplastiques	10
1.3 Revue de la recherche académique sur le procédé d'injection-moulage	12
1.3.1 Cartographie bibliographique	12
1.3.2 Modélisation du procédé d'injection-moulage	13
1.3.3 Maîtrise du procédé d'injection-moulage des thermoplastiques	17
1.4 Problématique industrielle : le contrôle qualité en ligne de production	19
1.4.1 Viabilité économique du déploiement du mesurage de la qualité en ligne de production	19
1.4.2 Mesurage des variables d'état du procédé : mesurage indirect des caractéristiques du produit	20
1.4.3 Mesurage direct des caractéristiques du produit	21
1.4.4 Cahier des charges pour le contrôle de la qualité en ligne de production	26
1.4.5 Proposition d'une définition du degré d'invasivité d'un système de mesure pour un procédé	28
1.4.6 Étude technico-économique du mesurage des caractéristiques du produit	29
1.4.7 Formalisation de la notion de qualité d'une pièce	30
1.5 Conclusion : la problématique du contrôle de la qualité en ligne de production	31
2 Apport de l'imagerie non-conventionnelle pour la mesure non-invasive de la qualité	33
2.1 Contexte de l'essai expérimental	34
2.1.1 Exploration du procédé par plan d'expériences	34
2.1.2 Sélection des paramètres de l'étude expérimentale	35
2.2 Évolution des pièces moulées après la sortie du moule	37
2.3 Apport de la thermographie pour le contrôle de la géométrie des pièces	39
2.3.1 Essai expérimental de thermographie des pièces en sortie du moule	39
2.3.2 Extraction de la géométrie à partir de l'image thermique	41
2.4 Apport de la polarimétrie pour le contrôle des défauts d'aspect	45
2.4.1 Polarimétrie pour mettre en valeur les défauts des pièces plastiques	45
2.4.2 Conception d'un capteur polarimétrique bas-coût	46
2.4.3 Apport de la polarimétrie sur les performances d'un classifieur de la qualité	50
2.5 Traitement et fusion de l'information issue de mesures multimodales	53
2.5.1 Nécessité de l'extraction de l'information pertinente	53

2.5.2	Traitement d'images amont	54
2.5.3	Descripteurs statistiques	54
2.5.4	Sélection automatique de descripteurs pertinents	59
2.5.5	Description d'images par apprentissage statistique	60
2.6	Synthèse et perspectives	61
2.6.1	Synthèse : la mesure non-invasive en cycle industrielle	61
2.6.2	Perspectives de recherche	61
3	Modélisation de la notion de qualité par apprentissage	66
3.1	Construction d'un jeu de données représentatif	68
3.1.1	Exploration humaine en cycle de production	68
3.1.2	Réglage automatique du procédé pour la création d'un jeu de données	68
3.1.3	Annotation humaine du jeu de données en contexte industriel	69
3.1.4	Conclusion : transmission de l'expertise humaine en condition industrielle	74
3.2	Construction d'une métrique de la qualité par apprentissage	76
3.2.1	Apprentissage statistique supervisé	76
3.2.2	Apprentissage par transfert de domaine	80
3.2.3	Apprentissage semi-supervisé	81
3.2.4	Apprentissage non-supervisé	88
3.3	Optimisation automatique des hyper-paramètres d'un modèle	105
3.3.1	Optimisation par recherche aléatoire	106
3.3.2	Optimisation par méta-modèle bayésien	106
3.3.3	Méthodes de réduction du coût d'évaluation du méta-modèle	109
3.3.4	Optimisation par algorithmes bandits	110
3.3.5	Optimisation par algorithmes évolutionnistes	111
3.3.6	Optimisation de l'architecture de réseaux de neurones profonds	111
3.4	Conclusion : modélisation par apprentissage pour l'industrie	113
4	Système de contrôle de la qualité par apprentissage à partir de l'imagerie non-conventionnelle	117
4.1	Description du système de contrôle de la qualité proposé	118
4.1.1	Dispositif d'acquisition d'images polarimétriques et thermiques en ligne de production	118
4.1.2	Solution logicielle d'analyse d'image pour inférer la qualité	120
4.2	Validation expérimentale : applications industrielles	127
4.2.1	Essai "boîte noire" au Centre Techniques IPC	127
4.2.2	Essai "plaques" confidentiel	131
4.2.3	Discussions et limites du système proposé	131
4.3	Conclusion	132
4.4	Perspectives	132
	Conclusion générale	134
	Bibliographie	137
	Table des figures	159
	Liste des tableaux	163
	Annexes	165

A	Maîtrise du procédé d'injection-moulage des thermoplastiques	165
A.1	Réglage initial du point de fonctionnement	167
A.1.1	Apport des systèmes experts	168
A.2	Régulation du point de fonctionnement	168
A.2.1	Utilisation de l'automatique	169
A.2.2	Apport du contrôle adaptatif	170
A.2.3	Apport de la modélisation par réseaux de neurones	171
A.3	Détection de situations hors-contrôles	171
A.3.1	Analyse en Composante Principale	172
A.3.2	Maîtrise Statistique des Procédés	172
A.4	Pilotage des caractéristiques de la pièce produite	173
A.4.1	Ajustement du procédé à partir de caractéristiques prédites	174
A.4.2	Ajustement à partir des caractéristiques mesurées sur le produit	175
B	Étude technico-économique du mesurage des caractéristiques du produit	177
C	Économie du secteur de la plasturgie française	178
D	Plan d'expériences	179
E	Apprentissage statistique	182
E.1	Métrique de performances d'un classifieur	182
E.1.1	Justesse équilibrée	183
E.1.2	Matrice de confusion	183
E.1.3	Précision et rappel	183
E.1.4	F-mesure	183
E.1.5	Courbe ROC	184
E.1.6	Validation croisée pour la comparaison des performances de classifieurs	185
E.2	Apprentissage statistique traditionnel	186
E.2.1	Machine à vecteurs de support	186
E.2.2	K-plus-proches voisins	187
E.2.3	Bagging	188
E.2.4	Forêt d'arbres décisionnels	188
E.2.5	Boosting	189
E.2.6	Réseaux de neurones	189
F	Réseau de convolution profond, Deep Learning	191
F.1	Historique	191
F.2	Réseaux de convolutions résiduels	192
F.3	Fonctions d'activations	193
F.4	Méthodes de régularisation pour limiter le sur-apprentissage	195
F.4.1	Dropout	195
F.4.2	Normalisation de lots	195
F.4.3	Arrêt prématuré de l'apprentissage	196
F.4.4	Réduction de dimensions par interpolation	196
F.4.5	Pénalisation sur les poids	198
F.4.6	Augmentation artificielle du jeu de données	198
G	Résultats de l'extraction de la géométrie d'une pièce à partir de son image thermique	200
H	Confidentiel - Essai "plaques"	201
H.1	Essai "plaques" confidentiel	201

Introduction

Ce travail de doctorat s'inscrit dans le projet de recherche collaborative FUI² SAPRISTI³ du 21^{ème} appel à projet FUI Régions.⁴ L'obtention d'une chaîne de fabrication compétitive passe par l'optimisation du procédé de production. Le projet FUI SAPRISTI s'intéresse en particulier au procédé d'injection-moulage des thermoplastiques dans le secteur automobile. C'est pourquoi il est labellisé par trois pôles de compétitivité :

- [Plastipolis](#),
- [iDforCAR](#),
- [Mont-Blanc Industries](#).

Le consortium FUI SAPRISTI est constitué de laboratoires académiques, d'industriels transformateurs et du Centre Technique français de la plasturgie IPC. Ainsi, les partenaires du consortium SAPRISTI sont :

- [Acystème](#), développeur et intégrateur de solutions en automatique et traitement de l'information,
- Le [Centre Technique IPC](#), acteur européen en développement et recherche pour le secteur de la plasturgie,
- Le [laboratoire LaMCoS](#) de l'[INSA de Lyon](#), expert de la modélisation du procédé d'injection-moulage des thermoplastiques,
- [Plastic Omnium](#), équipementier automobile mondial
- [Renault](#), automobiliste concepteur et équipementier,
- [SISE](#), acteur européen de la régulation des procédés en plasturgie, dont notamment le contrôle de l'injection séquentiel,
- Le [laboratoire SYMME](#)⁵ de l'[Université Savoie Mont Blanc](#), expert en réglage automatique et en optimisation de procédés industriels, dans le cadre de son axe de recherche sur la [Qualité industrielle](#).

L'injection-moulage des thermoplastiques est un procédé de production bas-coût et haut-volume. C'est un procédé particulièrement intéressant car il permet d'obtenir avec un temps de cycles courts des pièces de toutes dimensions aux géométries complexes ; qui sont très proches du produit final. Le marché de la plasturgie représente en France 3500 entreprises pour 30,2 Milliards de Chiffre d'Affaires en 2018⁶. Dans ce contexte, l'enjeu du projet FUI SAPRISTI est triple :

- Déterminer des indicateurs pertinents à mettre sous contrôle.

2. FUI : Fond Unique Interministériel

3. SAPRISTI : Système Autocorrectif pour la PRoduction zéro défaut de pièces pLaSTIques

4. [Résultats du 21^{ème} appel à projets FUI sur competitivite.gouv.fr](#) : 60 projets bénéficieront d'une aide de l'État de 43 Millions d'Euros ainsi que d'une aide des collectivités territoriales et des fonds communautaires (FEDER) de 37,8 Millions d'Euros.

5. SYMME : SYstèmes et Matériaux pour la MÉcatronique

6. Synthèse 2018 du secteur réalisée par la Fédération Française de la Plasturgie.

- Mieux comprendre les phénomènes physiques qui entrent en jeu dans le procédé, afin de modéliser le procédé en prenant en compte les indicateurs sélectionnés.
- Optimiser le procédé à partir de la modélisation et des indicateurs, afin de produire une qualité optimale.

Ce travail de doctorat s'inscrit dans ce projet. L'objectif à long terme du FUI SAPRISTI est de mettre sous contrôle le procédé, afin de maximiser la qualité de la production.

Nous avons choisi de mettre en place un moyen de contrôle des caractéristiques des pièces en ligne de production. D'autres approches réalisent des mesurages sur le procédé plutôt que sur le produit. C'est pourquoi nous avons orienté nos travaux vers la conception d'un moyen de mesure automatique de la qualité des produits, en ligne de production.

Dans le cas de l'injection-moulage des thermoplastiques, aucun système de mesure de la qualité ne répond actuellement aux exigences des partenaires du FUI SAPRISTI ; en particulier avec les contraintes techniques issues de l'intégration de la mesure de la qualité en ligne de production. Des échanges avec les partenaires du FUI SAPRISTI nous ont permis de prendre en compte les limites que posent le procédé industriel. Nous avons identifié trois verrous au déploiement massif du contrôle qualité à cent pourcent dès la sortie de la machine :

- économique : pour être déployé sur chaque machine le coût du système doit être faible,
- technologique : respect de la durée du cycle, peu invasif pour le procédé de production et capable d'extraire l'information sur la qualité des produits à partir des mesures,
- humain : capable de modéliser la perception qualité de l'expert humain.

Nous évaluerons et chercherons à résoudre chacun de ces verrous afin de proposer un moyen de mesure industriellement viable.

Afin d'identifier les variables du procédé qui sont susceptibles de contenir une information sur la qualité du produit, nous avons réalisé une étude de la littérature. De nombreuses variables ont été étudiées depuis 1975. La pratique industrielle actuelle propose d'utiliser des mesurages intégrés dans l'outillage. L'intégration des capteurs nécessaire à ces mesures est invasive, puisqu'il est nécessaire de modifier les outillages. C'est à dire que le travail d'ingénierie nécessaire à la conception de l'outillage en intégrant les capteurs est coûteux. De plus, l'instrumentation des capteurs est fragile et leur maintenance nécessite un arrêt prolongé de la production, puisque c'est l'outillage complet qui doit être expertisé. Afin de lever les verrous économiques et technologiques qui limitent le déploiement du contrôle qualité, nous n'avons pas retenu la mesure invasive dans nos travaux. Cela permet de limiter la complexité de la mise en place des dispositifs de mesure. C'est pourquoi nous avons défini le périmètre de notre recherche au contrôle non-invasif pour le procédé industriel, de la qualité des produits.

L'expérimentation occupe une part importante de nos travaux. Dans un premier temps, cela nous a permis de comprendre le procédé et la pratique industrielle. Dans un second temps, nous avons étudié l'utilisation de moyens de mesurages issus de l'imagerie non-conventionnelle : scanner laser, thermographie, polarimétrie, ainsi que de mesures intégrées dans l'outillage que nous n'avons pas retenu. L'imagerie non-conventionnelle permet d'acquérir des informations que l'œil humain ne peut percevoir. Nous nous appuyons sur l'expérimentation et la mesure pour construire nos modèles. Dans le cas où l'on dispose d'un grand nombre de cas d'étude, cette démarche est particulièrement adaptée à l'utilisation de l'apprentissage statistique pour modéliser les phénomènes.

À partir des résultats des mesures, il s'agit de concevoir un système capable de discerner les pièces conformes, des pièces non-conformes. Nous orientons nos travaux dans l'utilisation de méthode d'apprentissage statistique. L'expert qualité humain transmet son savoir au système de mesure, qui réalise le contrôle de manière autonome.

Ces travaux de doctorat ont fait l'objet de communications en congrès scientifiques internationaux [NPP17b ; NPP17a ; Nag+17 ; Nag+18 ; Nag+19], ainsi que d'un colloque national [NPP17b].

Ce manuscrit est constitué de quatre chapitres qui peuvent être indépendamment parcourus. Le lecteur sera orienté au gré de sa lecture, vers les sections d'autres chapitres, lorsque des informations complémentaires pourront lui être utiles.

Le premier chapitre présente de manière détaillée le contexte industriel du travail de doctorat et les objectifs de recherche pour le déploiement du contrôle qualité dès la sortie de l'injection-moulage. Le second chapitre a pour objectifs de présenter les différentes technologies de métrologies existantes et de justifier notre choix d'utilisation de l'imagerie non-conventionnelle thermographique et polarimétrique à partir d'un essai expérimental. Le troisième chapitre propose d'étudier les méthodes de formalisation de la notion de qualité par apprentissage et de les évaluer sur notre cas d'application industriel. Nous présenterons les méthodes d'apprentissage supervisé et non-supervisé, ainsi que la démarche d'annotation d'un jeu de données d'apprentissage. Enfin, le quatrième chapitre détaille la conception d'un nouveau dispositif de mesure et réalise son évaluation sur deux cas d'applications industrielles.

En conclusion, un bilan concernant les travaux de ces trois années de doctorat sera dressé. Une discussion sera proposée concernant les nombreuses perspectives de recherche que nous avons identifiées.

1

Contexte industriel et problématique de recherche

Dans ce premier chapitre, nous présentons le contexte du procédé d'injection-moulage des thermoplastiques dans lequel s'inscrit nos travaux. Dans un premier temps, nous étudierons les problématiques de recherche de la littérature en injection-moulage. Dans un second temps, nous positionnerons notre travail sur la problématique du contrôle de la qualité géométrique et d'aspect en temps de cycle industriel.

Sommaire

1.1	Le procédé d'injection-moulage des thermoplastiques	6
1.1.1	Paramètres réglables d'une presse à injecter	8
1.2	La qualité d'un produit en injection-moulage des thermoplastiques	10
1.3	Revue de la recherche académique sur le procédé d'injection-moulage	12
1.3.1	Cartographie bibliographique	12
1.3.2	Modélisation du procédé d'injection-moulage	13
1.3.3	Maîtrise du procédé d'injection-moulage des thermoplastiques	17
1.4	Problématique industrielle : le contrôle qualité en ligne de production	19
1.4.1	Viabilité économique du déploiement du mesurage de la qualité en ligne de production	19
1.4.2	Mesurage des variables d'état du procédé : mesurage indirect des caractéristiques du produit	20
1.4.3	Mesurage direct des caractéristiques du produit	21
1.4.4	Cahier des charges pour le contrôle de la qualité en ligne de production	26
1.4.5	Proposition d'une définition du degré d'invasivité d'un système de mesure pour un procédé	28
1.4.6	Étude technico-économique du mesurage des caractéristiques du produit	29
1.4.7	Formalisation de la notion de qualité d'une pièce	30
1.5	Conclusion : la problématique du contrôle de la qualité en ligne de production	31

1.1 Le procédé d'injection-moulage des thermoplastiques

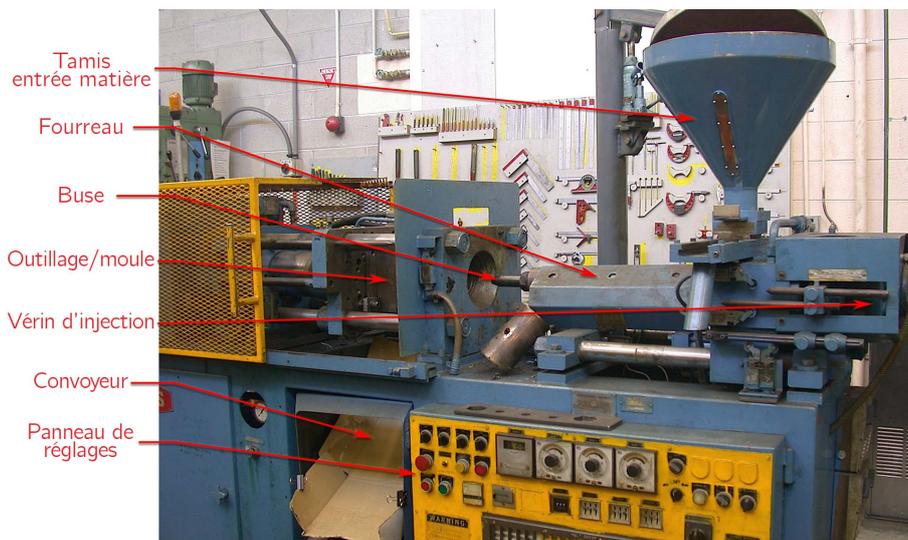


Figure 1.1 – Une presse à injecter. Photographie originale de [Glenn McKechnie](#) © by SA 2.5, [Wikimedia Commons](#).

La machine qui met en œuvre le procédé d'injection-moulage est la presse à injecter (voir la Figure 1.1). Un polymère est fondue dans un tube chauffé, appelé le fourreau. Le fourreau contient une vis pour malaxer la matière. Dans une presse à injecter, on distingue deux parties cinématiques indépendantes : la vis de dosage et l'outillage amovible. La rotation et l'avance de la vis sont régulées afin de définir les caractéristiques de la matière fondue qui sera injectée. En particulier, il s'agit d'homogénéiser la matière fondue afin qu'elle ait une certaine viscosité. L'avancée de la vis produit une pression sur la matière qui est également régulée : c'est la pression d'injection. Le procédé d'injection-moulage des thermoplastiques consiste à injecter sous une pression élevée, généralement supérieure à 100 MPa, le polymère fondu et visqueux dans un moule. La pression est maintenue pendant le refroidissement de la matière ; en particulier jusqu'à ce que le canal par lequel la matière est entrée dans le moule soit solidifié.

Cette phase de maintien permet de densifier la matière afin de compenser le retrait consécutif au refroidissement. Le passage de la phase d'injection à la phase de maintien est appelé la commutation (on parle couramment de "point de commutation"). La phase de maintien se termine avant le début de la phase d'injection. La phase de dosage, qui est réalisée pendant le moulage d'une pièce, conditionne les caractéristiques de la matière fondue pour la pièce suivante ; il y a un cycle de décalage.

L'ensemble qui constitue le moule est appelé un "outillage" ; ce dernier intègre un système de régulation thermique à température constante afin de favoriser le refroidissement de la pièce. L'outillage doit également supporter les contraintes mécaniques des pressions d'injection et l'on cherche à éviter la déformation de sa géométrie pendant l'injection. C'est pourquoi les outillages en injection-moulage sont volumineux et massifs en comparaison des dimensions des pièces produites.

Le procédé d'injection-moulage des thermoplastiques est un procédé cyclique. Afin de mettre en évidence la séquence d'un cycle du procédé, nous proposons un schéma bloc d'un cycle d'injection en Figure 1.2. On remarque en particulier que l'étape de dosage est réalisée en parallèle du refroidissement de la pièce et de son éjection. Le dosage est l'étape pendant laquelle la matière première est fondue dans la vis d'injection. Lors du démarrage d'une presse à injecter, il est courant de produire une vingtaine de pièce pour ajuster les réglages et stabiliser le cycle. Nous détaillons dans la Section 1.1.1 suivante les paramètres qui peuvent être réglés sur une presse à injecter.

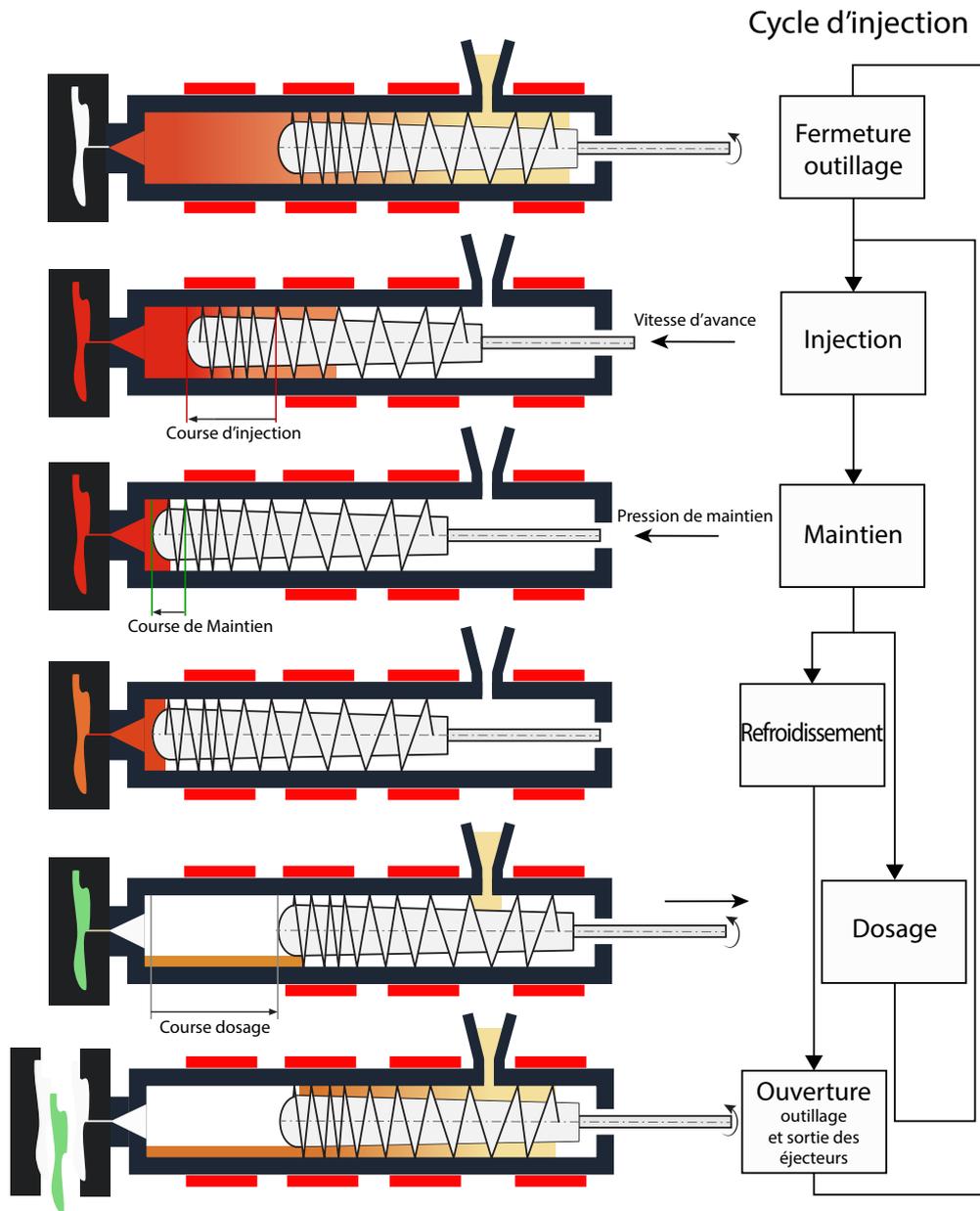


Figure 1.2 – Schéma-bloc du procédé d'injection-moulage.

Le procédé d'injection-moulage est également séquentiel : il est composé de phases successives (voir Figure 1.2). Chaque phase possède des paramètres qui influent sur les phases suivantes et, à terme, sur les caractéristiques du produit fini. Les multiples phases font que le nombre de paramètres qui peuvent être ajustés sur le procédé est supérieur à vingt. Il est possible d'ajuster précisément les températures, les courbes de pressions et les durées d'ouvertures et de fermetures de multiples canaux d'injection. Enfin, le procédé d'injection-moulage possède une certaine dynamique : c'est à dire que l'ajustement d'un des paramètres du procédé met une certaine durée avant de se répercuter sur les produits. Cette dynamique est majoritairement due à l'inertie thermique de l'outillage massif.

D'un point de vue industriel, l'injection-moulage des thermoplastiques est un procédé à haute cadence, peu coûteux car répétable. Une fois la presse à injecter réglée, le procédé est généralement stable dans le temps. Il peut produire de manière continue plusieurs milliers de pièces sans intervention humaine. De plus, le coût de la matière première thermoplastique est faible.

La pratique industrielle de la production d'une pièce par moulage de thermoplastique suit les étapes suivantes :

1. Apport de la matière première
2. Injection-moulage de la pièce
3. Stockage des pièces
4. Étapes de finition (traitements de surface, peintures)
5. Stockage des pièces
6. Contrôle de la qualité
7. Expédition

Le contrôle de la qualité des pièces n'est aujourd'hui pas réalisé dès la sortie du moule (après l'étape 2.). Ainsi, si une pièce est non-conforme après l'étape d'injection-moulage, elle ne sera pas écartée de la chaîne de production. Nous discuterons en particulier dans la Section 1.4 des limites qui contraignent la réalisation du contrôle en ligne de production.

1.1.1 Paramètres réglables d'une presse à injecter

Le nombre de paramètres réglables d'une presse à injecter est grand. Dans le Tableau 1.1, nous répertorions les 16 paramètres les plus courants qui peuvent être réglés sur une presse. Cette liste n'est pas exhaustive. En particulier, les choix de la matière première, de la buse et les profils d'évolution des pressions ajoutent de nombreuses possibilités de réglage. Nous remarquons que de nombreux paramètres sont dépendants. Par exemple, la durée du cycle de production dépend de la vitesse d'injection, qui dépend également de la pression d'injection que l'on souhaite obtenir.

Des profils d'avance de la vis et de pression d'injection sont représentés dans la Figure 1.3. On observe dans la première phase du cycle d'injection une avance rapide de la position de la vis et une augmentation de la pression d'injection, afin de remplir l'empreinte de matière fondue. Une seconde phase est le maintien de la pression dans l'empreinte pendant le refroidissement de la matière. Puis le moule est ouvert et la vis est progressivement reculé à sa position initiale.

La pratique industrielle utilise le savoir-faire du technicien réglleur. Le réglleur a souvent accès à la courbe de pression de l'injection. Sur des pièces compliquées, le réglage du procédé peut prendre plusieurs heures.

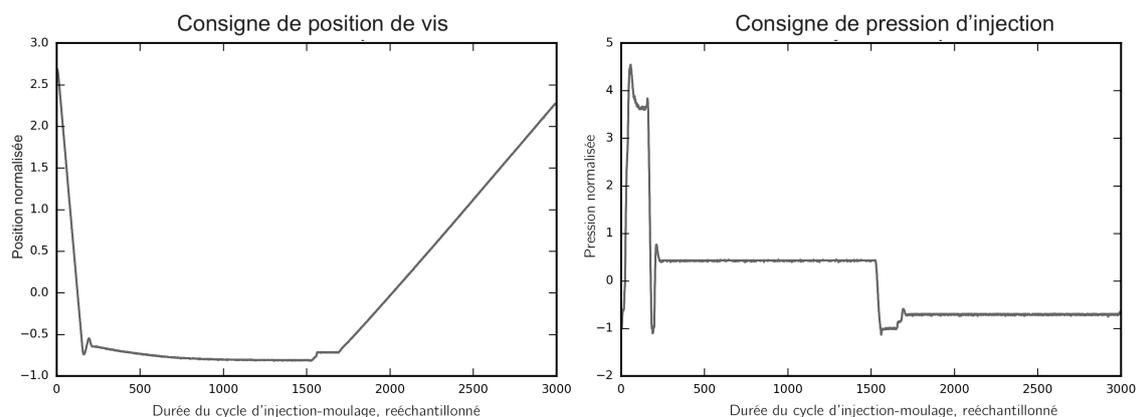


Figure 1.3 – Profil de position de la vis et de pression d'injection pendant un cycle d'injection-moulage.

Phase du procédé	Paramètres réglables	Description	Valeur classique
Dosage	Course de dosage	Distance de recul de la vis	50-100 cm
Dosage	Température du fourreau	Températures des colliers chauffants	200-300 °C
Dosage	Vitesse de rotation de la vis	Rotation de la vis qui malaxe la matière	1-20 tours/min
Injection	Course d'injection	Distance d'avance de la vis pendant l'injection	50-100 cm
Injection	Pression d'injection	Profil de pression exercée sur la vis et matière	10-200 MPa
Injection	Pression de commutation	Détermine le passage de l'injection au maintien	10-100 MPa
Injection	Vitesse d'injection	Vitesse d'avance de la vis	0,5 - 1 m/s
Maintien-refroid.	Durée de maintien	Durée de maintien de la pression	10-60 s
Maintien-refroid.	Pression de maintien	Profil de pression exercée sur la vis	10-100 MPa
Maintien-refroid.	Débit thermorégulateur	Débit de circulation du fluide	20-100 dm ³ /s
Maintien-refroid.	Température thermorégulateur	Régulation thermique du moule	10-40 °C
Ouverture-éjection	Course d'ouverture	Distance d'ouverture de l'outillage	10-100 cm
Ouverture-éjection	Vitesse d'ouverture	Vitesse d'ouverture de l'outillage	0,5 - 2 m/s
Ouverture-éjection	Course des éjecteurs	Distance de sortie des éjecteurs	1-20 cm
Ouverture-éjection	Vitesse de rentrée des éjecteurs	Vitesse de sortie des éjecteurs	0,5 - 2 m/s
Fermeture outillage	Vitesse de fermeture	Vitesse de fermeture de l'outillage	0,5 - 2 m/s

Tableau 1.1 – Paramètres réglables sur une presse à injecter classique.

1.2 La qualité d'un produit en injection-moulage des thermoplastiques

La norme ISO9000 [ISO15] spécifie la notion de qualité comme l'*aptitude d'un ensemble de caractéristiques intrinsèques d'un objet à satisfaire des exigences*. Dans notre cadre des produits industriels, les exigences sont celles du client final ou du donneur d'ordre. Elles sont spécifiées dans la documentation technique du produit, dont le dessin. Des caractéristiques sont mesurées sur le produit. Puis les résultats sont comparées aux exigences, c'est à dire des limites d'acceptation ou des intervalles de tolérances. Nous distinguons cinq grands types de caractéristique :

- géométriques
- mécaniques,
- sensoriels : visuelles, haptiques, olfactives,
- chimiques,
- économiques.

Dans le cadre de ce travail, nous nous intéressons en particulier aux caractéristiques géométriques et d'aspect. La maîtrise de ces deux types de caractéristique est un enjeu important pour le secteur de la plasturgie. Les tolérances dimensionnelles sont de plus en plus serrées. À celles-ci s'ajoutent l'exigence de peu de non-conformité de l'aspect des pièces. Enfin, l'amélioration de la qualité est un facteur important de rentabilité et de compétitivité des entreprises. Dès 1950, DEMING [Dem82] décrit la réaction en chaîne que permet d'initier l'amélioration de la qualité : réduction des coûts des rebuts, diminution du prix de revient, gain de marchés et, à terme, création d'emplois.

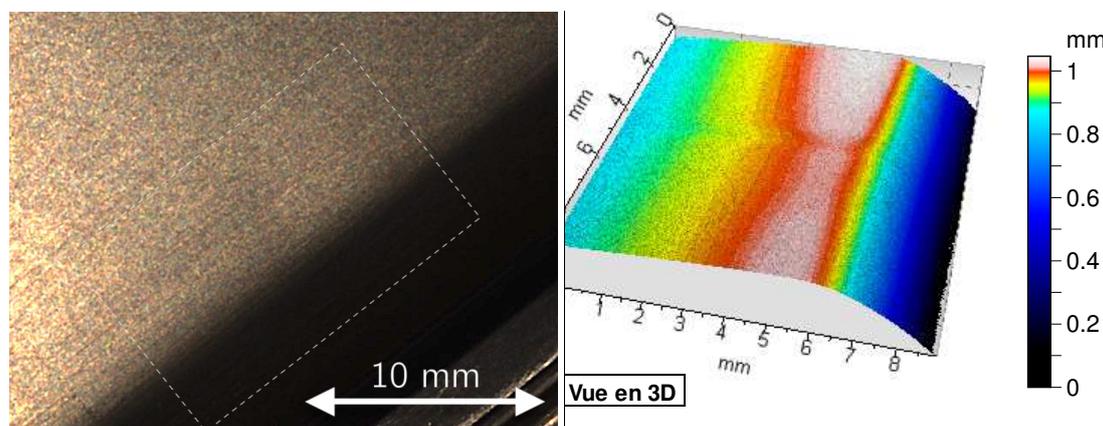
Le Tableau 1.2 présente les non-conformités d'aspect habituelles en injection-moulage des thermoplastiques.

Non-conformité	Description	Causes probables
Homothétie	dimension modifiée	retrait de la matière
Gauchissement	défaut de surface	refroidissement non homogène
Retassure	cavité dans la matière	pression de maintien, vitesse d'injection
Incomplet	trou dans la pièce	quantité de matière injectée, clapet anti-retour défaillant
Ligne de soudure	ligne décolorée	pression d'injection, température matière
Jet libre	trace décolorée	viscosité matière, conception moule, pression d'injection
Éjection	trace de l'éjecteur	vitesse éjecteur, température matière, durée refroidissement
Combustion	trace noire	conception du moule, température de la matière
Givrage	bulle ou trace blanche	matière humide
Pollution	trace colorée	usure de l'outillage, pollution de la matière

Tableau 1.2 – Principaux défauts d'aspects en injection-moulage des thermoplastiques.

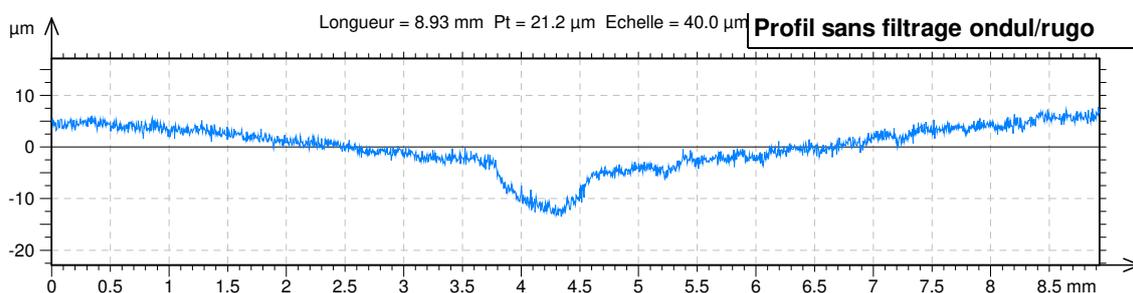
Un défaut de ligne de soudure entraîne une fragilité. La majorité des non-conformités d'aspect sont des défauts géométriques de surface. Seules la combustion, le givrage et la pollution sont entraînées pas la modification des propriétés du polymère. Ces imperfections géométriques sont souvent dues au mauvais maintien du polymère contre les parois de l'outillage, ou bien à la solidification trop rapide de la matière. Les défauts d'incomplets sont les plus simples à détecter par analyse d'image : un seuillage puis une détection de contours est suffisant. La détection des autres non-conformité est plus compliquée. C'est notre objectif principal de recherche.

La Figure 1.4 présente une mesure par microscopie confocale d'un défaut de retassure sur une pièce plastique automobile de deux mètres. Ce défaut est caractéristique des pièces automobiles qui sont peintes afin de réfléchir la lumière de manière harmonieuse. La légère inflexion de la surface entraîne une "cassure" de la réflexion de la lumière, ce qui attire le regard et amplifie l'impression de défaut. L'écart géométrique de l'inflexion est de l'ordre de la dizaine de micromètres.



(a) Photographie du défaut.

(b) Mesure de surface par microscopie confocal.



(c) Profil du défaut.

Figure 1.4 – Défaut de retassure mesurée par microscope confocal, AltiMet 520⁰.

La mesure de la géométrie à l'échelle micrométrique, pendant la durée du cycle du procédé, est un véritable défi. Dans la suite de ce chapitre, nous présenterons les moyens de mesure existants ; puis nous orienterons notre étude sur les moyens de mesure sans contact ; en particulier nous nous intéresserons aux moyens de mesure compatibles avec le temps de cycle du procédé d'injection-moulage.

0. [Spécifications techniques](#) de l'Altiurf 520 sur le site Internet de la société Altimet.

- l'apport des systèmes experts pour régler le point de fonctionnement initial (en bleu) §1.3.3,
- la régulation du point de fonctionnement par l'automatique (couleur rouge, *Engineering Process Control*) §1.3.3,
- l'analyse statistique afin de détecter les dérives (en vert, *Statistical Process Control*) §1.3.3.

L'ensemble de ces travaux de recherche a deux grands objectifs :

- améliorer la modélisation du procédé pour pouvoir optimiser ses paramètres,
- maîtriser les caractéristiques des produits fabriqués.

Ces deux objectifs sont souvent traités de manière complémentaire. Dans les sections suivantes, nous présenterons chacune de ces thématiques de recherche.

1.3.2 Modélisation du procédé d'injection-moulage

Chacune des phases du procédé d'injection-moulage influe sur la suivante et, à terme, conditionne les caractéristiques du produit. Nous étudierons les travaux de la littérature sur la modélisation systémique du procédé, puis nous proposerons une nouvelle représentation systémique. Nous présenterons ensuite les travaux sur les modèles théoriques du procédé d'injection-moulage et les travaux d'identification de modèles à partir de résultats de mesure expérimentaux.

1.3.2.1 Modélisation systémique

En 1999, KAZMER et HATCH proposent un découpage en cinq phases [KH99] (voir la Figure 1.6) qui est une évolution du découpage en trois phases qui avait été proposé par MA [Ma74]. Cette représentation systémique du procédé fait apparaître des variables d'état intermédiaires qui sont associées à chacune des phases.

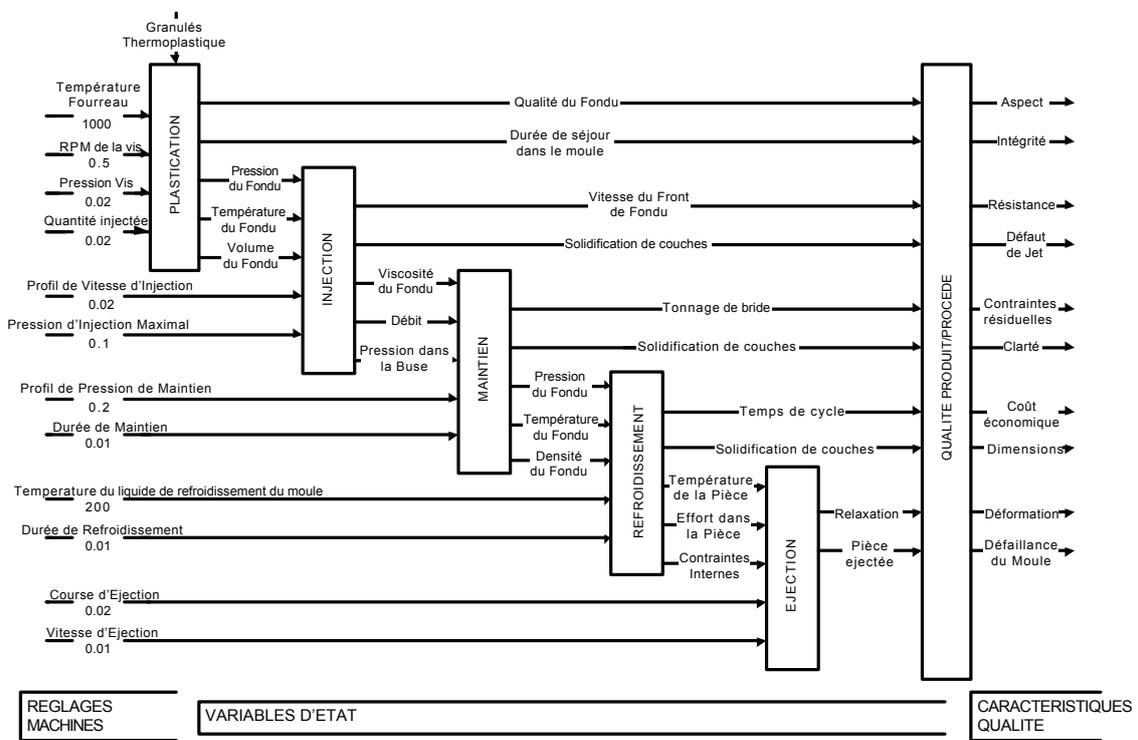


Figure 1.6 – Vue systémique du procédé d'injection-moulage, traduite de KAZMER et HATCH [KH99].

Elle fait également apparaître les relations de dépendance entre les différentes phases. La représentation met en évidence plusieurs variables intermédiaires, qui influent soit directement sur les caractéristiques du produit, soit sur les caractéristiques d'autres phases. Ces variables intermédiaires ne sont pas nécessairement observables. Il est par exemple très difficile de mesurer la densité de la matière fondue, ou encore l'évolution des contraintes internes.

Cette figure permet de mettre en évidence dix caractéristiques du produit qui sont la cause de 12 variables de réglage. L'injection-moulage est un procédé multi-entrées, multi-sorties (MIMO). On distingue également deux réglages de "profils". Un profil est une valeur de réglage qui évolue dans le temps. Aussi, les possibilités de réglages d'un profil sont bien plus importantes que pour une grandeur scalaire. Dans le cas où un profil serait représenté par 10 points ; nous obtenons alors 20 variables de réglage pour deux profils.

Enfin, nous remarquons que cette représentation systémique ne fait pas apparaître la nature cyclique du procédé. En effet, la phase de dosage est réalisée en temps masqué au cycle principal de fabrication d'une pièce.

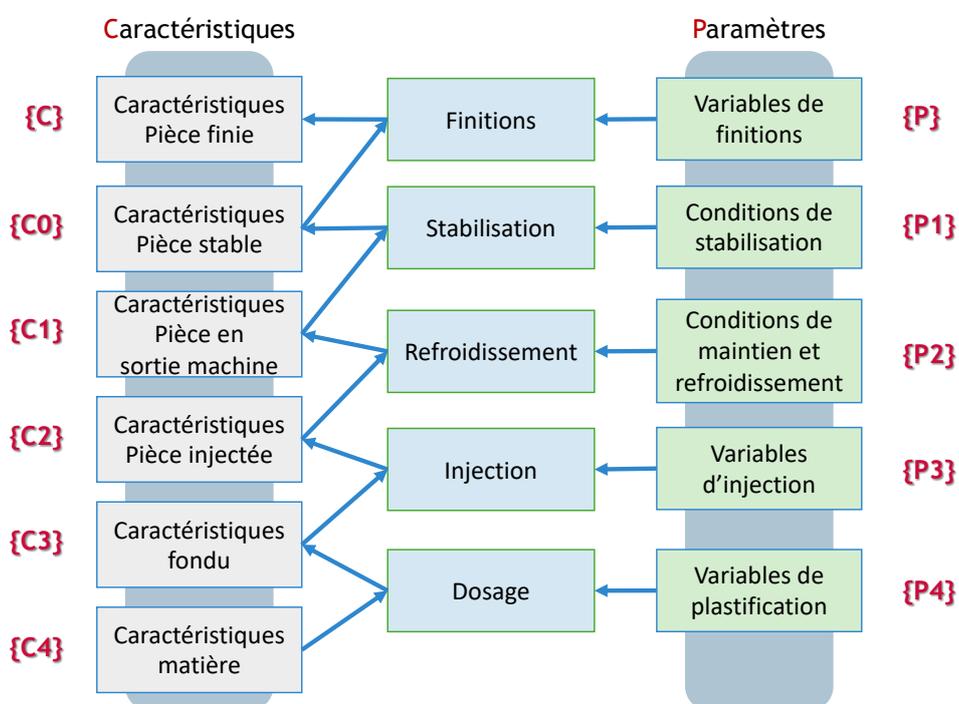


Figure 1.7 – Représentation Zig Zag du procédé d'injection-moulage des thermoplastiques.

Nous nous appuyons sur la méthodologie *Axiomatic Design* pour représenter le procédé [Suh90]. SUH propose la représentation *Zig Zag*, afin de mettre en évidence les liens entre les paramètres d'un procédé (*Process Variables*) et les caractéristiques d'un produit (*Design Parameters*). Dans la Figure 1.7, nous proposons une représentation *Zig Zag* du procédé d'injection-moulage. La représentation *Zig Zag* fait apparaître les variables du procédé P_i et les caractéristiques du produit lors de chacune des phases C_i . Les caractéristiques du produit fini C sont fonction de l'ensemble des phases. De plus, chaque phase est fonction des phases précédentes, ainsi que des variables du procédé. Si un réglage est modifié au niveau de l'une des phases i , les caractéristiques du procédé pour toutes les phases suivantes $C_{j>i}$ pourront être modifiées.

Nous remarquons en particulier que les caractéristiques d'une pièce finie sont liées aux phases de stabilisation et de finition. Or, la stabilisation de pièces prend du temps. Sur des pièces massives, il faut attendre plusieurs heures que la pièce refroidisse et que les contraintes internes se stabilisent. C'est pourquoi, les étapes de finition sont généralement réalisées plusieurs heures après l'injection-moulage d'une pièce.

Dans la suite de cette section, nous présenterons les publications les plus importantes concernant la modélisation du procédé d'injection-moulage. Nous distinguons les modélisations physiques, qui cherchent à proposer un modèle mathématique du procédé à partir de connaissances théoriques, des modélisations empiriques qui utilisent les données d'expériences pour identifier un modèle mathématique.

1.3.2.2 Modélisations physiques du procédé d'injection-moulage

La nature multivariée du procédé rend difficile la définition d'un modèle théorique. En 1987, AGRAWAL, PANDELIDIS et PECHT estiment, en conclusion de leur revue de la régulation du procédé d'injection-moulage, que les futurs travaux de recherche devront prendre en compte l'ensemble des variables d'entrée, ainsi que leurs interactions [APP87]. Pourtant, d'après le Tableau A.1 aucun des modèles proposés dans la littérature après 1987 ne prend en compte l'ensemble des 12 variables de ce procédé, telles que présentées dans la Figure 1.6, voir l'Annexe A Tableau A.1.

Un modèle théorique doit prendre en compte les nombreuses interactions multi-physiques entre chaque phase du procédé. De plus, la connaissance de la physique des polymères reste un champ de recherche ouvert. L'évolution de la cristallinité d'un polymère, lors de sa solidification, peut par exemple être modélisée par l'équation de NAKAMURA et al. [Nak+72; NKA73]. Le lecteur intéressé la modélisation micro-mécanique des polymères semi-cristallin pourra se référer à la monographie de GALESKI et RÉGNIER [GR09]. Les auteurs discutent en particulier des contraintes thermo-mécaniques qui s'exercent sur la matière pendant un cycle de production. Ils analysent les conséquences de ces contraintes sur les propriétés cristallographiques et sur les propriétés mécaniques macroscopiques des pièces.

À l'échelle macroscopique, plusieurs travaux propose de modéliser les phases de dosage, injection, maintien et le refroidissement. En 1991, CHIU, SHIH et WEI proposent un modèle non-linéaire des phases de dosage et d'injection, à partir des lois d'écoulement d'un fluide visqueux et compressible [CSW91]. Huit variables d'état sont utilisées : délai avant le début du dosage, pression d'arrivée de la matière pour le dosage, pression d'injection, position de la vis, pression de la vis, volume du polymère dans l'empreinte et débit du polymère. Leur travail compare le modèle avec des mesures de pression et de température dans l'outillage : les profils des résultats de mesure et du modèle sont similaires. En 2004, BÉREAUX et al. proposent un modèle de l'étape de dosage et de la plastification du polymère, à partir des lois d'écoulement non-newtoniennes des polymères visqueux [Bér+04]. Les travaux de doctorat de LE GOFF propose une modélisation des phases de maintien et de refroidissement, qui s'appuie sur les transferts thermiques au niveau des parois [Le +05; Le 06]. En particulier, LE GOFF montre qu'il est nécessaire de prendre en compte la transformation cristalline du polymère, car les propriétés thermiques de ce dernier évoluent pendant le refroidissement.

Enfin, la méthode des éléments finis permet d'appliquer des modèles physiques élémentaires sur des millions d'éléments discrets. Elle est particulièrement utilisée pour modéliser les phases de dosage et d'injection du polymère fondu [MNB09]. À partir de la simulation de l'évolution des variables du procédé, elle permet également d'optimiser la conception des outillages et de dimensionner les structures [GTW08].

L'ensemble de ces travaux s'intéressent à des phases spécifiques du procédé. À notre connaissance, aucun travail de la littérature ne prend en compte l'ensemble des phases et des paramètres du procédé, telles que présentés dans la Figure 1.7. Dans la suite de nos travaux, nous ne nous appuyerons pas sur les connaissances de modèles physiques. En effet, notre problématique de contrôle de la qualité nécessite de répondre à une grande variété de cas d'applications. Cependant, les modèles théoriques de la littérature sont spécifiques à certains matériaux et à certains cas d'applications. De plus, les modèles théoriques aujourd'hui établis ne permettent pas de simuler l'ensemble des caractéristiques du produit que nous devons contrôler.

1.3.2.3 Modélisations empiriques du procédé d'injection-moulage

La littérature en injection-moulage est fournie d'études expérimentales. La démarche classique est l'identification de modèles à partir de mesurages sur le procédé.

Dès 1974, MA propose de modéliser les phases du procédé à l'aide de fonctions polynomiales, qui sont identifiées par des mesures expérimentales [Ma74]. Il discute de l'utilisation du support informatique pour stocker les données, définir les fonctions et réaliser l'identification. La modélisation du procédé complet est la composée des modèles fonctionnels des différentes phases successives. Ce travail ne propose pas de validation expérimentale de la méthode présentée.

En 2000, DELAUNAY et al. montrent l'influence de la déformation du moule pendant le cycle d'injection [Del+00b]. Ce travail étudie les limites des modèles existants à partir de mesures expérimentales pendant les phases de maintien et de refroidissement. Ils montrent également la nécessité de prendre en compte l'évolution du contact entre le polymère et les parois du moule [Del+00a]. En effet, la matière fondue n'est pas en contact continu avec la paroi. Des poches d'airs peuvent se former ; ce qui modifie sensiblement les variables de refroidissement et la cristallisation du polymère. Les travaux antérieurs assumaient que le moule était indéformable et que le contact entre le moule et le polymère était parfait. La démarche de ces travaux est l'identification des paramètres d'un modèle polynomial, à partir de mesures de température et de pression dans le moule. Les auteurs remarquent la nécessité de modéliser le couplage entre l'évolution de la géométrie du moule et le refroidissement, pour simuler correctement les contraintes imposées à la matière. Les modèles identifiés par les auteurs sont limités aux cas d'études spécifiques sur lesquelles les mesures expérimentales ont été réalisées.

Nous remarquons, dans la littérature de l'injection-moulage, deux grandes démarches utilisées pour identifier des modèles multivariés :

- l'exploration et la modélisation du procédé par les plans d'expériences §1.3.2.3 qui permet d'identifier des modèles empiriques,
- l'identification de modèles par apprentissage, à l'aide de réseaux de neurones §1.3.2.3.

1.3.2.3.1 Plan d'expériences

Les plans d'expériences permettent de construire un modèle polynomiale d'un système à plusieurs paramètres. De plus, ils permettent d'adapter la quantité d'essais expérimentaux à réaliser en fonction de l'ordre du modèle que l'on cherche à obtenir. Les essais sont réalisés suivant une table de variation des paramètres. Nous discutons des plans d'expériences dans le Chapitre 3.1 Section 2.1.1. Le modèle obtenu permet théoriquement d'optimiser une sortie en fonction des paramètres, et ainsi, comme tout modèle de trouver un point de fonctionnement idéal.

En 1993, RÉGNIER et TROTIGNON sont les premiers à proposer l'utilisation des plans d'expériences pour identifier un modèle polynomial d'ordre 2 avec interactions du phénomène de retrait, à partir de 6 paramètres du procédé [RT93 ; RS94]. De nombreux travaux utiliseront par la suite cette démarche expérimentale. En 2013, FEI, MEHAT et KAMARUDDIN réalisent une étude rétrospective de 1999 à 2010, sur l'utilisation de la méthode des plans d'expériences en injection-moulage [FMK13]. Ils distinguent deux utilisations faites dans la littérature :

- produire un jeu de données expérimentales pour identifier des modèles,
- limiter le coût de l'optimisation par simulations numériques en utilisant un modèle intermédiaire construit par plans d'expériences.

L'étude de FEI, MEHAT et KAMARUDDIN remarque en particulier qu'un nombre important de modèles est identifié par apprentissage, à l'aide de réseaux de neurones. La théorie des plans d'expériences permet d'identifier des modèles polynomiaux. Or, les variables qui entrent en jeu dans le procédé d'injection-moulage ont souvent des réponses non linéaires par rapport aux paramètres de réglages et des interactions qui peuvent être difficilement modélisé par des

polynômes. C'est pourquoi les modèles à réseaux de neurones ont été largement utilisés dans la littérature.

Nous utiliserons dans nos travaux un plan d'expériences de criblage pour construire notre jeu de données, dans le Chapitre 3.1. Cela permet de parcourir un espace représentatif de la plage de fonctionnement du procédé en un minimum d'essais.

1.3.2.3.2 Modélisation par réseaux de neurones

L'utilisation des réseaux de neurones pour la modélisation dans les systèmes industriels est proposée dès 1980. Un réseau de neurones est une composée de fonctions non-linéaires. Il est adapté à l'identification de modèles aux multiples entrées. Il est intéressant de noter que le procédé d'injection-moulage est également représenté par une composition de fonctions dans la littérature : MA [Ma74] utilise une fonction polynômiale pour modéliser chaque phase du procédé.

En 2000, SCHNERR-HÄSELBARTH et MICHAELI proposent le système *Intelligent Quality Control* [SM00]. Un algorithme à réseaux de neurones est utilisé pour prédire la caractéristique de la masse des pièces produites, à partir des variables du procédé. Les données d'apprentissage proviennent d'un plan d'expériences factoriel à trois niveaux, sur trois paramètres du procédé : température du fondu, pression de maintien et vitesse d'injection. À intervalle temporels régulier, 150 points de mesure de la pression dans le moule sont enregistrés pendant les phases d'injection et de maintien. La masse de la pièce est mesurée dès la sortie de la machine avec une résolution au 1 milligramme ; les expériences conduisent à une variation de masse de 1,4%. Le réseau est alors capable de prédire la masse des pièces avec une exactitude de 86%, soit une moyenne de 5 milligrammes d'erreur sur une masse total de 35 milligrammes. Ces résultats mettent en valeur l'intérêt des modèles qui utilisent des réseaux de neurones.

1.3.3 Maîtrise du procédé d'injection-moulage des thermoplastiques

Dans cette section, nous positionnerons notre travail de contrôle de la qualité en ligne de production dans la thématique de recherche de la maîtrise du procédé d'injection-moulage. L'objectif final est de maîtriser la qualité du produit : c'est à dire de limiter la dispersion des caractéristiques des pièces produites. Nous résumons cette démarche en nous référant à notre représentation *Zig-Zag* Figure 1.7 :

1. réglage initial d'un point de fonctionnement (paramètres P_{2-4})
2. régulation du point de fonctionnement P_{2-3}
3. détection des dérives du procédé C_{1-3} ,
4. ajustement des paramètres P_{2-4} afin de corriger les caractéristiques C_{0-1} ,

L'Annexe A propose une étude bibliographique des techniques proposées afin de maîtriser le procédé d'injection-moulage. Le Tableau A.1 de l'Annexe A récapitule cette revue de la littérature. On observe que les travaux de recherche initiaux utilisent l'automatique pour réguler le procédé. Dernièrement, les travaux s'appuient principalement sur une démarche de Maîtrise Statistique des Procédés.

À partir de l'étude de ces travaux et de notre connaissance de la pratique industrielle de la plasturgie, nous identifions les trois difficultés du procédé d'injection-moulage :

- le réglage initial du point de fonctionnement (paramètres P_{2-4}),
- la surveillance des dérives des caractéristiques du procédé C_{1-4} et du produit C_0 .
- l'ajustement des réglages P_{2-4} pour corriger les caractéristiques du produit C_0 .

Aujourd'hui, l'industrie de la plasturgie repose sur l'expérience du technicien-régleur pour définir le point de fonctionnement initial. Le bureau d'étude peut définir un point de fonctionnement mais un ajustement précis devra être réalisé par le technicien-régleur. Il n'existe pas de méthode de réglage automatique du point de fonctionnement, mais des systèmes

d'assistance au réglage ont été proposés §A.1.1. La multitude de paramètres qui peuvent être ajustés sur le procédé rend difficile la découverte automatique d'un point de fonctionnement permettant de produire une pièce conforme. Le technicien-régleur réalise cette tâche grâce à sa connaissance empirique du procédé. Aussi, le réglage initial de la presse à injecter est long. La pratique industrielle est l'ajustement de chacun des paramètres P_{2-4} du procédé, pour que les variables intermédiaires C_{1-4} soient satisfaisantes, ainsi que les caractéristiques C_0 du produit. De plus, il est impossible pour un technicien régleur d'avoir une vue d'ensemble de la valeur des variables intermédiaires car elles ne sont pas toujours mesurées ; voir parfois non mesurables. Dans la pratique, le réglage initial du point de fonctionnement est une opération itérative et empirique.

De la même manière, si l'on souhaite corriger une caractéristique C_0 du produit, il est difficile de déterminer comment modifier les réglages P_{2-4} . Cela est rendu d'autant plus compliqué par le fait que les caractéristiques de la pièce stable C_0 ne sont connues que plusieurs heures après sa production.

La régulation du procédé d'injection-moulage est le sujet de nombreux travaux. Les outillages modernes possèdent des capteurs qui permettent de connaître précisément les caractéristiques de la matière, ou même la pression ou la température dans le moule. La méthode qui est certainement la plus avancée a été proposée en 2009. MICHAELI et SCHREIBER réalise la régulation des paramètres de l'ensemble des phases d'injection, de maintien et de refroidissement [MS09]. Cela permet de suivre le diagramme Pression, Volume, Température (PVT) de transformation de la matière idéal pendant l'ensemble du cycle (voir Annexe §A.2). La difficulté de la régulation de toutes les variables C_{2-3} est due à la complexité de la modélisation du procédé, en particulier des interactions entre les variables. Les auteurs de cette étude utilisent un modèle à réseau de neurones qui est identifié à partir des mesures de pression et de températures dans le moule pendant le cycle. L'optimisation des paramètres à partir du modèle permet de trouver les ajustements qui permettent de suivre le diagramme PVT. Les auteurs étudient l'effet de cette régulation du procédé sur la dispersion de la masse des pièces, lorsque la température du fourreau est modifié pour introduire une perturbation : la masse est stabilisée.

En 2003, PILLET, MAIRE et BRONET proposent des principes pour adapter la Maîtrise Statistique des Procédés à l'injection-moulage [PMB03]. Le choix des variables à contrôler peut se faire sur les paramètres du procédé et sur les caractéristiques du produit. Les auteurs recommandent de choisir peu de variables. Celles-ci doivent être les plus représentatives possibles des défauts à surveiller. Enfin, il est recommandé de choisir des variables faciles à mesurer. Le procédé d'injection-moulage est capable de produire une pièce toutes les dizaines de secondes. Le risque de contrôler une pièce conforme comme une pièce non-conforme est appelé le risque de faux positif. Ce risque est généralement défini à plus ou moins trois fois l'écart-type de la distribution de la valeur surveillée. Dans le cas d'un temps de cycle de 30 secondes, cela correspondrait à une fausse alarme toutes les 2,5 heures, soit 0,27% de pièces hors-contrôles. Cette fréquence est trop élevée, c'est pourquoi les auteurs recommandent d'ajuster le risque à 4,5 fois l'écart-type, soit 0,00068% de pièces hors-contrôles, soit une pièce toutes les 992 heures de production.

Une démarche complémentaire à la détection des dérives serait de réaliser un ajustement des paramètres du procédé pour compenser la dérive, c'est la régulation du procédé.

1.4 Problématique industrielle : le contrôle qualité en ligne de production

Dans le cadre de productions industrielles par injection-moulage des thermoplastiques, les contrôles qualité sont traditionnellement effectués sur les produits finis, juste avant l'expédition des pièces. Il s'agit de s'assurer que les pièces sont conformes aux exigences spécifiées par le cahier des charges. Les pièces non-conformes sont mises au rebut. Le contrôle qualité final est réalisé à l'issue des étapes de finition, telles que la peinture et la décoration. Pour des productions de pièces à faible valeur ajoutée, le contrôle est souvent réalisé par prélèvements aléatoires de pièces. Il est effectué par un opérateur humain, ce qui est coûteux. Le contrôle peut nécessiter la mesure de dimensions géométriques ou de propriétés mécaniques de la pièce. La mesure géométrique peut être réalisée à l'aide d'un pied à coulisse.

D'après le Tableau A.1, le mesurage des caractéristiques qualité des produits, dès leurs sorties de l'outillage est peu étudiée. La caractéristique la plus étudiée dans la littérature est la masse de la pièce [SM00; Fou+06; MS09]. Cela s'explique, par la rapidité de cette mesure et par la facilité de la réalisation de la pesée, dès la sortie de la machine, ainsi que par la bonne précision des balances. Dans l'industrie, la masse est souvent considérée comme une caractéristique qui valide la qualité de la pièce. Si les pièces ont des manques, la masse sera nécessairement plus faible. De plus, la densité de matière injectée fait varier la masse et fait également varier les caractéristiques mécaniques. Surveiller la masse des pièces permet de détecter les manques matières et les défauts les plus importants.

Nous remarquons que de nombreuses études annoncent réaliser le contrôle de la qualité du produit, alors qu'elles s'intéressent uniquement à la masse ou à une unique dimension géométrique. En revanche, les caractéristiques d'aspects des pièces sont rarement mesurées en ligne de production. Les cahiers des charges posent pourtant des contraintes en termes d'aspect : pas de trace, pas de tâche, une couleur uniforme, une texture définie.

De plus, les caractéristiques d'aspect contiennent des informations importantes pour l'analyse des causes de la variabilité des caractéristiques d'une pièce. Le technicien-régleur utilise prioritairement l'aspect des pièces pour régler la machine.

Une perspective à long terme de nos travaux pourra être le pilotage automatique du procédé d'injection-moulage. Pourtant, aucun système de pilotage automatique n'a aujourd'hui pris en compte les caractéristiques visuelles des pièces.

Dans nos travaux, nous chercherons à proposer un dispositif de contrôle adapté aux contraintes industrielles. Nous avons identifié trois verrous au déploiement massif du contrôle qualité à cent pour-cent sur les lignes de production :

Économique : c'est le coût du dispositif de mesure,

Technologique : le respect des contraintes industrielles et l'extraction de l'information sur la qualité à partir des mesures,

Humain : la modélisation de la notion de qualité à partir de l'expertise humaine.

Dans les sections suivantes, nous détaillerons chacun de ces verrous. L'objectif de notre travail est de proposer une solution technique pour les dépasser.

1.4.1 Viabilité économique du déploiement du mesurage de la qualité en ligne de production

L'automatisation du contrôle des produits est principalement déployée pour des productions à gros volumes. Les productions industrielles ont pour caractéristiques une cadence élevée, c'est à dire un temps de cycle court. En Annexe, le Tableau C.1 présente la répartition économique industrielle française par secteurs d'activité. Elle indique une marge moyenne de 27% pour le secteur de la plasturgie française, en 2016 [Dir19]. C'est une marge relativement élevée

en comparaison des autres secteurs d'activité. Le nombre d'entreprise du secteur est également important. En posant l'hypothèse que 1% de la marge du secteur de la plasturgie devrait être dépensé pour automatiser le contrôle de la qualité (pour un chiffre d'affaires moyen de 1,3 millions d'euros par entreprise), on obtient un budget de 13 000€ par entreprise pour le contrôle qualité. Cette estimation permet de rendre compte du budget limité de l'automatisation du contrôle. Contrairement à la transformation de la matière première, le contrôle de la qualité n'apporte pas de valeur au produit final ; c'est une sécurité pour respecter le cahier des charges et palier aux dérives du procédé.

Pour un produit qui nécessite un niveau de qualité très élevé, il est nécessaire de réaliser un contrôle qualité final de chaque pièce (contrôle à cent pour-cent). Dans le cas de l'injection-moulage de pièces plastiques, le contrôle qualité final est souvent effectué plusieurs heures après l'étape de moulage. Parfois, le contrôle final est réalisé après l'ajout de valeur des étapes de finitions. Si la pièce est non-conforme juste après le moulage, alors de la valeur a été ajoutée à une pièce non-conforme. De plus, la valeur ajoutée par les étapes de finitions, telles que la peinture ou la galvanoplastie, est bien plus importante que la valeur ajoutée par l'injection-moulage. Si le temps de cycle du procédé permet de produire une pièce toutes les 30 secondes, cela correspond à une production de mille pièces par journée de 8 heures. Si le contrôle de la qualité est réalisé un jour après la production, cela correspondrait ici à 1000 pièces d'encours. Ainsi, si un défaut est détecté suite à ce contrôle qualité, l'ensemble des 1000 pièces de l'encours sont des pièces rebuts qui ont été finies inutilement.

L'objectif du contrôle qualité en ligne est de détecter les défauts erratiques, ainsi que les dérives de la qualité le plus tôt possible, afin d'écarter les pièces de la chaîne d'ajout de valeur.

Le moulage d'une pièce non-conforme a un coût négligeable en comparaison du coût des étapes de peinture et de finitions de cette pièce non-conforme. Détecter les pièces non-conformes dès la sortie de la presse d'injection, afin de les écarter de la chaîne de production, permet de diminuer les rebuts finaux et de supprimer ainsi les coûts associés à leurs finitions.

1.4.2 Mesurage des variables d'état du procédé : mesurage indirect des caractéristiques du produit

La littérature sur l'injection-moulage étudie peu le mesurage direct des caractéristiques du produit. La majorité des travaux proposent de mesurer des variables physiques sur le procédé, à partir de capteurs positionnés à l'intérieur de l'outillage et de la presse. En général, un modèle est construit afin de prédire une caractéristique du produit, qui est souvent la masse de la pièce, à partir des mesures dans le moule, qui sont souvent la pression et la température. L'argumentaire de ces travaux est que les variables au plus proches de la matière fondue permettent de prédire au mieux les caractéristiques finales de la pièce.

Une analyse multi-variée permet ensuite de détecter les dérives du procédé. Les capteurs les plus répandus sont les sondes de température et les sondes de pression [Kur+09]. Le coût de cette instrumentation invasive des moules est élevé. Intégrer les conduits, nécessaires au passage des fils et connecteurs, est compliqué sachant que les moules ont également des canaux de refroidissement indispensables au procédé. De plus, les capteurs subissent de fortes contraintes ce qui réduit leur durée de vie. La défaillance d'un capteur nécessite l'arrêt de la production si l'on souhaite conserver la surveillance.

Dans "Quality Prediction in Injection Molding", nous proposons de construire un modèle qui détermine la valeur d'une cote dimensionnelle de la pièce produite, à partir de mesures sur le procédé [Nag+17]. Un capteur de pression et un capteur de température sont positionnés au contact de la matière, dans le moule. La position des capteurs que nous utilisons est optimisée selon la méthode de AGAZZI et al. [Aga+13]. À partir des signaux de capteurs de pression et de température mesurés pendant le cycle du procédé, une valeur géométrique continue est prédite à l'aide d'un modèle identifié par apprentissage statistique.

La Figure 1.8 présente ces signaux pour une pièce. On observe pour la pression une valeur maximale lors de l'injection de la matière dans l'empreinte, puis une pression décroissante pendant la phase de maintien. Enfin, la pression est nulle lorsque la pièce est solidifiée et pendant que l'empreinte est ouverte. Pour la température, on observe un refroidissement progressif suite à l'injection de la matière fondue.

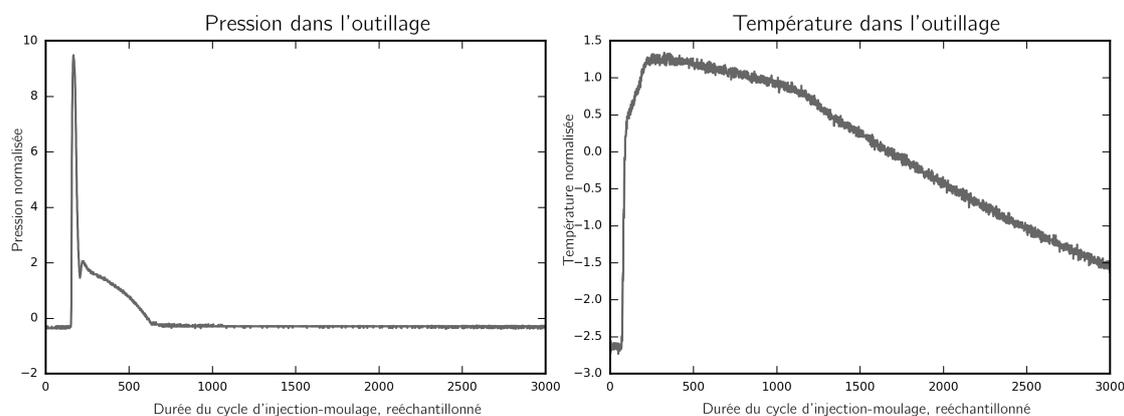


Figure 1.8 – Résultats de mesure de la pression et la température dans l'outillage pendant tout le cycle.

Nous nous appuyons sur une production de 204 pièces, pendant laquelle les paramètres de la machine ont variés suivant un plan d'expériences de criblage, discuté dans le Chapitre 3.1 §2.1.2 à venir. Le modèle qui prédit au mieux la géométrie à partir des mesures s'appuie sur des réseaux de neurones récurrents. La Figure 1.9 présente les résultats normalisés obtenus par validation croisée¹, pour 27 pièces de la base de données de validation. L'erreur de prédiction est faible. Cela correspond à une erreur moyenne de prédiction de la dimension de 1,3 millimètres sur une dimension de 90 millimètres, soit une erreur relative de 1,54%. Ces résultats montrent l'intérêt de ce type de mesure indirecte des caractéristiques du produit. Cette erreur est inférieure aux tolérances générales des pièces plastiques donnée dans la norme ISO20457 [ISO18], qui exige entre 2% et 4% d'écarts dimensionnel.

Dans une démarche de surveillance de l'état du procédé d'injection-moulage, la mesure de variables sur la machine est importante. Une mise sous surveillance statistique MSP² permet de détecter les situations hors-contrôle. Nous invitons le lecteur qui s'intéresse aux mesures réalisées sur le procédé plutôt que sur le produit, à consulter l'état de l'art récent et exhaustif de AGEYEVA, HORVÁTH et KOVÁCS [AHK19].

Un capteur intégré dans le moule est associé un outillage, et donc à une unique pièce. Il n'est pas viable de démonter le capteur pour le positionner sur un autre outillage. À contrario, un dispositif de mesure extérieur au procédé n'est pas lié à un outillage.

1.4.3 Mesurage direct des caractéristiques du produit

Le mesurage de la pièce permet d'obtenir directement une information sur ses caractéristiques ; à la différence du mesurage de variables dans le moule, qui ne sont que des indicateurs de la qualité.

Pour être intégrée à la ligne de production et contrôler cent pourcent des pièces, le mesurage des caractéristiques du produit doit être réalisé dans une durée inférieure au temps de cycle du procédé d'injection-moulage pour que cela soit viable économiquement. Si la pièce doit être déplacée devant le moyen de mesure, la durée du convoyage doit également être incluse dans

1. Nous détaillons le principe de la validation croisée dans l'Annexe E.1.6.

2. Nous présentons la littérature sur la surveillance statistique MSP en injection-moulage dans l'Annexe A.3.

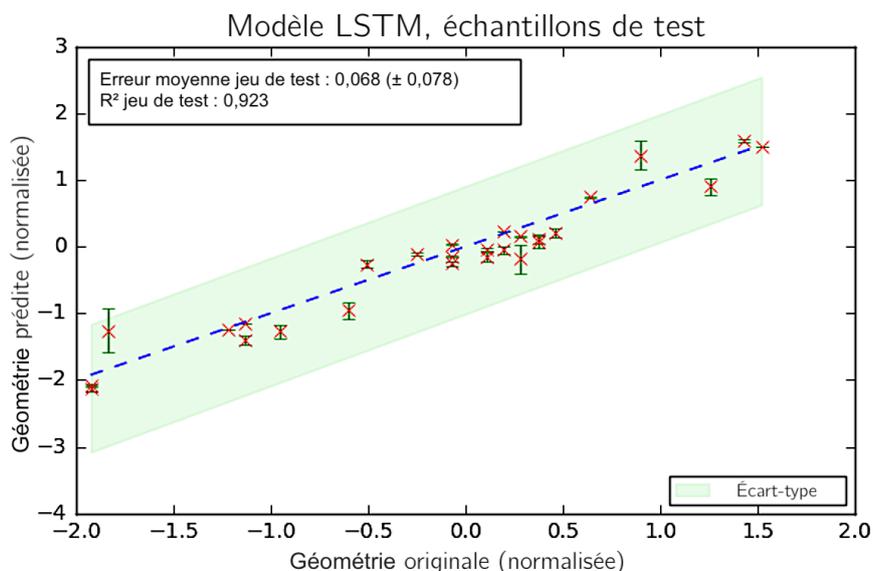


Figure 1.9 – Résultats du modèle LSTM sur le jeu de données de test.

cette durée. De plus, si on souhaite écarter la pièce non-conforme de la chaîne de production, il est alors nécessaire d’effectuer l’analyse de résultat pendant la durée du cycle. La Figure 1.10 inscrit la durée de mesure dans le chronogramme du cycle du procédé. Cette contrainte de durée de mesure sera une contrainte forte pour l’ensemble des choix technologiques de nos travaux.

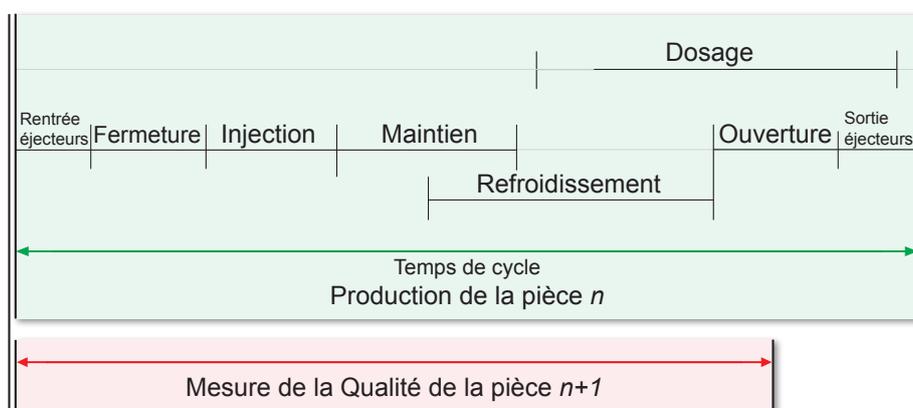


Figure 1.10 – Intégration de la mesure dans le cycle d’injection-moulage.

Différentes mesures sont aujourd’hui compatibles, de par leurs courtes durées, avec une utilisation en cycle industriel : pesée de la masse ; imagerie par thermographie infrarouge ; contrôle d’aspect par caméras ; imagerie tridimensionnelle [Sch+02] ; durométrie ; imagerie des champs de contraintes par les phénomènes de photoélasticité sur les pièces plastiques transparentes.

L’approche de nos travaux consiste à mesurer les caractéristiques des pièces dès la sortie de la presse d’injection-moulage. La réalisation de ces mesures nécessite de convoier la pièce devant le banc de mesure. Un tapis roulant ou un bras robotisé permet de déplacer la pièce.

Dans nos travaux, nous n’utiliserons pas de méthodes de mesure invasives, ni de mesures réalisées hors-ligne. L’étude de ces méthodes peut néanmoins servir d’inspiration pour concevoir des méthodes de mesure non invasives et sans destruction des pièces. Ainsi, nous nous intéresserons dans nos travaux à la polarimétrie et à la thermographie. En revanche, nous n’étudierons pas l’utilisations des rayonnements X et Téraherz, car les machines restent

coûteuses. Nous discutons dans cette section de l'utilisation de différents moyens de mesure en ligne de production. Les apports de la thermographie et de la polarimétrie seront détaillés dans le Chapitre suivant Section 2.3 et Section 2.4.

Nous proposons une liste des principales caractéristiques qui peuvent être mesurées sur une pièce plastique :

- contraintes internes,
- contraintes internes,
- structure cristalline de la matière,
- densité,
- état de surface,
- géométrie.

1.4.3.1 Mesurage des contraintes internes

La mesure des contraintes résiduelles dans la pièce est un enjeu important car elles fragilisent les pièces. La thèse de doctorat de GIROUD, intitulée "Mesure et calcul des contraintes résiduelles dans les pièces injectées en thermoplastiques avec et sans fibres de renfort", propose de mesurer les contraintes internes d'une pièce à l'aide de la méthode de l'enlèvement de couches fines [Gir01]. C'est une méthode qui détruit la pièce et qui doit être réalisée en dehors de la ligne de production.

1.4.3.2 Mesurage cristallographique

La mesure des caractéristiques cristallographiques est importante car ce sont ces caractéristiques qui déterminent les propriétés mécaniques des pièces. MENDOZA et al. utilise par exemple la polarimétrie sur couche mince (micrographie) pour mettre en évidence les axes d'orientation du polymère semi-cristallin [Men+03]. Dans ces travaux de thèses, MALHAB introduit l'utilisation de la diffraction des rayons X à grands et petits angles, à l'aide d'un rayonnement synchrotron hautement énergétique (12 KeV) [Mal12]. La cohérence du faisceau synchrotron (30 micromètres) permet de mettre en évidence la structure cristallographique dans l'épaisseur des échantillons plastiques. Cela permet d'étudier l'évolution de la structure en fonction des paramètres du procédé d'injection. La diffraction à grands angles (*Wide-Angle X-ray Scattering*) permet de déterminer le degré de cristallinité du polymère semi-cristallin, en observant les figures de diffraction de la structure cristalline. La diffraction à petits angles permet de déterminer les dimensions nanométriques de la structure du polymère, telles que la longueur de la période de répétition du motif cristallin, la largeur et la longueur de la lamelle cristalline. À partir de la structure cristalline, il est possible de diagnostiquer des défauts structurelles et d'expliquer leurs causes en terme de variables du procédé de production (viscosité de la matière, pression d'injection, températures ...).

1.4.3.3 Mesurage de la densité

En 2010, le projet *PLASTX* du Pôle Européen de la Plasturgie³ propose de réaliser une mesure par tomographie rayons X des pièces dès leur sortie du moule⁴. La source de rayons X est fixe et un bras robotique déplace la pièce dans un mouvement de rotation. La tomographie permet de mesurer le champ de densité de la pièce. Les résultats du projet *PLASTX* montrent que cette mesure est compatible avec le temps de cycle industriel. Cependant, la mise en place d'une source de rayons X sur une ligne de production reste difficile en raison des blindages nécessaires.

3. Le Pôle Européen de la Plasturgie est devenu le [Centre Technique Industriel de la Plasturgie et des Composites \(IPC\)](#) en 2017.

4. [Vidéo de présentation](#) du démonstrateur du projet *PLASTX*.

1.4.3.4 Mesurage de l'état de surface et de l'aspect

En 2009, le projet européen *poliMATIC*⁵ a proposé de robotiser l'utilisation de la microscopie confocale (capteur *Altimet* de la société *Altisurf*) pour contrôler la rugosité de pièces. La position du capteur est asservie en distance pour mesurer des pièces courbes. Un interféromètre portatif⁶ a également été développé pour améliorer la résolution et atteindre une précision inférieure au nanomètre [BR12]. La durée de la mesure est élevée, car le capteur mesure une surface de 4×4 centimètres. Il doit être déplacé sur toute la surface.

Dernièrement, dans ses travaux de doctorat, LACOMBE utilise un dôme de mesure de la réflectance (*Reflectance Transformation Imaging*) pour contrôler les caractéristiques d'aspect de pièces plastiques [Lac18]. Ce dôme de réflectance n'est actuellement pas intégré à la ligne de production, à cause de ses dimensions. Des travaux sont actuellement en cours pour proposer une méthode d'intégration en ligne de production.

1.4.3.5 Mesurage géométrique par triangulation laser

Le contrôle dimensionnel de profil plan peut être automatisé par imagerie de profil. Dans le cas de pièces moulées, les caractéristiques géométriques sont souvent tridimensionnelles. Il est alors nécessaire de réaliser le mesurage de plusieurs profils orthogonaux, où bien d'utiliser un moyen de mesure tridimensionnel.

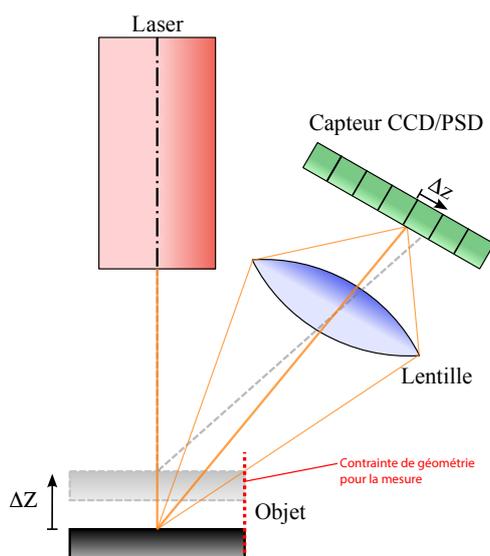


Figure 1.11 – Mesure de la géométrie d'un objet par triangulation laser. Figure dérivée du travail original de Georg Wiora (Dr. Schorsch), CC BY-SA 3.0, via Wikimedia Commons.

Il existe un grand nombre de moyens de mesure pouvant être qualifiés de scanner tridimensionnel. Nous distinguons les méthodes avec contact physique de la pièce et sans contact, qui utilisent la réflexion ou la transmission d'une onde électromagnétique. Dans le cadre de la mesure sans contact, les moyens les plus employés sont la stéréoscopie, la photogrammétrie, la lumière structurée, la tomographie, le temps de vol et la triangulation laser.

La triangulation laser s'appuie sur la mesure d'un écart de parallaxe entre d'une part, une source laser balayée linéairement par un galvanomètre, et d'autre part la réflexion du laser sur l'objet à mesurer. Une source lumineuse laser est choisie car la largeur du faisceau lumineux sur la

5. Projet de recherche de la Commission européenne FP7-NMP-2009-SME-3 : automated-polishing.eu

6. Interféromètre désormais commercialisé par la société [QiSab](http://QiSab.com)

pièce doit être la plus petite possible. Le faisceau laser cohérent garantit une dispersion angulaire faible à grande distance.

La Figure 1.11 présente le principe de la mesure par triangulation. Un écart géométrique verticale ΔZ entraîne un écart proportionnel, sur le plan du capteur. La méthode de triangulation laser souffre de quatre contraintes principales :

- L'intensité lumineuse du laser doit être supérieure à la luminosité ambiante. C'est pourquoi la longueur d'onde du laser est souvent choisie hors du spectre visible.
- La fréquence de balayage du laser doit être très supérieure au déplacement de la pièce. Cela conditionne la fréquence d'acquisition du capteur.
- Le matériau qui est mesuré doit avoir une absorption faible pour la longueur d'onde du laser et les réflexions spéculaires directes doivent être évitées.
- La géométrie de la pièce doit permettre la mesure : elle ne doit pas entraîner d'occlusion pour le couple source laser et capteur. L'écart angulaire de ce couple est souvent proche de 45° . C'est pourquoi les géométries concaves doivent être supérieures à 45° .

La Figure 1.12 présente notre mise en place de cette mesure, en cycle industriel. Le scanner tridimensionnel que nous utilisons est le *Handyscan 3D ZSCANNER 700*⁷. La durée de la mesure est de 40 secondes.

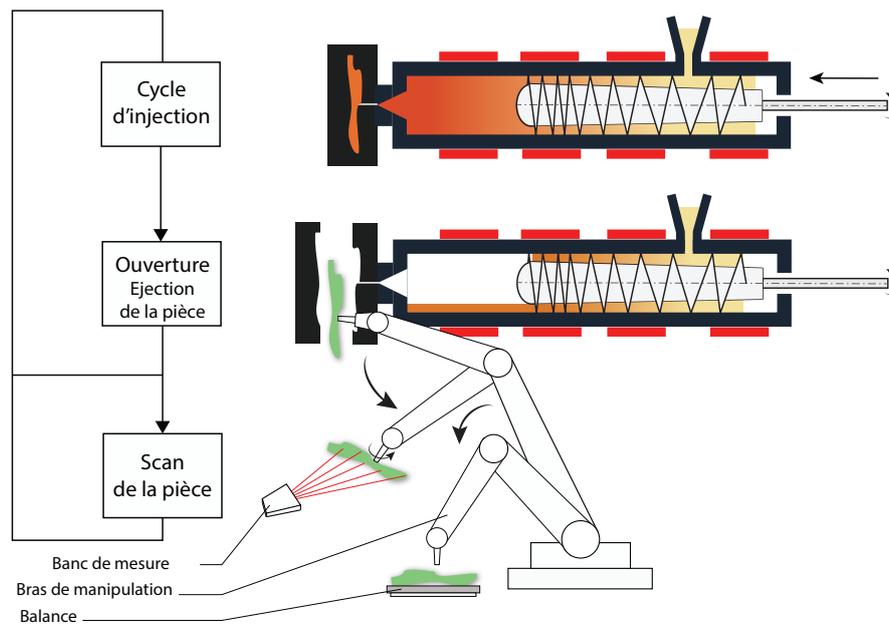


Figure 1.12 – Mesure de la géométrie d'un objet par triangulation laser en cycle industriel.

Le scanner est fixe et une rotation complète de la pièce est exécutée devant le scanner, à l'aide du bras robotisé qui décharge la presse (voir Figure 1.12). La vitesse de cette rotation définit la durée de la mesure, qui est elle-même limitée par la durée cycle de production de la machine. Un temps de cycle court impose de réaliser des déplacements rapides devant le scanner.

Le scanning de la pièce dès sa production permet de comparer la géométrie produite à la géométrie de référence de l'outillage. La Figure 1.14 a. présente l'écart de la pièce chaude à la géométrie cible, qui est définie par le modèle de la conception CAO.

Dans notre cas d'application, la pièce mesurée possède des côtés qui occultent la réflexion du laser. De plus, la vitesse de rotation que nous avons dû utiliser est trop élevée en comparaison de

7. [Caractéristiques techniques](#) du scanner Handyscan 3D ZSCANNER 700 sur le site du fabricant Créaform.

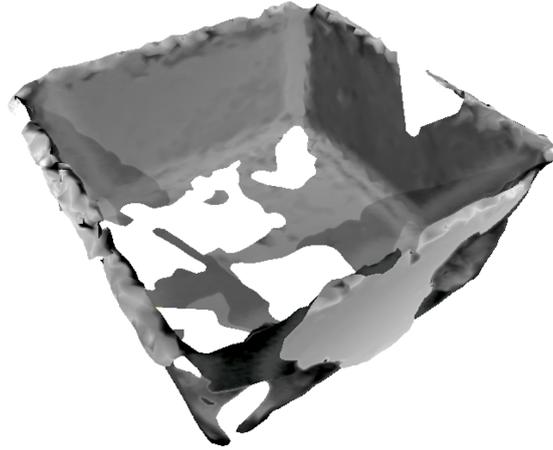
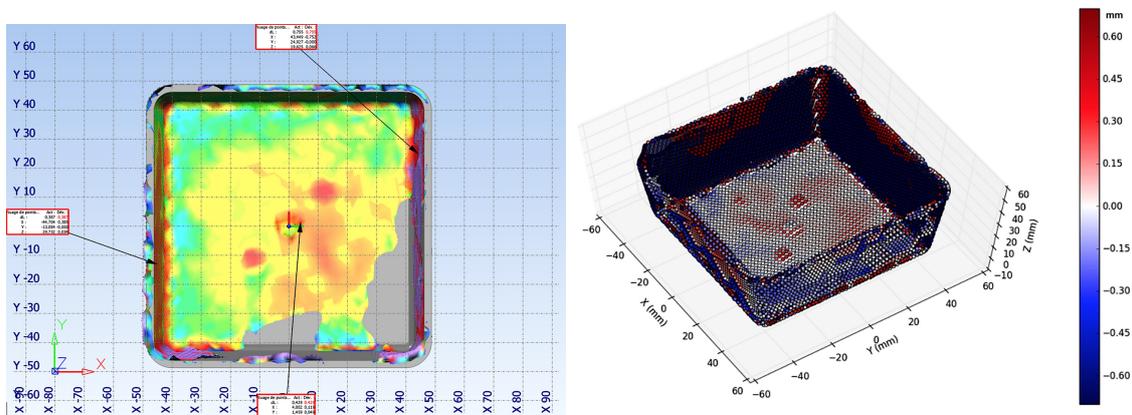


Figure 1.13 – Nuage de points de la pièce obtenue en cycle industriel avec le HandyScan.

la fréquence de balayage du laser. La Figure 1.13 b. présente de scanning. On observe la présence de trous dans le maillage des surfaces. D'une pièce à l'autre, les trous n'apparaissent pas aux mêmes endroits sur la pièce. Aussi, l'exploitation automatique d'une telle mesure est compliquée. Un traitement manuel des nuages de points est requis. Dans la suite de nos travaux, nous avons choisi de ne pas exploiter cette mesure à cause des performances non-adaptées de notre matériel. L'étude de cette démarche de mesure devra être évaluée à l'aide d'un profilomètre laser ou d'un scanner tridimensionnel qui possède une fréquence de balayage laser plus rapide, afin de limiter les trous dans le nuage de points.



(a) Interpolation du nuage de points à l'aide du logiciel *PowerInspect2017* de Autodesk. (b) Interprétation de l'écart des points de mesures à l'aide de la librairie Python *Matplotlib* [Hun07; Cas+19].

Figure 1.14 – Écart géométrique entre la pièce mesurée et la géométrie de référence de l'outillage.

Nous avons balancé le nuage de point à l'aide d'un critère de distance minimale entre les points et le modèle de référence (critère de moindres carrés). Il est ainsi possible de caractériser les variations de la géométrie.

1.4.4 Cahier des charges pour le contrôle de la qualité en ligne de production

Dans le cas de pièces techniques, les exigences du client peuvent atteindre 3,4 pièces défectueuses par million de pièces (3,4 ppm est la valeur couramment admise pour une approche « Six Sigma »). Il est alors indispensable de réaliser le contrôle qualité sur cent pourcent des pièces, avant l'envoi au client. Ce contrôle présente un coût et il devient intéressant de l'automatiser.

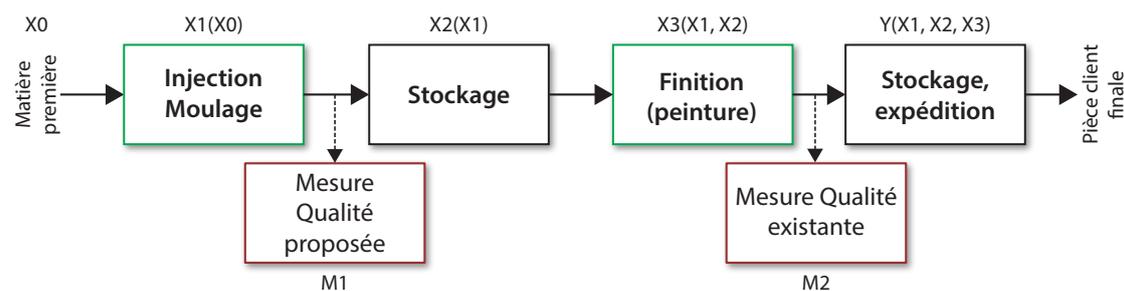


Figure 1.15 – Intégration du contrôle de la qualité

La Figure 1.15 présente l'intégration du contrôle de la qualité au sein de la ligne de production. Le contrôle de la qualité des produits est, de manière classique, réalisée après la finition des pièces. L'état de la pièce dépend alors des étapes précédentes de finition X_3 , de stockage X_2 , de transport et de l'injection-moulage X_1 . Des défauts peuvent apparaître lors des phases de transports, stockages et de finitions. Plus on multiplie le nombre d'étapes successives, plus il est difficile de trouver l'étape qui est la cause du défaut. De plus, si la pièce est défectueuse à l'étape de l'injection-moulage X_1 , elle entraîne des coûts de non-qualité : le coût du stockage de la pièce X_2 et le coût de sa finition X_3 . Le contrôle qualité en fin de chaîne de production ne permet pas d'éviter ces coûts. Pour l'ensemble de ces raisons, nous proposons de réaliser la mesure de la qualité du produit dès la sortie du moule d'injection, alors que les pièces sont encore chaudes. En plus d'éliminer les rebuts de la chaîne de production, il serait alors possible de construire un modèle de causalité entre les paramètres du procédé d'injection-moulage et les caractéristiques qualité de la pièce.

Le contrôle qualité est souvent réalisé de manière binaire : pièces conformes ou pièces non-conformes. Occasionnellement, des grilles de notation à critères peuvent être utilisées pour attribuer une note de la qualité. On réalise alors la moyenne géométrique de la note pour chacun des critères. Ce processus de notation est néanmoins beaucoup plus long. Il est réservé aux productions de pièces dont le prix de revient est élevé.

Les contraintes qui s'appliquent à la réalisation de la mesure du produit, au sein de la ligne de production, sont synthétisées dans le Tableau 1.3. Elles définissent le cahier des charges du dispositif de contrôle que nous cherchons à obtenir.

Une des contraintes du contrôle en ligne de production est que, si une mesure par prélèvement est réalisée, alors il est difficile de ré-intégrer la pièce prélevée au flux de production. Le contrôle de toutes les pièces sur la ligne de production apportent des bénéfices suivants :

- la traçabilité des pièces pour le client, qui dispose d'une fiche de qualité pour chaque pièce,
- l'analyse des performances du procédé et son optimisation,
- l'assurance de respecter les exigences du nombre de pièces défectueuses par lot.

Le contrôle à cent pour-cent nécessite alors d'être réalisée pendant le temps de cycle du procédé. La durée de la mesure est d'autant plus réduite que la pièce doit être amenée devant le dispositif de mesure. Il est nécessaire d'inclure la durée des voyages aller et retour. Enfin, il n'est pas envisageable d'augmenter la durée du cycle du procédé pour pouvoir réaliser la mesure, car cela impacterait très fortement le coût de la pièce de la presse. C'est pourquoi nous estimons que la durée de la mesure doit être au maximum de 10 secondes. Ainsi, le moyen de mesure doit être situé à proximité de la ligne de production. En admettant une vitesse de déplacement du convoyeur de 1 mètre par seconde (ce qui est élevée), le dispositif de mesure devra être situé à moins de 5 mètres de l'emplacement initial de la sortie de la pièce.

Cette contrainte de proximité du moyen de mesure dans la ligne de production implique une contrainte sur les dimensions du moyen de mesure. À partir de nos essais réalisés dans des ateliers de production, nous estimons l'encombrement acceptable à 1 mètre cubique. Il est également

Contraintes industrielles	Cahier des charges
Flux continu	Mesure de toutes les pièces
Durée du cycle	Durée de 10 secondes
Coût du moyen de mesure	Inférieur à 10 000 €
Type de défauts	Géométrie et couleur
Dimensions du défaut	10 micromètres à 1 mètre
Dimensions de la pièce	10 à 200 centimètres
Distance à la pièce	0 à 200 centimètres
Dimensions du moyen de mesure	Inférieure à 0,1 m ³
Taux de faux positifs	1 à 8 pièces par journée
Taux de faux négatifs	5 à 100 pièces par million

Tableau 1.3 – Contraintes industrielles et cahier des charges pour la contrôle en ligne de la qualité.

recommandé de limiter la complexité du câblage nécessaire à l’installation du moyen de mesure. Enfin, nous avons pour objectif de couvrir une large gamme de pièces plastiques. C’est pourquoi nous définissons des critères sur la dimension des pièces pouvant être mesurées, ainsi que sur la distance du moyen de mesure à la pièce. Dans le cas où le moyen de mesure utilise des capteurs optiques, cela permet de dimensionner la solution optique qui devra couvrir un angle de champ allant de 40° à 90°. Nous ajoutons une dernière recommandation qui concerne le contrôle dimensionnel des pièces plastiques souples : il est difficile de toucher ces pièces sans les déformer ; d’autant plus à la sortie du moule, quand elles sont encore chaudes. C’est pourquoi un moyen de mesure sans contact est à privilégier pour le contrôle des pièces souples.

Enfin, l’installation du dispositif de mesurage devra être simple et d’une durée inférieure à une heure, pour que sa mobilité soit réelle. Un tel dispositif de mesure s’inscrit dans la démarche de l’industrie agile, où les lignes de productions sont fréquemment reconfigurées, en fonction des besoins.

1.4.5 Proposition d’une définition du degré d’invasivité d’un système de mesure pour un procédé

Afin de compléter notre revue sur les différents moyens de mesure, nous proposons de définir une échelle du degré d’invasivité d’un système de mesure, au regard du procédé industriel. Nous proposons de définir la notion d’invasivité d’un moyen de mesure comme la quantité de travail nécessaire pour intégrer le moyen de mesure au procédé. Ces modifications sont effectuées sur le procédé, soit à posteriori de la fabrication du moyen de production, soit en amont pendant la conception du procédé. Le degré d’invasivité ne prend pas en compte le coût d’achat du moyen de mesure. En revanche, il prend en compte le coût de la modification du procédé, qui est un élément de décision important.

Le Tableau 1.4 présente une échelle originale du degré d’invasivité d’un moyen de mesure, vis à vis d’un moyen de production.

Dans notre travail, nous nous intéresserons à mettre en œuvre des moyens de mesures possédant une invasivité minimale ; ce qui correspond au degré 1 de notre échelle : on parlera de mesure non-invasive pour le procédé industriel.

Degré 0 Atteindre le degré 0 nécessite de ne pas réaliser de mesure. Le procédé ne doit pas générer

Degré d'invasivité	Type de mesure	Description de la modification
0	Pas de mesure	Aucune modification sur le procédé.
1	Sans contact	Positionnement d'un capteur vers la pièce.
2	Avec contact de la pièce	Convoyage de la pièce pour le contact.
3	Mesure sur la machine	Intégration de capteurs sur la machine.
4	Mesure dans l'outillage	Capteurs dans l'outillage pour les variables d'état.
5	Avec manutention humaine	Intégration de la mesure humaine.
6	Mesure hors-ligne	Extraction de la pièce de la ligne de prod. pour mesurer.

Tableau 1.4 – Degré d'invasivité de la mesure sur un procédé de production.

de rebuts, ou alors il est nécessaire de disposer d'une simulation informatique (modèle mathématique) du procédé. Ce modèle doit être suffisamment représentatif du procédé pour prédire les caractéristiques des pièces réellement produites. En 2019, il n'existe pas à notre connaissance de modèle capable de prédire l'aspect des pièces.

Degré 1 Les mesures ne nécessitent pas de contact. La durée de la mesure n'augmente pas la durée du cycle.

Degré 2 Le contact avec la pièce requiert une programmation précise du moyen de convoyage. Il nécessite l'utilisation d'un bras robotique, car un tapis n'est pas suffisamment précis.

Degré 3-4 L'intégration de capteurs dans l'outillage entraîne un travail de conception supplémentaire et une maintenance spécifique.

Degré 5 Une mesure qui nécessite une manutention humaine pour être réalisée est très invasive. En effet, l'humain est difficilement automatisable. De manière générale, une mesure industrielle doit être automatisée pour éviter que les erreurs et les retards n'impactent le flux de production.

Degré 6 La mesure hors-ligne entraîne la perte de la pièce, en plus de toutes les contraintes précédentes. C'est ainsi la mesure la plus invasive possible pour un procédé de production industriel.

1.4.6 Étude technico-économique du mesurage des caractéristiques du produit

Le Tableau B.1 présente des mesures qui peuvent être réalisées sur la pièce. Afin d'évaluer la compatibilité du moyen de mesure avec le temps de cycle industriel, nous précisons la durée totale de la mesure en incluant la durée du déplacement de la pièce vers l'appareil de mesure. Plus l'appareil de mesure est volumineux et nécessite une précision de positionnement, plus cette durée sera longue. Le coût par pièce correspond au coût d'utilisation d'une machine pour réaliser le contrôle à cent pourcent des pièces dès la sortie du moule. Les coûts économiques sont indicatifs, en 2019. En particulier, le coût horaire est calculé pour un amortissement du coût d'achat de la machine de mesure de dix années et une production de 120 pièces par heures, 300 journées ouvrées annuelles, soit 3 millions de pièces par an. Dans le cas où un opérateur humain est requis, le coût chargé est intégré : 15€ par heures, en 2019. Dans le cas où la mesure est automatisée, le coût de l'installation inclut le dispositif de convoyage (bras robotique ou tapis roulant) en plus du dispositif de mesure. Le détail des coûts est présenté dans le Tableau B.1 en Annexe. Ce tableau permet de mettre en valeur les moyens compatibles avec les contraintes industrielles. Les contraintes majeures sont la durée de la mesure et le coût de la mesure.

De plus, les productions industrielles doivent aujourd'hui être réactives aux changements ; on parle d'agilité. Aussi, dans une démarche d'évolution continue de la ligne de production, au fil des

changements de série, nous recommandons fortement l'utilisation d'un dispositif de mesure qui puisse être adapté rapidement à de nombreux types de pièce. C'est ici un avantage considérable des moyens de mesure sans contact physique avec la pièce.

Rappelons que nous sommes en présence de pièces chaudes; aussi, la thermographie est un moyen de mesure intéressant du point de vue du coût et de la rapidité. Nous détaillons l'emploi de la thermographie dans la Section 2.3. La polarimétrie est une méthode d'imagerie non-conventionnelle qui est aussi intéressante, en particulier pour les pièces transparentes, mais aussi pour la mise en valeur des défauts de surfaces. Nous détaillons son emploi dans la Section 2.4.

À partir du Tableau B.1, nous retenons les moyens de mesure qui répondent aux contraintes de coût, de durée de la mesure et de la simplicité de mise en place, pour la suite de nos travaux :

- plusieurs comparateurs instrumentés,
- profilomètre laser,
- scanner 3D §1.4.3.5,
- thermographie §2.3,
- imagerie couleur,
- polarimétrie §2.4.

1.4.7 Formalisation de la notion de qualité d'une pièce

Aucune norme ne spécifie actuellement la notion qualité d'aspect. Plusieurs travaux de recherche sont en cours, sur la notion de sensation tactile [Alb+16a; Alb+16b; Alb+17; Alb+19; Alb19] et sur l'aspect visuel [Des+15]. Ces travaux associent une démarche de spécification de la qualité, aux développements de nouveaux moyens de mesures [Des15a; Pit16; Lac18].

Les pièces produites en injection-moulage des thermoplastiques possèdent une grande variété de dimension, de forme et d'état de surface. Au sein d'une même entreprise, un système de contrôle de la qualité doit donc être capable de mesurer une grande variété de pièces. Nous chercherons à simplifier au maximum l'utilisation de notre système de mesure afin de maximiser son adoption industrielle.

La qualité d'aspect est une notion qui est souvent définie dans les cahiers des charges sous la forme de défauts et d'échelles. L'interprétation de ces définitions nécessite le travail d'un expert qualité humain. L'expert qualité possède généralement la notion de la qualité du produit pour un atelier de production. Il forme les opérateurs, afin de leur transmettre les exigences qui sont interprétées à partir du cahier des charges. Cependant, il est difficile de transmettre ce savoir. De plus, il est difficile d'obtenir une mesure répétable de la qualité par différents opérateurs. Dans nos travaux, nous chercherons à automatiser cette interprétation. Notre principal objectif de recherche est d'exploiter l'information issues des capteurs afin de proposer une mesure de la qualité d'aspect et de la géométrie. Notre système réalisera l'interprétation des mesures à partir d'un modèle de la qualité construit par apprentissage. Cette démarche est détaillée dans le Chapitre 3. À terme, l'objectif est de proposer un modèle de la qualité qui serait générique à tous types de pièces; ce modèle serait équivalent à un humain formé à l'expertise qualité; il serait capable d'inspecter tous types de pièces et de détecter les défauts communs : manque de matière, retassure, brûlure.

1.5 Conclusion : la problématique du contrôle de la qualité en ligne de production

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté le contexte du procédé d'injection-moulage des thermoplastiques dans lequel s'inscrit ce travail de doctorat §1.1.

À partir d'une étude bibliographique (Annexe A), nous avons présenté les principaux travaux sur la maîtrise du procédé d'injection-moulage. Cela nous permet de mettre en évidence une limite importante de cette thématique : le manque de moyen de mesure en ligne de production des caractéristiques du produit. Nous avons positionné l'intérêt de notre travail sur le contrôle non-invasif de la qualité en ligne de production pour la maîtrise du procédé d'injection-moulage.

Dans le second partie de ce chapitre, nous avons présenté la problématique industrielle que nous cherchons à résoudre dans nos travaux de recherche. Il s'agit de répondre au besoin de mesurage des caractéristiques du produit en ligne de production. Nous mettons en évidence les principales contraintes industrielles. Le coût du moyen de mesure doit être faible par rapport au coût de la production de pièces non-conformes. Le mesurage doit être réalisé pendant la courte durée du cycle du procédé. L'analyse de la mesure doit permettre de déterminer si la pièce est conforme ou non-conforme. Le contrôle de la qualité, si il est réalisé après l'étape de moulage de la pièce, permet d'écarter les pièces non-conformes de la chaîne de production. L'économie réalisée correspond à la valeur qui aurait été ajoutée à des pièces non-conformes lors des étapes suivantes de la chaîne de production.

Enfin, pour réaliser le contrôle de la pièce, il est nécessaire d'interpréter le résultat de la mesure. Dans le cadre des défauts géométriques, il existe des solutions de contrôle automatique de vision informatique. Cependant, nous nous intéressons également dans le cadre de notre travail aux défauts d'aspect. Aujourd'hui, l'expert qualité humain est requis pour interpréter l'aspect d'une pièce. Un objectif de recherche concerne l'interprétation de la mesure et la formalisation de la notion de qualité d'aspect.

Synthèse : Problématique industrielle et périmètre de recherche

Ce chapitre nous a permis de présenter nos premières contributions. Une revue bibliographique des approches de contrôle et de pilotage dans le cadre de la maîtrise du procédé d'injection plastique nous a permis de positionner notre problématique de recherche.

Nous avons également défini le périmètre de notre recherche autour de la mise en œuvre d'un système de contrôle non invasif des pièces, dès la sortie du moule. Nous utiliserons des méthodes d'imageries comme moyen de mesure sans contact des pièces. Le principal enjeu technologique de nos travaux sera d'exploiter ces images afin d'évaluer la qualité et de pouvoir discriminer les pièces conformes des pièces non-conformes.

2

Apport de l'imagerie non-conventionnelle pour la mesure non-invasive de la qualité

La mesure des caractéristiques d'une pièce est un pré-requis indispensable à la maîtrise de la qualité. Dans ce chapitre, nous discuterons du choix des capteurs pour mesurer des pièces plastiques en ligne de production, juste après la sortie du moule. Une expérimentation permet de justifier de l'intérêt de la thermographie et de la polarimétrie. Nous exploiterons l'information de ces mesures afin de déterminer la conformité des pièces.

Sommaire

2.1	Contexte de l'essai expérimental	34
2.1.1	Exploration du procédé par plan d'expériences	34
2.1.2	Sélection des paramètres de l'étude expérimentale	35
2.2	Évolution des pièces moulées après la sortie du moule	37
2.3	Apport de la thermographie pour le contrôle de la géométrie des pièces	39
2.3.1	Essai expérimental de thermographie des pièces en sortie du moule	39
2.3.2	Extraction de la géométrie à partir de l'image thermique	41
2.4	Apport de la polarimétrie pour le contrôle des défauts d'aspect	45
2.4.1	Polarimétrie pour mettre en valeur les défauts des pièces plastiques	45
2.4.2	Conception d'un capteur polarimétrique bas-coût	46
2.4.3	Apport de la polarimétrie sur les performances d'un classifieur de la qualité	50
2.5	Traitement et fusion de l'information issue de mesures multimodales	53
2.5.1	Nécessité de l'extraction de l'information pertinente	53
2.5.2	Traitement d'images amont	54
2.5.3	Descripteurs statistiques	54
2.5.4	Sélection automatique de descripteurs pertinents	59
2.5.5	Description d'images par apprentissage statistique	60
2.6	Synthèse et perspectives	61
2.6.1	Synthèse : la mesure non-invasive en cycle industrielle	61
2.6.2	Perspectives de recherche	61

Dans ce chapitre, nous discuterons de l'intérêt de méthodes d'imageries non conventionnelles pour mesurer les caractéristiques des pièces. Nous présenterons nos travaux expérimentaux afin de valider l'intérêt de mesures par imagerie non-conventionnelle : thermographie §2.3 et polarimétrie §2.4.

L'imagerie conventionnelle consiste en l'acquisition et le traitement de signaux sous forme d'images, dans le domaine spectral du visible (longueur d'ondes dans le vide de 380 à 780 nanomètres). À contrario, l'imagerie non-conventionnelle concerne les domaines spectrales qui ne sont pas visibles, ainsi que les méthodes d'acquisition et de traitement qui ne forment pas une image. En particulier, nous discuterons de l'imagerie dans les spectres infrarouges intermédiaires et lointains (3 000 à 15 000 nanomètres), qui permettent de mesurer l'émission thermique des pièces. Nous discuterons également de l'acquisition d'images polarisées des pièces. Enfin, nous discuterons des méthodes de fusions et d'exploitation des données de ces images, afin de qualifier les caractéristiques des pièces.

2.1 Contexte de l'essai expérimental

Dans cette section, nous présentons le contexte de l'essai expérimental sur lequel s'appuie les résultats de nos travaux. Il s'agit de la production de 204 pièces "boîte noire" au Centre Technique IPC (voir la Figure 2.3). La production a été réalisée en Juillet 2018 sur une presse à injecter *Billion 200T H150/470-200*, qui possède une force de fermeture et maintien de 2 000 kilo Newtons pour le vérin d'injection principal. Un bras robotique *Staubli* est utilisé pour le déchargement de la pièce et le convoyage devant les dispositifs de mesure. La matière utilisée est un polypropylène automobile *ExonMobil EXXTRAL CMU201* de couleur noire. Les réglages de la machine ont été ajustés suivant le plan d'expériences de criblage qui est présenté dans la Section 2.1.1 suivante.

Plusieurs mesures ont été réalisées sur les pièces chaudes, dix secondes après leur sortie du moule : scanning 3D, mesure d'une dimension géométrique avec un comparateur (voir la Figure 2.1), pesée, imagerie visible, imagerie thermique. L'ensemble des mesures a été automatisé à l'aide du bras robotisé qui est traditionnellement utilisé pour décharger la pièce du moule (voir la Figure 1.12). De plus, la qualité des pièces a été évaluée par expertise humaine trois jours après la production. La méthode d'évaluation est détaillée dans la Section 3.1.3.1 du Chapitre 3 suivant.

2.1.1 Exploration du procédé par plan d'expériences

Pour construire un jeu de données représentatif du procédé d'injection-moulage et de la pièce en présence, il est nécessaire de parcourir la plus grande variété possible de réglages machine.

Les plans d'expériences sont intéressants pour sélectionner les essais à réaliser pour modéliser un phénomène. Il s'agit de méthodes qui permettent d'ordonner la réalisation d'essais expérimentaux et de spécifier les modifications à réaliser sur les variables. L'objectif est de limiter le nombre d'essais à réaliser. Il est également possible d'associer la complexité (ou le degré polynomial) du modèle, avec le nombre d'essais pouvant être réalisé. Un petit nombre d'essais permettra de construire un modèle linéaire, tandis qu'un plus grand nombre d'essais pourrait permettre de réaliser un modèle quadratique. En 1935, FISHER [Fis74] propose un ouvrage de référence sur le sujet de la construction et de l'analyse des plans d'expériences. Nous présentons dans l'Annexe D les principaux plan d'expériences de la littérature.

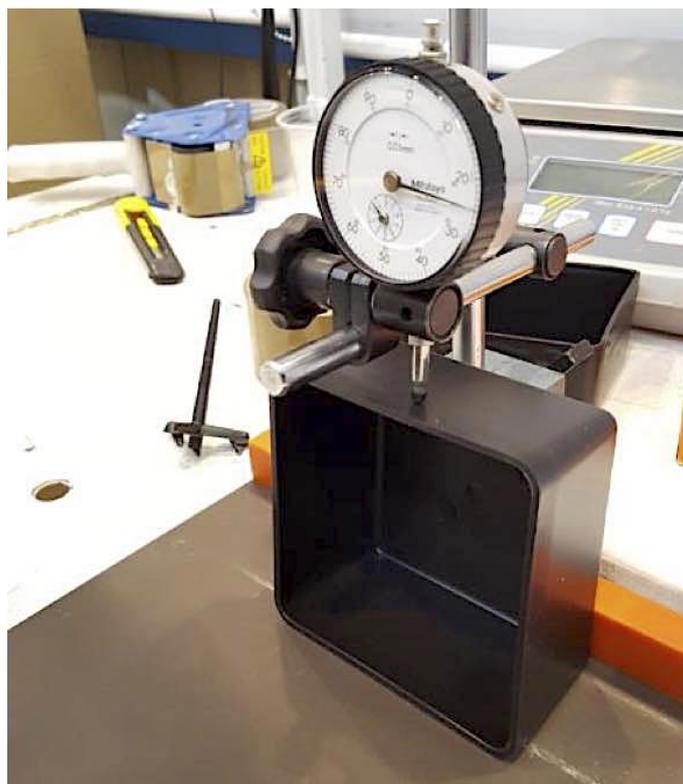


Figure 2.1 – Mesure d'une dimension géométrique de la boîte noire à l'aide d'un comparateur.

2.1.2 Sélection des paramètres de l'étude expérimentale

En amont de la réalisation des essais et du travail de modélisation, il est nécessaire de sélectionner les variables à étudier. L'expertise des partenaires du projet FUI SAPRISTI a permis de retenir 11 variables pertinentes à prendre en compte dans la réalisation du plan de criblage. Ces variables sont celles qui influencent le plus les caractéristiques des pièces plastiques. Le Tableau 2.1 référence les variables de réglage du procédé que nous avons sélectionnées. Les variables "critiques" ne sont pas étudiées dans le plan d'expériences. En effet, leur bon réglage est nécessaire pour produire une pièce complète. C'est pourquoi le réglage de ces paramètres est réalisé en amont du plan d'expérience, par un technicien-régleur expert. Suite à la sélection des variables étudiés, un ordre de priorité est défini, d'après les connaissances des experts.

Le procédé d'injection-moulage est séquentiel, c'est pourquoi il est possible de régler certaines consignes sous la forme de séquences temporelles ; par exemple des paliers successifs de pression de maintien, en fonction de l'avancement du cycle d'injection. En pratique, sur notre pièce simple, cette possibilité n'est pas réalisée. Au contraire, en injection multi-buses séquentielle, le réglage des séquences temporelles est crucial pour obtenir une pièce de bonne qualité. Le nombre de valeurs de réglages de ces paramètres séquentiels est très élevé, c'est pourquoi les plans d'expériences ne sont plus adaptés à leur étude exhaustive. Un point de fonctionnement doit être initialement trouvé : c'est l'étape du réglage initial. Elle est réalisée par le technicien régleur. Par la suite, une exploration du procédé pourra être réalisée autour de ce point de fonctionnement.

L'analyse des résultats obtenus permet d'obtenir une modélisation de la réponse en fonction des valeurs des paramètres du procédé. La réponse ici étudiée est la qualité de la pièce, c'est à dire ses caractéristiques. Le modèle obtenu permet de mettre en évidence les paramètres les plus influents sur la qualité. Il est alors possible de négliger les variables qui n'ont pas ou peu d'influence. Nous n'avons cependant pas choisi d'exploiter cette information car nous cherchons à produire un moyen de mesure de la qualité adapté à différentes machines. Le nombre d'essais réalisés dans le plan d'expériences est défini par le nombre de variables, le nombre de niveaux

Priorité		Variable de réglages	Identifiant	Niveau -1	Niveau 0	Niveau 1
1	Critique	Vit. de rentrée des éjecters	/	/	optimale	/
1	Critique	Durée de maintien	/	15 s	15 s	15 s
1	Critique	Débit thermorégulateurs	/	/	optimal	/
1	Critique	Course d'ouverture	/		optimale	/
1	Testée	Température fourreau	T-four	220°C	240°C	260°C
2	Testée	Temp. thermo-régulateurs	T-therm	20°C	40°C	60°C
3	Testée	Pression de maintien	P-main	100 hPa	200 hPa	300 hPa
4	Testée	Vit. d'ouverture outillage	v-ouve	100 mm/s	110mm/s	120mm/s
5	Testée	Course d'injection	C-com	80 cm ³	83 cm ³	86 cm ³
6	Testée	Vitesse d'injection	v-inj	50 cm ³ /s	70 cm ³ /s	90 cm ³ /s
7	Testée	Contre-Pression	C-ouv	30 hPa	50 hPa	70 hPa
8	Testée	Délais de dosage	t-reta	1 s	5 s	10 s
9	Testée	Vitesse de rotation de vis	v-rot	50 tr/min	100 tr/min	150 tr/min
10	Testée	Force de fermeture	P-ferm	1000 kN	1500 kN	2000 kN
16	Testée	Course de dosage	C-dos	90 cm ³	100 cm ³	110 cm ³

Tableau 2.1 – Sélection des variables pour l'étude.

choisis et le choix de la construction du plan. Dans le cas des plans factoriels, le nombre d'essais à réaliser augmente rapidement. Dans le cadre d'une première série d'essais, il est intéressant de choisir un plan orthogonal à deux niveaux qui comporte peu d'essais. Cela permettra d'étudier les interactions sous forme linéaire, afin de pouvoir affiner le modèle dans un plan suivant.

Nous avons conduit deux expérimentations par plans d'expériences sur des machines industrielles. Dans un premier temps, un plan d'expérience de criblage *L12* a été utilisé : 11 variables sur 2 niveaux [PB46]. La Section 2.1.1 précédente discute des constructions possibles de plans d'expériences et de l'intérêt des plans de criblage. Nous avons ajouté deux essais au centre pour étudier la répétabilité du procédé et deux essais de validation. Notre plan est détaillé en Annexe dans le Tableau D.1. La réalisation pratique de ce plan d'expériences a demandé 4 journées de 8 heures. Il a été choisi d'attendre la stabilisation du procédé avant de réaliser les mesures. La production de 20 à 40 pièces est requise pour être certain de la stabilité. Nous n'avons pas mesuré les 30 premières pièces produites lors du début de chaque expérience. Du point de vue de l'organisation des essais, la contrainte principale est la capacité thermique du moule. Aux vues de la masse d'acier en présence, la montée et la descente en température de l'outillage est très longue. C'est pourquoi nous avons ordonné les essais pour réaliser une montée progressive de la température de l'outillage¹.

1. En parallèle de ce travail de doctorat, COLLOMB a récemment proposé de réduire au maximum la capacité thermique de l'outillage et d'isoler les parois. Cela a permis de réduire le temps de cycle du moulage des composites [Col18]. Il serait intéressant d'étudier cette démarche, par exemple en prenant en compte les déformations de l'outillage sous les contraintes pour l'alléger.

2.2 Évolution des pièces moulées après la sortie du moule

La mesure pendant le cycle du procédé est réalisée sur des pièces encore chaudes, qui viennent de sortir de l'outillage. Leur température est comprise entre 50°C et 150°C. Les caractéristiques de la pièce chaude ne sont pas celles de la pièce finale.

Le polymère est un matériau viscoélastique. À l'état de fluide, les contraintes dues à une déformation de la matière disparaissent en quelques secondes. À long terme, les contraintes internes se relaxent [Gir01]. En revanche, lors du refroidissement de la pièce dans le moule, il y a création de contraintes internes. Ces contraintes sont la cause de l'hétérogénéité de la matière et de la géométrie du moule. GALESKI et RÉGNIER étudient les liens entre les propriétés mécaniques macroscopiques et la structure cristalline des pièces moulées [GR09]. La structure cristalline d'une pièce varie en fonction de l'épaisseur. Cela dépend des conditions des phases de maintien et de refroidissement. Les propriétés mécaniques, dont les contraintes internes, dépendent des conditions d'injection et de la géométrie des pièces.

De plus, pendant le refroidissement, la géométrie de la pièce se modifie. C'est le retrait : une réduction des dimensions de la pièce qui varie de l'ordre de 0,1% à 10%, selon le matériau et la géométrie.

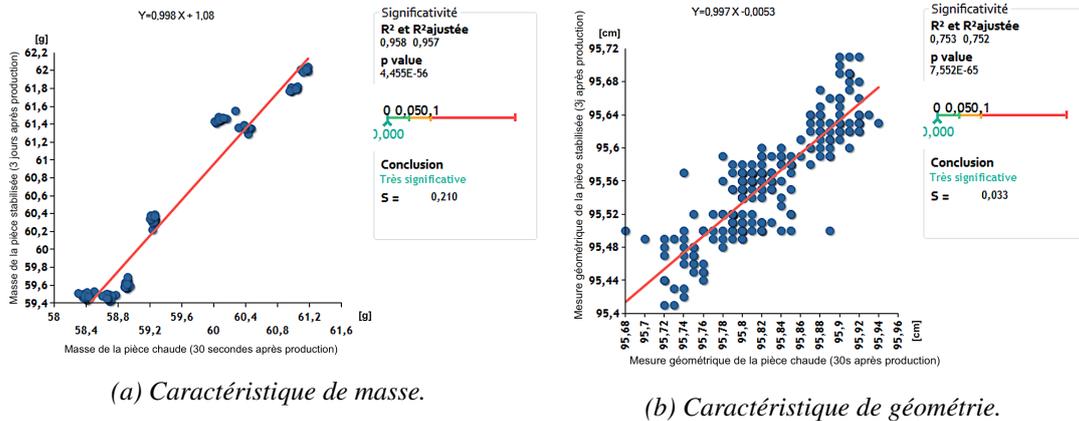


Figure 2.2 – Modèle linéaire entre les caractéristiques des pièces chaudes (30 secondes après production) et des pièces stabilisées (3 jours après production), Logiciel Ellistat¹.

Nous avons étudié l'évolution des caractéristiques sur une production de 204 pièces, présentée dans la Section 2.1 précédente. Cette étude a été réalisée pour un unique matériau et une unique pièce. Afin d'étudier l'ensemble de la plage de fonctionnement du procédé d'injection-moulage, nous avons ajusté les réglages de la machine selon un plan d'expériences de criblage. L'organisation de cet essai expérimental est détaillé au Chapitre 3.1 §2.1.2. L'étude propose la mesure d'une cotation géométrique et de la masse des pièces, trente secondes après la production puis trois jours après. Les pièces mesurées trois jours après la production sont considérées comme refroidies et leur géométrie stabilisée. Un modèle linéaire permet de modéliser la réduction d'une dimension géométrique avec une justesse $R^2 = 0,75$ et une significativité statistique élevée, au sens de la valeur-p qui est inférieure à 0,05. Aussi dans notre cas, nous avons observé que la réduction des dimensions (le retrait) est homothétique et peut être approximée par un modèle linéaire.

La Figure ?? présente les résultats obtenus. Il est intéressant de noter que la masse des pièces réduit de 0,2% lors de la relaxation. Il pourrait s'agir d'une perte de composés organiques volatils.

De plus, les caractéristiques d'aspect des pièces sont très proches, entre les deux instants de mesures. Les pièces qui possèdent des givrures ou des marques de brûlure les conservent. Enfin,

1. Site Internet de la société Ellistat.

nous avons observé que le retrait dimensionnel lors du refroidissement entraîne une diminution des défauts visuels d'aspect de type retassure (voir Section 1.2). Ces défauts sont causés par la courbure géométrique des surfaces ; ce sont des défauts de planéité. La Figure 2.3 présente des photographies d'une même pièce, avant et après le refroidissement. On observe que la planéité du fond de la boîte est visuellement similaire entre la pièce chaude et la pièce stabilisée. On observe également l'effet du retrait : les parois de la boîte sont incurvées après le refroidissement. En revanche, lors du refroidissement, les défauts de planéité diminuent, car la géométrie de la pièce se stabilise sur une position moyenne. C'est pourquoi, les défauts d'aspect qui sont causés par des variations géométriques sont plus prononcés quelques secondes après la production des pièces, que sur des pièces stabilisées. L'évolution de la pièce lors du refroidissement est simple à modéliser. Les caractéristiques des pièces finales sont proches des caractéristiques des pièces chaudes. Notre démarche de mesure des caractéristiques du produit, dès la sortie de la machine, s'appuie sur ce constat.



(a) 10 secondes après production.

(b) 3 jours après production.

Figure 2.3 – Photographie de l'aspect des pièces.

2.3 Apport de la thermographie pour le contrôle de la géométrie des pièces

L'imagerie thermographie d'un objet capture son émission thermique dans les domaines de l'infrarouge moyen et lointain (longueur d'onde de 3 000 à 15 000 nanomètres). Les caméras thermiques les plus courantes utilisent un grand nombre de capteurs de type micro-bolomètres non-refroidis (une image de 320 × 240 pixels utilise 76 800 micro-bolomètres). Un micro-bolomètre est composé d'un matériau semi-conducteur thermo-sensible. Lorsqu'il est soumis à un rayonnement infrarouge, le matériau chauffe et la résistance électrique du matériau qui compose le pixel varie. Les micro-bolomètres d'une caméra thermique FLIR que nous utilisons sont précis à 0,05°C en moyenne à une température ambiante de 30°C. La calibration de chacun des micro-bolomètres est réalisée en usine à partir de la mesure d'un corps noir de référence. Cependant, la mesure de température à partir de l'émission thermique d'une pièce nécessite de connaître le coefficient d'émissivité du matériau. Les matériaux que nous souhaitons étudier sont variés, aussi nous choisissons dans notre travail de nous affranchir de la connaissance de l'émissivité thermique et d'analyser les données brutes issues du capteur. Les données brutes sont les valeurs de l'émission infrarouge mesurée par les micro-bolomètres, encodées sur 16 bits.

Une méthode très répandue de contrôle non-destructif de l'intégrité des pièces mécaniques est la thermographie dynamique (aussi appelée thermographie active). Il s'agit de chauffer localement la pièce à l'aide d'une source de chaleur dirigée (par exemple un laser), puis de mesurer précisément l'évolution de la température de refroidissement. Cette mesure dure quelques secondes. Elle permet de mettre en évidence les différences de capacité calorifique; ce qui indique en particulier les changements de densité. Dans ses travaux de doctorat, LEGRAND propose une méthode de thermographie multi-spectrale afin de s'affranchir de la connaissance de l'émissivité de la surface contrôlée [Leg02]. De nombreuses applications industrielles de la thermographie dynamique mettent en évidence l'intérêt de la méthode pour le contrôle des pièces et des assemblages. Dernièrement, HERRMANN, MIGNIOT et AUBRETON propose d'utiliser cette méthode afin de contrôler rapidement des pièces transparentes [HMA19] : c'est la technique du *Scanning From Heating*, proposée pour la première fois par EREN et al. [Ere+09].

Dans le cas de la mesure de pièces moulées directement après la sortie du moule, les pièces sont déjà chaudes. C'est pourquoi la mesure thermique a un fort intérêt. Cependant, la pratique industrielle de l'imagerie thermique pour le suivi des procédés de production se résume, aujourd'hui, au suivi de l'évolution de la température de quelques régions d'intérêts de la pièce, qui ont été préalablement prédéfinies. Une analyse plus avancée des motifs de l'image peut être réalisée.

Dans le cadre de notre travail, nous ne chercherons pas à analyser des valeurs de température absolue. Nous n'avons pas non plus étudiée son évolution (nous discutons de cette perspective de recherche à la fin de ce chapitre en Section §2.6). Nous souhaitons analyser le champ de températures sur la surface de la pièce. Ainsi, la connaissance de l'émissivité du matériau n'est pas nécessaire. La principale difficulté de notre approche est l'analyse pertinente de l'ensemble des pixels de l'images. Il s'agit d'extraire une information pertinente à propos des caractéristiques de la pièce, à partir du champ de températures.

2.3.1 Essai expérimental de thermographie des pièces en sortie du moule

Nous avons étudié l'intérêt de la mesure thermique des pièces chaudes sur une production de 204 pièces. Les paramètres de la machine ont été variés suivant un plan d'expériences de criblage, discuté dans le Chapitre 3.1 §2.1.2. Nous avons réalisé une mesure par imagerie thermique pour chaque pièce chaude, 10 secondes après la sortie du moule. La caméra thermique utilisée était sensible sur une plage de longueur d'ondes de 7,5 à 13 micromètres. Le matériau utilisé est un polypropylène automobile, au degré de cristallinité supérieur à 70%. Nous n'avons pas caractérisé

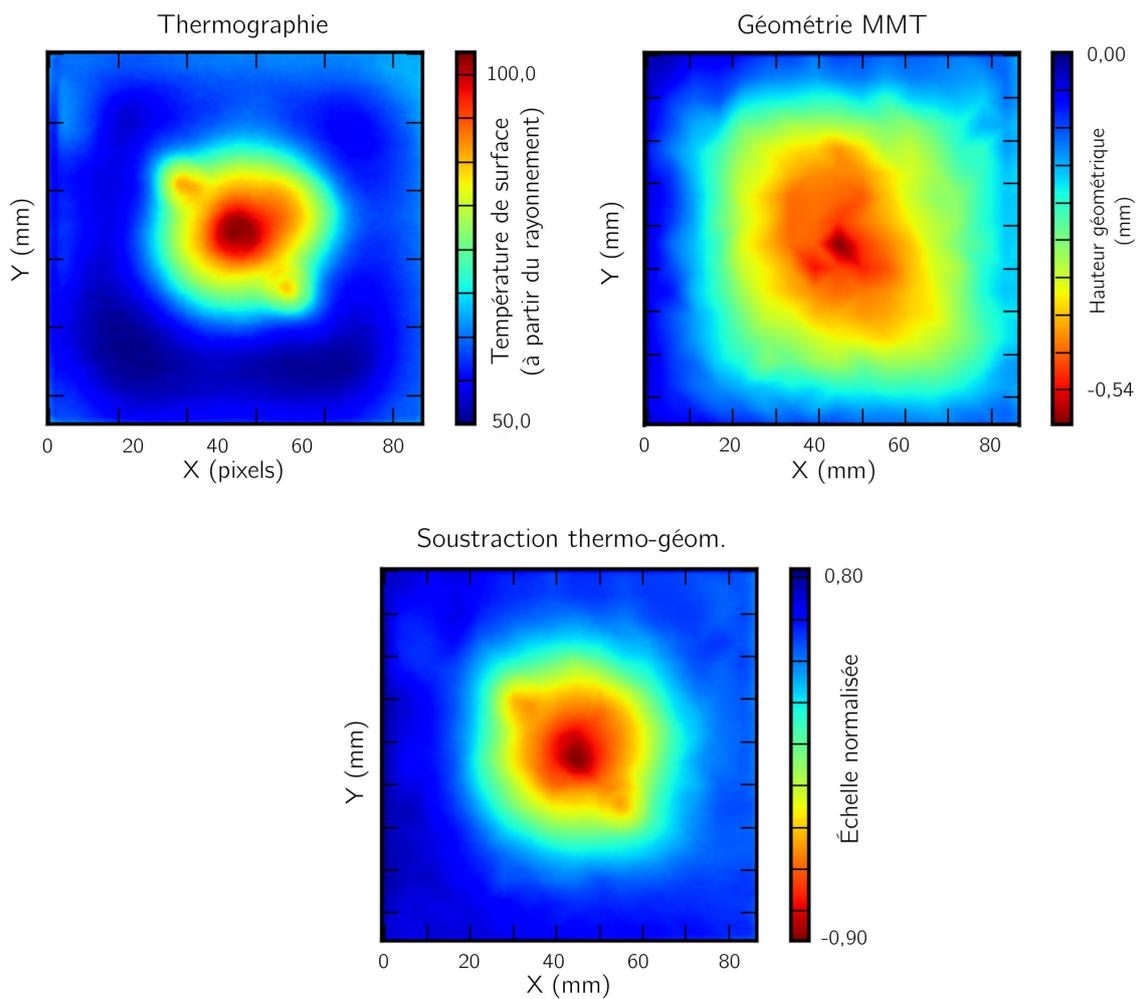


Figure 2.4 – Mesure thermique et mesure géométrique d'une pièce thermo-moulée.

l'émissivité thermique du polypropylène utilisé. Une émissivité $\epsilon = 0,97$, "classique" pour le polypropylène, est utilisée pour calculer la température de surface, dans les figures suivantes.

L'instant de mesure a été rendu répétable par l'utilisation d'un bras robotisé et par la synchronisation temporelle de la mesure. Trois jours après la production, nous avons mesuré la surface qui a été imagée à l'aide d'une Machine de Mesures Tridimensionnel Mahr MS222. 1000 points de mesure ont été réalisés à l'aide d'un capteur laser interférométrique. La Figure 2.4 présente le résultats des deux mesures réalisées : thermique et géométrique. Une soustraction des deux mesures montre qu'il n'y a pas de correspondance directe entre la géométrie et l'image thermique. Il semble exister une relation entre le point chaud central de la pièce (buse d'injection) et le défaut de planité géométrique.

2.3.2 Extraction de la géométrie à partir de l'image thermique

Dans l'étude "Generative Adversarial Networks for Geometric Surfaces Prediction in Injection Molding", nous avons cherché à déterminer si une information sur la géométrie de la pièce pouvait être obtenue par la thermographie [Nag+18]. Nous avons évalué la faisabilité de l'utilisation d'une unique image thermique pour obtenir la géométrie de la pièce. Sous réserve qu'une information sur la géométrie soit présente dans l'image thermique, il s'agit alors de construire un modèle qui relie l'image thermique à la géométrie.

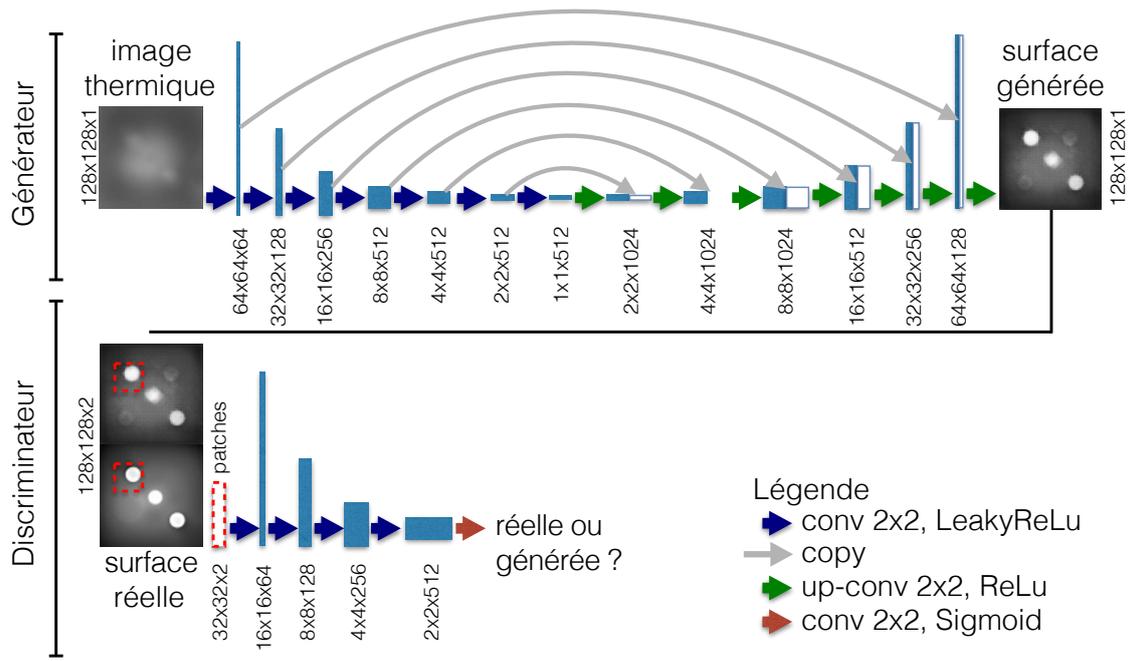
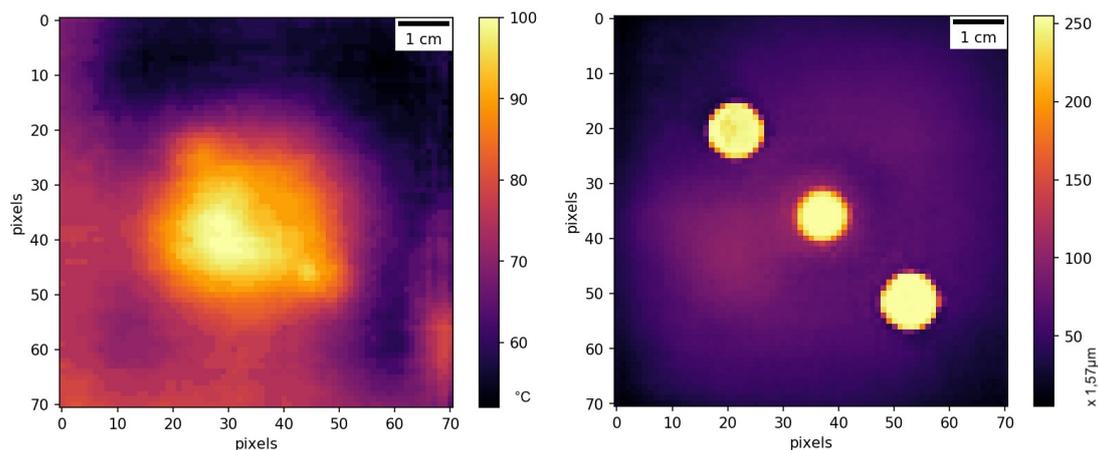


Figure 2.5 – Architecture du réseau antagoniste génératif U-Net, utilisée par le modèle pix2pix.

Nous avons évalué que l'utilisation de modèles polynomiaux ne permet pas de modéliser la relation entre une image thermique et une image géométrique. Il est nécessaire de disposer d'un modèle qui est adapté au traitement d'images. Les récentes avancées des réseaux de neurones profonds pour la transformation d'images nous ont poussé à évaluer l'utilisation de réseaux génératifs antagonistes (GAN, détaillé dans le Chapitre 3 §3.2.4.8). Nous avons utilisé la méthode *pix2pix*, proposée par ZHU et al. [Zhu+17]. La Figure 2.5 présente l'architecture du réseau de neurones *U-Net*, qui est proposée par RONNEBERGER, FISCHER et BROX [RFB15]. Un réseau extrait l'information pertinente dans un vecteur de petites dimensions, appelé espace latent. Le réseau génératif produit ensuite une image réaliste à partir de cette espace latent. L'espace latent contient uniquement l'information pertinente pour reconstruire la géométrie de la pièce.



(a) Image thermique de la pièce 10s après prod. (b) Image de l'altitude de la surface de la pièce.

Figure 2.6 – Présentation d'un échantillon du jeu de données, en fausse couleur.

Le jeu de données de notre étude est composé de couples d'images thermiques et d'images géométriques, présenté Figure 2.6 La valeur des pixels d'une image "géométrique" encode la mesure de hauteur de la surface. La géométrie de la surface de la pièce est obtenue à l'aide d'un microscope confocal Altisurf 520². Le réseau de neurones que nous utilisons est spécialisé dans le traitement d'images numériques de 8 bits. Aussi, les images que nous utilisons sont normalisées sur 8 bits, soit sur une plage de valeurs entières de 0 à 255. La perte de résolution de cette conversion est importante : le capteur thermique est précis à 0,05°C (ce qui ferait 2 000 valeurs entières), le microscope confocal à 0,1 micromètres (ce qui ferait 10 000 valeurs entières). L'image thermique que nous utilisons a une résolution de 0,902°C, tandis que la carte d'élévation de la surface a une résolution de 1,57 micromètres.

La durée de l'apprentissage du modèle est de 3 heures pour 37 couples d'images. Les poids de l'ensemble du réseau de neurones sont ajustés par apprentissage sur un jeu de données (méthode détaillée dans le Chapitre 3 §E.2.6). Le jeu de données comporte 37 pièces. Le nombre d'échantillons est faible car la durée de la mesure d'une pièce à l'aide du microscope confocal était de 45 minutes. Une perspective directe est de réaliser cette étude sur un plus grand nombre d'échantillons et une variété de pièces.

Par la suite, nous évaluons la capacité du modèle appris à transformer une image thermique en image géométrique. La Figure G.1 présente les résultats obtenus sur un jeu de données de test, qui n'a pas été utilisé pendant l'apprentissage. Afin de mesurer la similarité entre les images originales et les images générées, nous calculons les indicateurs les plus utilisés dans la littérature de la compression d'images. Nous n'avons pas réalisé de comparaison pixel à pixel car les images générées peuvent être légèrement translattées en comparaison des images originales. Nous calculons les coefficients de Similarité Structurale *SSIM* proposée par WANG et al. [Wan+04] et le *Peak Signal to Noise Ratio* pour la qualité de reproduction d'une image. Enfin, nous utilisons la Décomposition Modale Discrète comme méthode de comparaison de la similarité entre deux images. La Décomposition Modale Discrète décrit une image à partir de ses modes de vibrations spatiaux. Nous détaillons le principe de la Décomposition Modale Discrète dans la Section 2.5.3.2. Le Tableau 2.2 présente les résultats de ces comparaisons.

La similarité moyenne sur les 14 pièces du jeu de données de test est élevée et l'écart-type global est faible. Le jeu de données étant très petit, nous avons vérifié que la p-valeur est inférieure à 5%, pour toutes les mesures de similarité. La méthode *pix2pix* permet d'extraire, de l'image

2. [Spécifications techniques de l'Altisurf 520](#) sur le site Internet de la société Altimet.

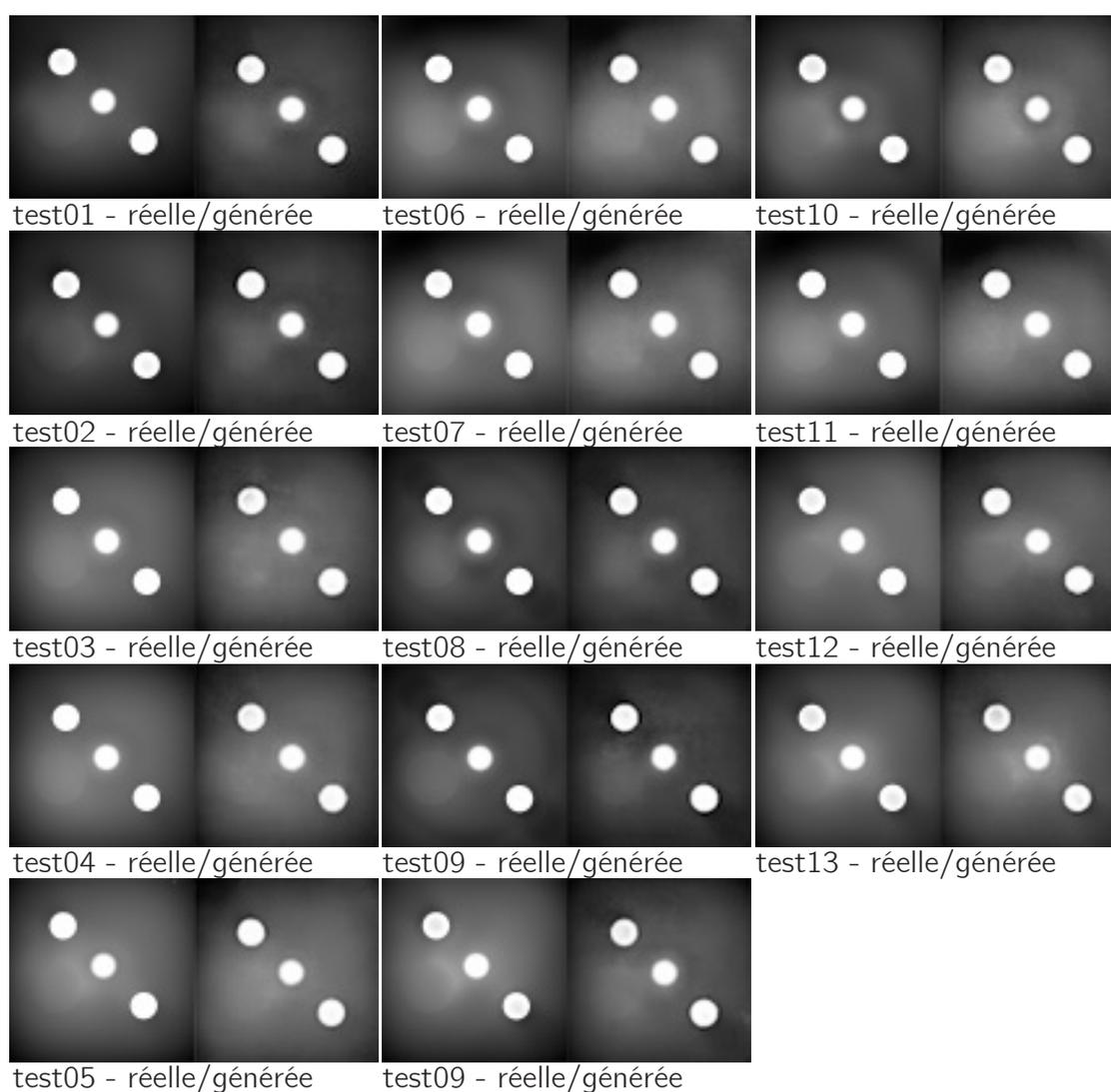


Figure 2.7 – Comparaison entre les images générées par le modèle à partir de l'image thermique et les images "géométriques" originales.

Mesure de similarité	Moyenne	Écart-type
Distance cosinus	0,9	0,10
Corrélation R^2	0,8	0,15
PSNR	18	3,95
SSIM	0,86	0,07
Distance cosinus sur DMD	0,99	0,08
Corrélation R^2 sur DMD	0,98	0,04

Tableau 2.2 – Performance du modèle pix2pix : similarité entre images générées et images originales.

thermique, de l'information sur la géométrie des pièces.

Bien que ces résultats soient encourageants, la durée de la phase d'apprentissage du modèle est de 3 heures sur une carte graphique puissante (*Nvidia GTX 1080Ti*). Il semble possible de pouvoir mettre à jour ce type de modèle à une fréquence journalière. Enfin, la robustesse de ce modèle aux perturbations est également difficile à évaluer sur cette faible quantité de données et cet unique cas d'étude.

Dans notre recherche d'une méthode de contrôle des caractéristiques de la pièce, il reste à interpréter cette géométrie prédite. Il s'agit de comparer la géométrie obtenue à la géométrie cible, qui doit être celle du produit final. Différentes méthodes de comparaison géométrique existent. Cependant, nous souhaitons proposer une méthode de contrôle de la qualité des pièces la plus simplifiée possible. C'est pourquoi nous choisissons pour la suite de notre travail de ne pas utiliser de modèle prédictif de la géométrie dans notre système de contrôle. En revanche, nous utiliserons la démarche d'extraction de l'information à l'aide de réseau de neurones profonds, qui a ici montrée des possibilités intéressantes (voir le Chapitre 3).

Synthèse : thermographie pour le contrôle de la géométrie des pièces

La conclusion principale de cette étude est que l'image thermique contient l'information de la géométrie de la pièce finale. Ainsi, suivre une dérive de la géométrie revient à suivre une dérive de l'image thermique.

Dans un objectif de contrôle de la qualité, l'analyse de l'image thermique permettrait de définir si une pièce est conforme ou est non-conforme, d'un point de vue géométrique.

2.4 Apport de la polarimétrie pour le contrôle des défauts d'aspect

La mesure du Degré de Polarisation Linéaire (DOLP) est utilisée dans de nombreux domaines techniques, dont le contrôle de la qualité de pièces composites³ et de bouteilles en verre [AE18]. Dans le cadre du moulage de polymères transparents, l'imagerie polarimétrique est couramment utilisée pour visualiser les contraintes mécaniques. Les polymères transparents ont des propriétés de biréfringence qui sont induites par l'organisation interne des chaînes des polymères [DVA95]. Les contraintes mécaniques appliquées à la pièce modifieront la biréfringence locale du matériau : c'est le phénomène optique de photoélasticité [Bre33]. Il est ainsi possible d'observer les contraintes mécaniques qui s'exercent. Cependant, il n'existe pas à notre connaissance de travaux dans le domaine de la détection des défauts sur les pièces moulées en plastique. C'est l'objet de l'étude présentée dans cette section.

2.4.1 Polarimétrie pour mettre en valeur les défauts des pièces plastiques

Les réflexions de la lumière à la surface d'un matériau peuvent être décomposées en une composante spéculaire et une composante diffuse [HK93]. La composante lumineuse diffuse est causée par le phénomène de transluminescence (*subsurface scattering*). La lumière entre dans le matériau ; où elle est absorbée et dispersée ; avant de sortir du matériau. La lumière est alors absorbée et diffusée en fonction de sa longueur d'onde. La lumière qui sort du matériau devient isotrope.

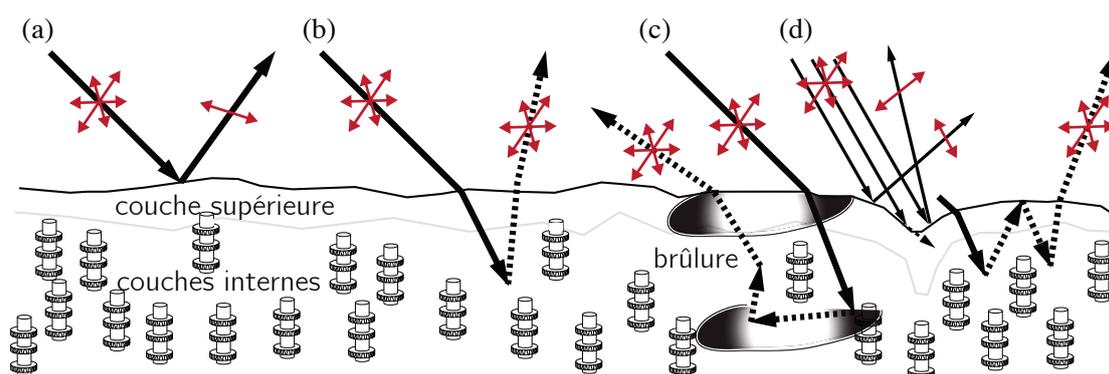


Figure 2.8 – Différentes composantes de réflexion d'un polymère semi-cristallin. (a) réflexion spéculaire, (b) réflexion diffuse, (c) réflexion diffuse sur un défaut structurel du matériau, (d) réflexion spéculaire sur un défaut de forme géométrique. Figure inspirée de [Deb+00]. .

À partir de ces connaissances physiques, nous cherchons à utiliser la mesure de l'angle de polarisation pour la détection de défauts sur les pièces plastiques. La Figure 2.8 présente l'effet de différents défauts sur la polarisation de la lumière réfléchie. La réflexion spéculaire est représentée par le rayon (a). La réflexion diffuse est représentée par le rayon (b).

Dans le cadre des matériaux semi-cristallins, nous posons deux hypothèses importantes pour la polarisation des réflexions :

- Un défaut géométrique (forme, retassure, rayure) modifie la courbure de la surface, ainsi il modifie l'angle de polarisation de la réflexion spéculaire : réflexion (d) Fig. 2.8.
- Un défaut qui modifie la structure de la matière (brûlure, givrage, pollution) diffuse la lumière incidente, ainsi la lumière que le défaut réfléchit est diffuse ; elle ne possède pas

3. Le Fraunhofer Institute for Integrated Circuits IIS a présenté la [solution de polarimétrie POLKA](#) pour le contrôle de pièces composites, lors du salon [Control Stuttgart 2018](#).

de composante spéculaire : réflexion (c) Fig. 2.8.

Dans la suite de cette section, nous évaluerons l'intérêt de la polarimétrie pour la mise en valeur des défauts sur un cas d'application industriel. Si nos hypothèses sont vérifiées, cela permettra de mettre en valeur séparément les défauts géométriques à l'aide de la composante spéculaire et les défauts de la structure de la matière à l'aide de la composante diffuse. Pour des questions de coût de l'équipement, nous utiliserons un capteur polarimétrique que nous avons conçu.

La mesure des composantes de réflexions spéculaires et diffuses d'un matériau est un enjeu important pour les rendus d'images photo-réalistes. En 1997, NAYAR, FANG et BOULT [NFB97] propose de mesurer la composante spéculaire, séparément de la composante diffuse, en utilisant un filtre polarisant. Selon les équations de Fresnel, une réflexion spéculaire est linéairement polarisée selon son plan d'incidence : réflexion (a) Fig. 2.8. À contrario, une réflexion diffuse n'est pas polarisée : réflexion (b) Fig. 2.8.

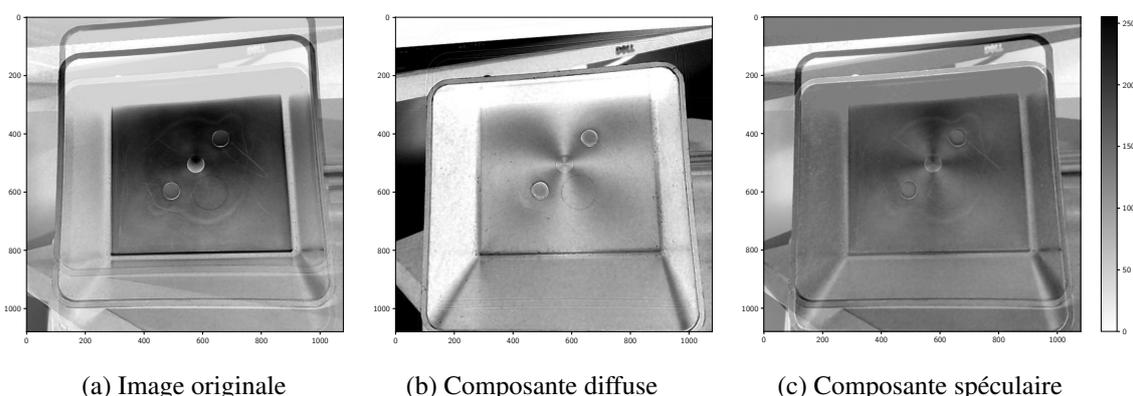


Figure 2.9 – Acquisition des composantes de réflexions spéculaire et diffuse.

En positionnant un filtre polarisant linéaire devant une caméra et en l'orientant selon un angle orthogonal à l'angle d'incidence de la source lumineuse, on capture uniquement la composante diffuse [Deb+00]. La même démarche, réalisée avec le polarisant orienté selon le même angle que l'angle d'incidence, permet de capturer la composante spéculaire, ainsi que la moitié de la composante diffuse. Il est alors possible de séparer la réflexion spéculaire et la réflexion diffuse, telle que la Figure 2.9 le montre. Sur ces images, on observe que, selon l'hypothèse émise, les défauts de forme géométrique du fond de la boîte sont mis en valeur dans l'image spéculaire, mais pas dans l'image diffuse. En revanche, les défauts qui ont modifiés la structure de la matière (ici des tâches de givrage et des impuretés) apparaissent peu dans l'image spéculaire, mais ils sont présents, de couleur sombre, dans l'image diffuse. Dans la suite de ce travail, nous chercherons à évaluer quantitativement l'apport de la polarimétrie pour les performances de la détection des défauts.

2.4.2 Conception d'un capteur polarimétrique bas-coût

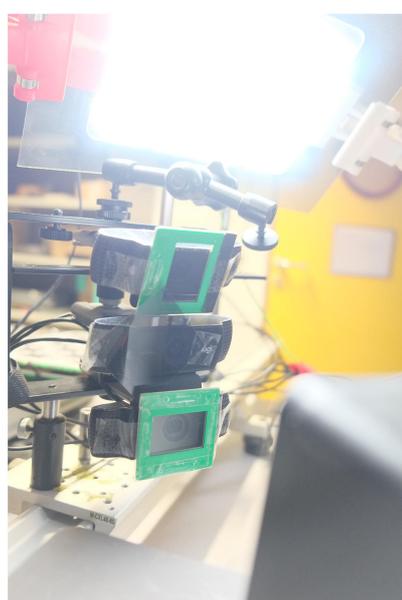
Les capteurs polarimétriques commerciaux actuellement disponibles sont coûteux (> 5000€). Cela s'explique par les technologies complexes qu'ils emploient pour obtenir une résolution élevée de la mesure du Degré de Polarisation Linéaire (DoLP). Cela nécessite un processus de calibration long. Aussi, ces capteurs sont principalement utilisés à des fins de recherches ou d'applications de surveillance civile et militaire.

Différentes méthodes de conception d'un capteur polarimétrique existent [Tyo+06]. La méthode la plus classique utilise 3 ou 4 caméras, qui imagent chacune la lumière selon un angle de polarisation linéaire différent. Plusieurs caméras sont superposées et un chemin optique spécialement conçu aligne précisément l'image des différentes caméras pour compenser la

différence de parallaxe. Les miroirs sans-teints sont couramment utilisés pour supprimer la parallaxe entre deux caméras [WA95]. Dans le cas où 3 caméras, ou plus sont utilisées, des miroirs et des prismes deviennent nécessaires. C'est le principe de la *division d'amplitude*.

La méthode de la *division du temps* utilise une caméra haute vitesse et un filtre polarisant, en rotation synchronisée avec la fréquence d'acquisition du capteur. Cela limite le nombre d'images par secondes de l'acquisition et cela limite la durée de vie à cause du système rotatif. Dans la même démarche, le filtre polarisant peut être remplacé par des cristaux liquides [GFB11].

Les capteurs polarimétriques peuvent aussi être construits avec un capteur unique. On parle de *division de l'ouverture* lorsque la surface du capteur est séparée pour acquérir différents degrés de polarisation. Plusieurs lentilles focalisent une image, qui a été polarisée par un filtre, sur une région différente du capteur. Cette méthode nécessite une compensation de l'écart de parallaxe créé par l'écart des différentes lentilles [Rio+15].



(a) 3 caméras superposées



(b) Mesure d'une pièce



(c) Correction de parallaxe

Figure 2.10 – Notre polarimètre et le procédé de calibration par homographie.

Enfin, on parle de *division du plan focal* lorsque ce sont les pixels du capteur qui sont directement polarisés. Des filtres polarisés sont directement intégrés sur le plan du capteur [Yam+16] (CMOS Sony *IMX250-MZR*, 5 millions de pixels⁴). Cela supprime la complexité optique, mais réduit la résolution finale de l'image par un facteur 4. Il est possible d'interpoler entre les angles de polarisation pour limiter cette perte, à la manière de la reconstruction d'une image couleur à partir de la matrice de filtre de Bayer. Le capteur *IMX250-MZR* dispose néanmoins d'une résolution d'acquisition de 2448×2048 pixels, soit une résolution de 1223×1023 pixels, ce qui est suffisant pour utiliser nos algorithmes.

Nous avons étudié la possibilité de réalisation d'un capteur polarimétrique au coût limité (inférieur à 1000€), avec une résolution satisfaisante de 1920×1080 pixels [Nag+19]. En comparaison, le coût des caméras basées sur un capteur à division de plan focal est de l'ordre de 2000€.

4. Informations sur le capteur polarimétrique *IMX250-MZR*, sur le site Internet du fabricant Sony.

Nous avons choisi de ne pas utiliser de système optique pour simplifier la construction. Notre capteur repose sur la fusion de trois caméras polarisées par des filtres linéaires à 0° , 60° et 120° (voir la Figure 2.10 (a)). Ces trois angles, espacés de 60° , permettent de modéliser l'ensemble du disque de polarisation linéaire dans la sphère de Poincaré⁵. Une source de lumière polarisée linéairement à 0° éclaire les pièces.

2.4.2.1 Choix des capteurs et correction de parallaxe

Nous utilisons des webcams grands publics Logitech C922⁶, pour leurs simplicités d'implémentation en USB et leurs qualités en condition de basse luminosité. Des caméras industrielles plus robustes peuvent être utilisées avec la même méthode.

Afin de compenser la parallaxe, sans système optique, nous utilisons une transformation logicielle. Dans un premier temps, nous calibrons la position du plan de fusion à l'aide d'une planche de référence composée de marqueurs *ChAruco* [Gar+14; Gar+16; RMM18]. Ensuite, nous utilisons la bibliothèque *OpenCV* [Bra00] pour calculer une transformation homographique entre les trois caméras (voir la Figure 2.10 (c)). La détection des marqueurs et l'association entre deux images est présentée dans la Figure 2.11. Le logiciel de fusion polarimétrique est distribué sous licence libre MIT, sous la forme d'un paquet Python. Le code source du paquet *camera-fusion* est disponible en ligne.



Figure 2.11 – Détection et association de marqueurs *ChAruco* entre deux caméras.

Il est important de noter que la parallaxe est compensée sur un plan unique. Ainsi, le vecteur de Stokes ne peut être reconstruit que dans ce plan. La parallaxe est une limite importante de notre système lorsque la surface de l'objet que l'on mesure n'est pas située sur le plan de la calibration. La différence de parallaxe dans notre système pourrait être exploitée. Une perspective intéressante à nos travaux serait d'utiliser la théorie *light-field*, à partir des 3 caméras qui possèdent un point de vue différent [Wil+05]. Il serait alors possible d'obtenir une information de polarimétrie en fonction de la distance, tel que le travail de GENDRE et al. [Gen+18] le propose. La reconstruction d'une carte de profondeur de la scène est également possible. La précision attendue n'est pas de l'ordre du micromètre, mais cette information complémentaire pourrait être utile afin d'évaluer la géométrie globale d'une pièce.

Cependant, afin de ne pas avoir à réaliser de calibration, notre approche est de ne pas corriger la parallaxe pour l'analyse des images. Nous analyserons les données brutes issues des capteurs, afin de classifier la qualité des pièces.

5. Pour reproduire la sphère de Poincaré, il est nécessaire de mesurer également la composante de polarisation circulaire, ce que nous ne faisons pas ici

6. Informations sur la webcam C922 sur le site Internet de la société Logitech.

2.4.2.2 Dimensionnement de la source lumineuse polarisée

La Figure 2.12 présente les images brutes pour une unique pièce. Dans ce cas spécifique, on observe que la dernière image est plus sombre que les autres. Cela est dû au fait que l'angle du filtre polarisant linéaire situé devant la caméra est orthogonale à l'angle de polarisation linéaire de la source lumineuse. La Figure 2.9 utilise cette propriété pour séparer les réflexions diffuses et les réflexions spéculaires.



Figure 2.12 – Images de la même pièce par les 3 caméras, sous 3 angles de polarisation différents.

Enfin, nous avons évalué qualitativement dans des ateliers de production l'effet de la lumière ambiante, non polarisée, sur la qualité de nos mesures. Nous employons une source lumineuse puissante de 8000 lumens pour pouvoir négliger l'effet de la lumière ambiante. Nous estimons que la moitié de la luminosité est perdue par la polarisation. Grâce au dimensionnement de notre source lumineuse, nous n'avons pas observé de problème lors des essais en atelier. En effet, les zones situés à proximité direct des machines sont souvent peu éclairées, car l'éclairage des ateliers est traditionnellement au plafond ; il est éloigné de plusieurs mètres des machines, tandis que notre dispositif mesure des pièces à une distance maximale d'un mètre. Nous recommandons néanmoins de vérifier qu'aucune source lumineuse directe ne risque de polluer les mesures. Une perspective à nos travaux sera d'évaluer quantitativement l'effet de la lumière ambiante non polarisée sur les performances de notre système.

2.4.2.3 Reconstruction du vecteur partiel de Stokes

L'équation de STOKES 2.1 permet de connaître l'intensité lumineuse de la réflexion, pour un degré de polarisation θ [Sto51] :

$$I(\theta, \Phi) = \frac{1}{2} [S_0 + S_1 \cos 2\theta + S_2 \cos \Phi \sin 2\theta + S_3 \sin \Phi \sin 2\theta] \quad (2.1)$$

À l'aide de notre dispositif, nous mesurons l'intensité lumineuse pour trois angles de polarisation linéaires θ espacés de 60° ; mais nous ne mesurons pas l'angle de polarisation circulaire Φ que nous définissons arbitrairement à zéro. Nous supposons que nos filtres polarisants sont idéaux et polarisent complètement la lumière. Aussi, nous négligeons la transmittance

perpendiculaire à leur angle de polarisation effective. À partir de 2.1, nous obtenons les Équations 2.2, 2.3, 2.4 :

$$I(\theta = 0^\circ) = \frac{1}{2}[S_0 + S_1] \quad (2.2)$$

$$I(\theta = 60^\circ) = -\frac{1}{4}S_0 + \frac{1}{2}\sqrt{\frac{3}{2}}S_2 \quad (2.3)$$

$$I(\theta = 120^\circ) = -\frac{1}{4}S_0 - \frac{1}{2}\sqrt{\frac{3}{2}}S_2 \quad (2.4)$$

On obtient le vecteur partiel de STOKES de la lumière réfléchie 2.5 [Li+14] :

$$S_{partiel} = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{3}I_0 + \frac{1}{3}I_{60} + \frac{1}{3}I_{120} \\ \frac{2}{3}I_0 - \frac{1}{3}I_{60} - \frac{1}{3}I_{120} \\ \frac{1}{2\sqrt{\frac{3}{2}}}I_{60} - \frac{1}{2\sqrt{\frac{3}{2}}}I_{120} \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

La Figure 2.13 présente les résultats de reconstruction obtenus. On observe les erreurs dues à la parallaxe sur une pièce qui n'est ici pas plane. Les mesures sur le fond de la boîte sont néanmoins exploitables. Cette évaluation est actuellement qualitative. Une perspective de ce travail sera d'évaluer la justesse de notre reconstruction sur des échantillons optiques de références.

2.4.3 Apport de la polarimétrie sur les performances d'un classifieur de la qualité

Dans "Polarimetric Imaging for Quality Control in Injection Molding", nous évaluons l'apport de la polarimétrie pour la détection des défauts sur les pièces plastiques [Nag+19]. Nous réalisons notre étude sur le jeu de donnée de 204 pièces "boîte noires", qui est présenté dans le Chapitre 3.1 §2.1.2. Les paramètres de la machine ont été variés suivant un plan d'expériences de criblage ; aussi, le jeu de donnée est composé de pièces qui possèdent une variété de défauts. La qualité de chaque pièce a été évaluée selon la méthode présentée dans le Chapitre 3.1 §3.1.3.1. À partir de cette évaluation, nous définissons deux types de pièces sur notre échelle de qualité : les pièces conformes dont l'indice de qualité est inférieur à 3, et les pièces non-conformes dont l'indice est supérieur. Les images enregistrées ont une résolution de 1920×1200 et nous avons dû sous-échantillonner cette résolution à 331×331 pixels pour réaliser l'analyse sur notre infrastructure informatique.

Nous comparons les performances d'algorithmes de classification de la qualité dans trois cas :

- Sans éclairage polarisé, ni filtres polarisants sur les caméras (*dataset_bench*),
- sans éclairage polarisé, mais avec des filtres polarisés sur les caméras (*dataset_nopola*),
- avec éclairage polarisé et filtres polarisés sur les caméras (*dataset_pola*).

La Figure 2.12 présente les images obtenues dans les trois cas par notre système. La classification est réalisée sur les images brutes issues des capteurs. Nous n'avons pas compensé la parallaxe, ni pré-traité les images. Nous discutons de l'intérêt du pré-traitement d'images dans la section suivante §2.5.2.

Dans le cadre de cette étude, l'algorithme d'apprentissage est considéré comme le meilleur possible, afin de négliger son influence. L'algorithme d'apprentissage est choisi et il est optimisé automatiquement par la méthode *TPO*T, qui est détaillée dans le Chapitre 3 §3.3.5. La durée de l'apprentissage du meilleur classifieur est de 15 heures.

Le Tableau 2.3 présente les scores de justesse obtenus avec le meilleur algorithme de classification, pour différentes conditions d'éclairage et de polarisation. La première ligne indique le score dans le cas où les images des trois caméras ont été utilisées. Les images brutes des capteurs sont concaténées dans une matrice de dimensions 993×331 . Les lignes suivantes indiquent le

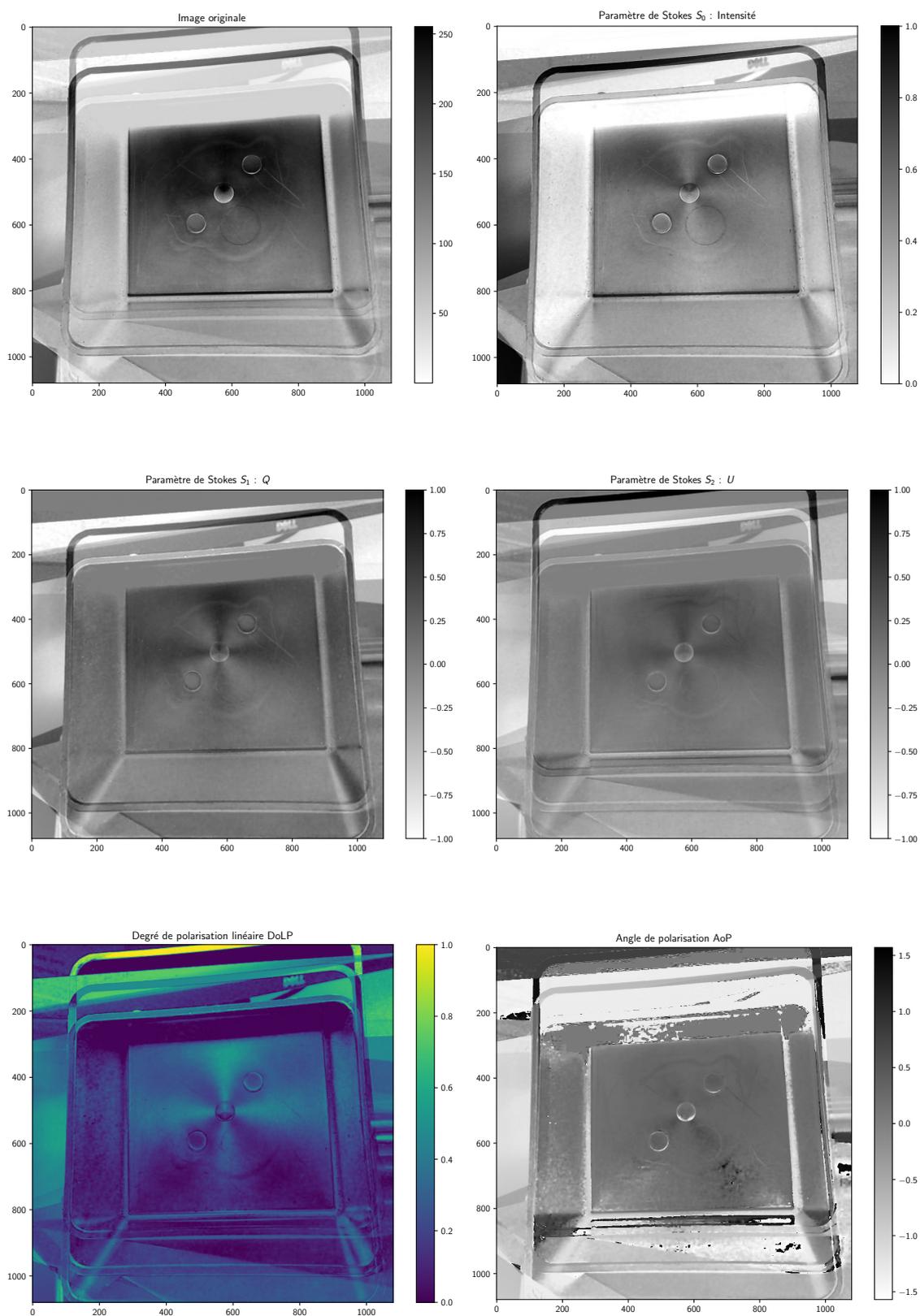


Figure 2.13 – Reconstruction des paramètres de Stokes partiels, du Degré et de l'Angle de Polarisation, à partir des images de 3 caméras.

Angle	<i>dataset_pola</i>	<i>dataset_nopola</i>	<i>dataset_bench</i>
3 angles	0,921	0,851	0,948
0°	0,841	0,831	0,923
60°	0,853	0,851	0,820
120°	0,812	0,830	0,889

Tableau 2.3 – Comparaison des scores de justesse de classification de la non-conformité.

score dans le cas où seule une caméra polarisée à un certain angle est utilisée. La première colonne est le score obtenu avec un éclairage polarisé. La seconde colonne est le score obtenu avec un éclairage non polarisé. Enfin, la dernière colonne est une mesure de référence : aucune caméra n'est polarisée et l'éclairage n'est pas polarisé.

On observe que l'utilisation des 3 caméras polarisées et de l'éclairage polarisé permet d'obtenir un score de classification plus élevé (justesse de 0,921). La polarimétrie semble apporter de l'information pour améliorer la détection des pièces conformes.

En revanche, l'utilisation des 3 caméras sans polarisation permet d'obtenir un score plus élevé que le système polarisé. Nous expliquons ce résultat par le fait qu'il existe de l'information supplémentaire pertinente dans la fusion des trois points de vue. De plus, les filtres polarisants pourraient dégrader une partie de cette information issue des trois caméras. Enfin, il est possible que notre système à faible coût occasionne un biais pour les données. Nous n'avons pas réussi à mettre en évidence de biais. Une perspective importante de nos travaux sera de réaliser la même étude à l'aide d'un polarimètre calibré, afin de valider définitivement si c'est la polarimétrie qui apporte de l'information, ou bien les différents points de vue des caméras.

Synthèse : polarimétrie pour le contrôle des défauts d'aspect

Notre étude montre l'intérêt de la polarimétrie pour la mise en valeur des défauts sur les pièces plastiques.

Les variations de la courbure de la géométrie des pièces peuvent être observées par la variation de l'angle de polarisation des réflexions spéculaires. Cela permet de mettre en évidence les défauts de retassure.

Les défauts qui modifient la structure de la matière peuvent être observés dans les réflexions diffuses, qui ne sont pas polarisées.

Pour le contrôle de la qualité, l'analyse de l'imagerie polarimétrique permettrait de déterminer le type de défaut en présence. Une étude approfondie reste à réaliser pour valider quantitativement l'intérêt de la polarimétrie, en comparaison de la seule analyse de plusieurs points de vue.

2.5 Traitement et fusion de l'information issue de mesures multimodales

Dans le cadre de nos travaux, nous avons évalué l'intérêt de deux techniques d'imageries non-conventionnelles, polarimétrie et thermographie, pour la mesure des caractéristiques d'une pièce. Nous cherchons désormais à combiner ces mesures. De nombreuses méthodes de fusions multimodales peuvent être appliquées.

Dans notre étude sur l'apport de la polarimétrie §2.4.3 [Nag+19], nous proposons de concaténer les images issues des capteurs et d'exploiter cette donnée en utilisant l'apprentissage statistique. Cette démarche peut être réalisée en ajoutant une image thermique aux données. On parle de "fusion amont" des données. Cette démarche est intéressante car un algorithme d'apprentissage statistique va pouvoir apprendre de la relation entre les différentes mesures. C'est la démarche que nous choisissons d'employer dans nos travaux.

Sur ces données concaténées, il est possible d'appliquer un méthode de réduction de l'information §2.5.3. Il est important que cette méthode ne détruise pas l'information pertinente contenue dans les mesures. C'est pourquoi nous avons privilégié dans nos travaux les méthodes de réduction de l'information par apprentissage non-supervisé. Dans le Chapitre §3, nous comparons différentes méthodes d'apprentissage non-supervisées sur nos données.

Dans cette section, nous présenterons en particulier les méthodes de filtrages que nous avons évaluées sur nos données. Enfin, nous détaillerons l'intégration logicielle des méthodes de fusion sur système embarqué, dans le Chapitre 4.

2.5.1 Nécessité de l'extraction de l'information pertinente

Nous supposons dans cette section que l'information pertinente est contenue dans les mesures issues des capteurs. Aucun algorithme ne peut extraire de l'information si elle n'existe pas.

Une perspective de nos travaux est de proposer l'ajustement en boucle fermée de la qualité des pièces. C'est pourquoi notre système de contrôle de la qualité doit respecter le temps de cycle du procédé, afin de pouvoir corriger les paramètres du procédé dès la pièce suivante. Doivent être inscrits dans le temps de cycle de production d'une pièce : le déplacement de la pièce devant le système de mesure, la durée de la mesure et la durée de l'analyse de la mesure. Si la durée de la mesure est de 10 secondes, la durée de l'analyse des mesures doit être proche de la seconde. Le contexte industriel demande une grande fiabilité et le respect de cette durée d'analyse de la mesure.

Nous avons évalué la faisabilité industrielle d'un traitement des mesures sur serveur distant (*Cloud*), qui disposent de moyens de calcul performants. La durée des calculs sur ces serveurs est de l'ordre de la milliseconde. En pratique, ce sont les problèmes de latence des réseaux informatiques qui ne permettent pas d'être certain d'une réponse inférieure à la seconde. Sans évolution de l'infrastructure réseau dans les ateliers de production, au vue de cette contrainte temporelle, la réalisation de l'analyse des mesures doit être effectuée sur un système de calcul embarqué, au plus proche des moyens de mesure.

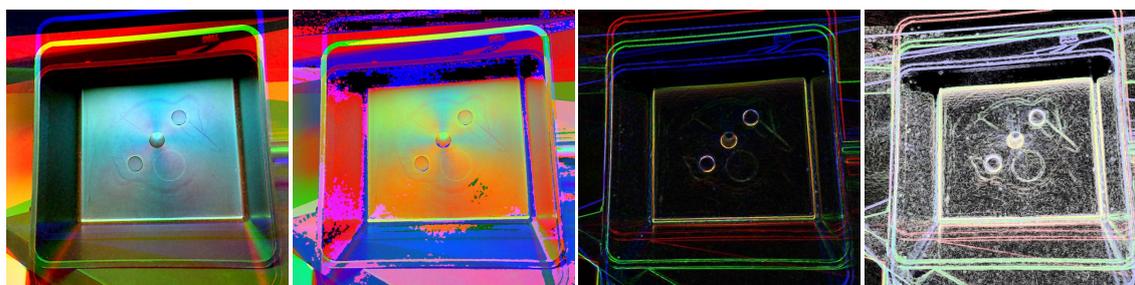
Aussi, plus la dimension de l'information issue des capteurs est réduite, plus l'inférence est rapide. La réduction de dimensions est aussi appelée "extraction de l'information" ou "compression de l'information".

Dans cette section, nous discutons de l'intérêt du traitement des images obtenues par nos capteurs, en amont de l'analyse des mesures §2.5.2. Puis nous présentons notre méthode d'extraction de l'information pertinente, à l'aide d'une sélection automatique de descripteurs statistiques §2.5.4.

2.5.2 Traitement d'images amont

Nous avons étudié la possibilité de mettre en valeur la présence des défauts d'aspect que nous souhaitons détecter. Notre hypothèse est simple : si un traitement d'image fait ressortir les défauts pour la vision d'un humain, ce traitement améliorera les performances du système informatique de détection des défauts.

Nous avons étudié l'effet de différentes méthodes de traitement d'image sur la performance de la classification de la qualité des pièces. La Figure 2.14 présente les différents traitements étudiés.



(a) $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ \rightarrow \text{RGB}$ (b) *Différence à $0^\circ \rightarrow \text{RGB}$* (c) *Diff.+gaussien+Sobel* (d) *(c) avec histo. optimisé*

Figure 2.14 – Illustration de différentes méthodes de pré-traitement des images issues des trois caméras polarisées.

En pratique, nous n'avons pas réussi à valider notre hypothèse. Toutes les méthodes de traitement que nous avons implémentées ont diminuées les performances de classification. Le traitement d'image semble détruire une partie de l'information pertinente. Aussi, à défaut de trouver un traitement idéal, nous recommandons de ne pas réaliser de traitement d'images et d'analyser les données brutes issues des capteurs. C'est l'intérêt des méthodes d'apprentissage statistique pour exploiter les données brutes. Ils construisent la méthode de traitement la plus appropriée de manière automatique.

2.5.3 Descripteurs statistiques

Nous utilisons des descripteurs de référence de la littérature. À contrario des méthodes présentées dans le Chapitre 3, il n'y a pas d'apprentissage. C'est l'humain qui conçoit les fonctions mathématiques des descripteurs. La limite à cette démarche est le manque de variété des descripteurs disponibles. À contrario, les méthodes par apprentissage de réseau de neurones permettent de créer des descripteurs spécifiquement adaptés aux problèmes à résoudre. Le réseau de neurones va apprendre la méthode : c'est la démarche de l'apprentissage de bout-en-bout (*end to end learning*) : à partir des données brutes on obtient le résultat attendu.

Dans notre étude "Quality Prediction in Injection Molding", nous avons choisi de balayer un large spectre de la vision par ordinateur [Nag+17]. 25 descripteurs statistiques ont été évalués :

- statistiques d'ordre inférieur à 2 :
 - minimum,
 - maximum,
 - moyenne,
 - médiane,
 - mode,
 - écart-type,
 - quantile 75 et 90,

- statistiques d'ordre supérieur :
 - quantile 75% et 90%,
 - assymétrie (*skewness*),
 - coefficient d'aplatissement (*kurtosis*),
 - 14 paramètres de HARALICK, SHANMUGAM et DINSTEIN,
 - 100 premiers modes de la Décomposition Modale Discrète.

Nous détaillerons le principe des paramètres de Haralick §2.5.3.1 et de la Décomposition Modale Discrète §2.5.3.2 dans les paragraphes suivants.

2.5.3.1 Description de la texture d'une image : paramètres de Haralick

En 1973, HARALICK, SHANMUGAM et DINSTEIN proposent 14 paramètres pour décrire la texture d'une image [HSD73]. Les travaux de doctorat de LACOMBE utilisent avec succès les paramètres de Haralick pour décrire des images, dans un objectif d'automatisation du contrôle de la qualité de pièces plastiques. Les paramètres de Haralick ont été largement utilisés dans la littérature du traitement d'images. C'est pourquoi nous avons étudié leurs apports pour la description de nos images thermiques et polarimétriques.

La méthode de Haralick nécessite le calcul de la matrice des co-occurrences des pixels voisins de l'image, appelée *Gray-Level Co-occurrence Matrix*. La matrice de co-occurrence G est carrée, de dimension N_g le nombre de niveau de luminance dans l'image. Pour une image classique 8 bits, $N_g = 256$. La matrice G est constituée de couples de valeur $P_{i,j}$ qui indiquent le nombre d'occurrence où un pixel de valeur i est adjacent à un pixel de valeur j , Équation 2.6. Pour une image 8 bits, on aura 255^2 couples p . HARALICK, SHANMUGAM et DINSTEIN proposent d'évaluer les co-occurrences entre les pixels selon 4 directions $\theta = 0, \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{4}, \pi$.

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} p(1,1) & p(1,2) & \cdots & p(1,N_g) \\ p(2,1) & p(2,2) & \cdots & p(2,N_g) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p(N_g,1) & p(N_g,2) & \cdots & p(N_g,N_g) \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Une distance d entre les couples de pixels comparées peut également être introduite. En pratique on choisit souvent $d = 1$ pour que les couples soient les voisins directs. La matrice finale est divisée par le nombre total R de comparaisons P effectuées $p_{i,j} = \frac{P_{i,j}}{R}$; R est fonction des dimensions de l'image. Chaque valeur de la matrice peut être considérée comme la probabilité qu'un pixel de valeur i soit adjacent à un pixel de valeur j , selon l'angle θ . Ainsi, pour une image évaluée sous 4 angles, la matrice de co-occurrence G a pour dimension $256^2 \times 4 = 262\ 144$. Pour une image couleur à 3 canaux, 3 matrices de co-occurrences sont calculées, une matrice par canal. Une image d'une profondeur de B bits à 3 canaux, de dimensions $N \times N$ pixels, possède une matrice de co-occurrences de dimension $N^2 \times 3B^2 \times 4$ valeurs.

Afin d'exploiter cette matrice qui est beaucoup plus volumineuse que l'image originale, HARALICK, SHANMUGAM et DINSTEIN proposent 14 descripteurs statistiques qui encodent une information sur la texture de l'image.

1. le second moment angulaire $\sum_i \sum_j p(i,j)^2$, qui mesure l'homogénéité de l'image,
2. le contraste $\sum_{k=0}^{N_g-1} k^2 p_{x-y}(k)$, qui mesure la quantité de variation locale,
3. la corrélation, $\frac{\sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} (ij)p(i,j) - \mu_x \mu_y}{\sigma_x \sigma_y}$, qui mesure la relation entre les niveaux des pixels voisins,
4. la variance, l'inertie) $\sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} (i - \mu)^2 p(i,j)$,

5. le moment différentiel inverse $\sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} \frac{1}{1+(i-j)^2} p(i, j)$ qui mesure l'homogénéité locale : il est élevé lorsque les niveaux des pixels locaux sont uniformes et réciproquement,
6. la moyenne des sommes $\sum_{i=2}^{2N_g} i p_{x+y}(i)$,
7. la variance des sommes $\sum_{i=2}^{2N_g} (i - \text{entropie})^2 p_{x+y}(i)$,
8. l'entropie des sommes $-\sum_{i=2}^{2N_g} p_{x+y}(i) \log(p_{x+y}(i))$,
9. l'entropie $-\sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} p(i, j) \log(p(i, j))$,
10. la variance des différences $\sum_{i=0}^{N_g-1} i^2 p_{x-y}(i)$,
11. l'entropie des différences $-\sum_{i=0}^{N_g-1} p_{x-y}(i) \log(p_{x-y}(i))$,
12. la première information sur la mesure de corrélation $\frac{\text{entropie-HXY1}}{\max\{\text{HX}, \text{HY}\}}$,
13. la seconde information sur la mesure de corrélation $[1 - \exp(-2(\text{HXY2} - \text{entropie}))]^{1/2}$,
14. le coefficient de corrélation maximum, qui est la seconde plus grande valeur propre de $Q(i, j) = \sum_k \frac{p(i,k)p(j,k)}{p_x(i)p_y(k)}$.

2.5.3.2 Filtrage d'image par décomposition modale

La problématique de la mesure des surfaces complexes a amené aux développements de méthodes de description de la géométrie des objets. Ces méthodes s'appuient principalement sur les théories du traitement de signal. Les méthodes de description géométrique les plus répandues sont :

- La transformée en cosinus discrète qui utilise des fonctions harmoniques en cosinus pour décrire les surfaces par leurs modes et leurs amplitudes. Cette méthode est souvent utilisée en traitement d'images et pour la compression de données.
- La décomposition en séries de Fourier, qui s'appuie sur la transformation de Fourier discrète. Cette méthode permet de décomposer une surface en un espace harmonique composé de fonctions sinus et cosinus. La décomposition obtenue est ainsi plus générale que celle obtenue par la Transformée en cosinus discrète.
- La transformée en ondelettes discrète, qui décompose la surface tridimensionnelle mesurée en fonctions d'une base composée d'ondelettes discret.
- La décomposition en harmoniques sphériques qui décrit des formes complexes dans un espace harmonique sphérique. Cette technique est notamment utilisée pour caractériser des formes dans un espace en trois dimensions.

En complément de ces travaux, la décomposition d'une forme par ses modes de vibrations a été proposée en 2007 par SAMPER et FORMOSA [SF07]. Puis, les travaux de doctorat de ADRAGNA ; FAVRELIÈRE [Adr07 ; Fav09] ont cherché à utiliser la Décomposition Modal Discrète (DMD) comme méthode de tolérancement et de spécification des formes géométriques complexes [Fav09].

Une décomposition modale décompose un signal dans une base spectrale, qui est construite à partir d'une base de modes propres. La base des modes propres est définie par ses vecteurs propres, aussi appelés "vecteurs modaux". La surface mesurée est alors projeté dans cette base propre ; elle est exprimée en terme d'amplitude des différents modes discrets. La base est construite à partir de la solution à un problème de mécanique vibratoire [Goï+16]. Récemment, GOÏC et al. [Goï+11] a montré que la DMD peut être utilisée pour caractériser des géométries globales (défauts de formes), ainsi que des géométries locales (rugosités).

Lorsque la DMD est utilisée pour un problème de géométrie plane, les modes correspondent aux modes propres de la vibration d'une plaque plane. Contrairement aux publications précédentes qui s'appuient sur des logiciels d'analyse par éléments finis pour obtenir les modes de vibrations (théorie des poutres épaisses de Timoshenko [Tim37]), nous construisons une base modale à partir

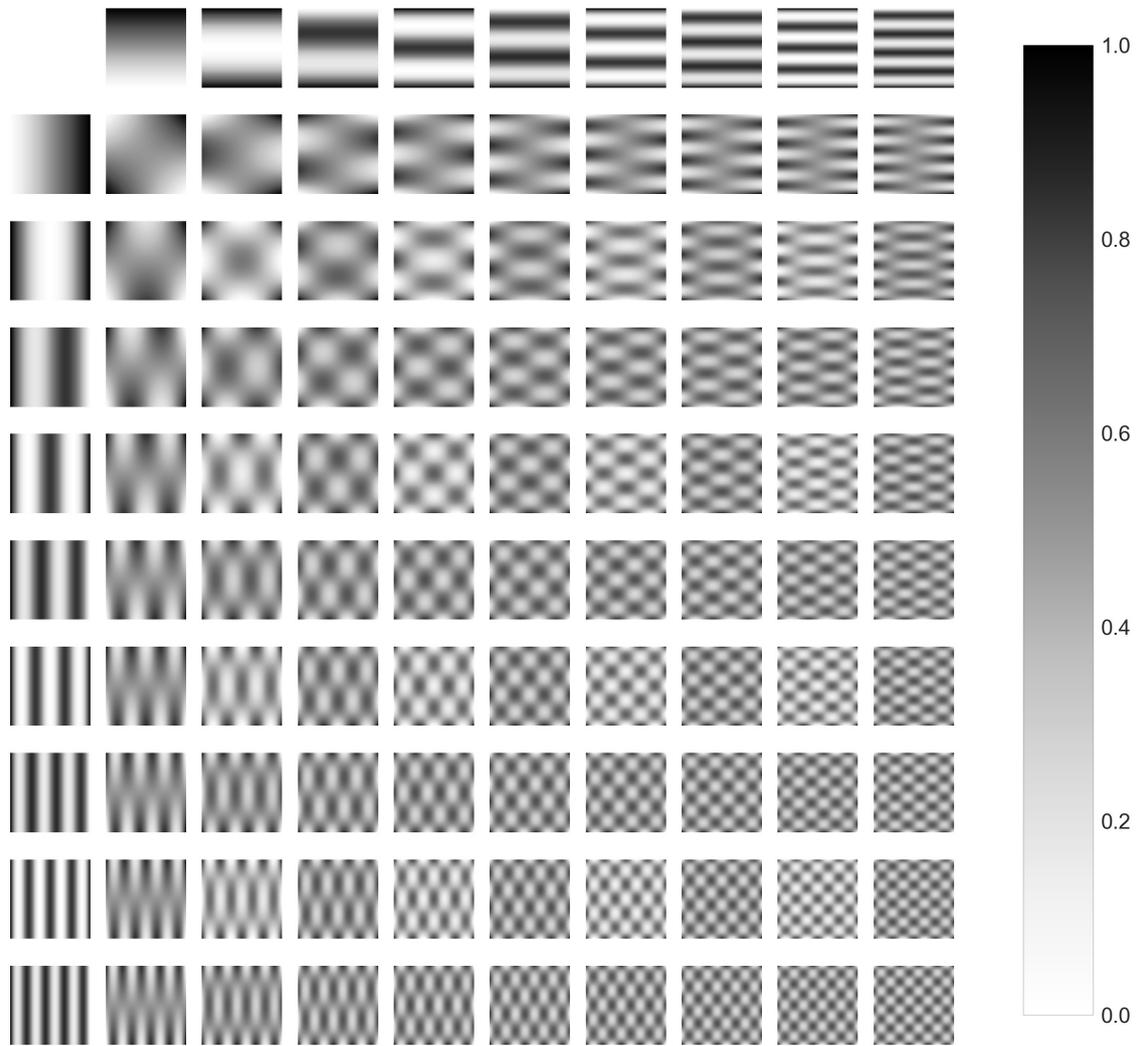


Figure 2.15 – Représentation des 100 premiers modes de notre base B.

de la théorie de Euler–Bernoulli. La solution analytique de la valeur des modes w_n de vibration d'une poutre aux conditions aux limites libre-libre est donnée par l'Équation 2.7⁷.

$$\hat{w}_n = A \left[(\sin \beta_n x + \sinh \beta_n x) + \frac{\sin \beta_n L - \sinh \beta_n L}{\cosh \beta_n L - \cos \beta_n L} (\cos \beta_n x + \cosh \beta_n x) \right] \quad \text{avec } \beta_n := \left(\frac{\mu \omega_n^2}{EI} \right)^{1/4} \quad (2.7)$$

Les modes obtenues pour une poutre sont combinés par un simple produit afin d'obtenir la base modale $B_{ij} = w_i \cdot w_j$. La Figure 2.15 présente les modes plans obtenus.

Il est intéressant de noter que nous construisons une représentation erronée des modes de vibrations d'une plaque, pour des conditions aux limites libre-libre : les modes à la symétrie horizontale et verticale (colonne 1 et ligne 1) n'existent pas⁸. L'application de la transformée modale au filtrage d'images est directe : on décrit l'image en la projetant dans la base modale. On peut également reconstituer l'image originale par la transformée inverse.

Les travaux de doctorat de PITARD [Pit16] ont montré l'intérêt de la Décomposition Modale Discrète pour la reconstruction du champ de luminance d'un objet, à partir de mesures par un dôme multi-éclairages. Par la suite, les travaux de doctorat de LACOMBE [Lac18] exploitent la DMD pour décrire les mesures d'un dôme multi-éclairages pour le contrôle de l'aspect de produits. Nous proposons d'utiliser cette paramétrisation DMD sur les images polarimétrique et thermique. La Figure 2.16 présente le filtrage d'une image de pièce non-conforme par un mode : on obtient une unique valeur scalaire.

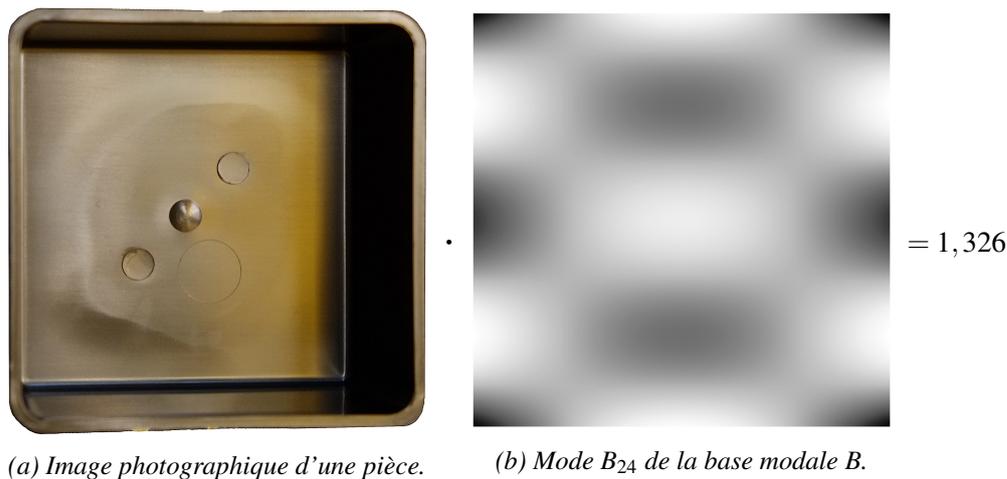


Figure 2.16 – Filtrage de la photographie d'une pièce par le mode n°24 de la base B.

Nous proposons d'appliquer la DMD à la description des images d'une pièce conforme et d'une pièce non-conforme, Figure 2.17. La base modale a été ici optimisée par validation croisée §E.1.6 afin de maximiser les performances de classification des pièces conformes / non-conformes §3.3. Les 27 meilleurs modes ont été retenus. La moyenne des modes de la base est représentée dans la première image de la Figure 2.17. Les deux dernières images de la Figure 2.17 présentent le résultat d'une reconstruction d'une image d'une pièce conforme et d'une image d'une pièce non-conforme, à partir d'une description modale. On observe que l'image originale n'est pas reconstruite. La majeure partie de l'information de l'image est perdue par le filtrage. Cependant,

7. Afin de réaliser l'application numérique, nous fixons arbitrairement les valeurs de l'amplitude $A = 1\text{m}$, module de Young $E = 1.0E^{+10}\text{Pa}$, du moment d'inertie $I_{xx} = 1.0E^{-08}\text{kg} \cdot \text{m}^2$, la masse par unité de longueur $\mu = 3.0E^{+02}\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$.

8. La théorie des plaques de Kirchhoff–Love permettrait une modélisation réaliste des modes de vibration d'une plaque libre ; dans le cas du filtrage d'image, cela permettrait de supprimer la présence de modes orthogonaux.

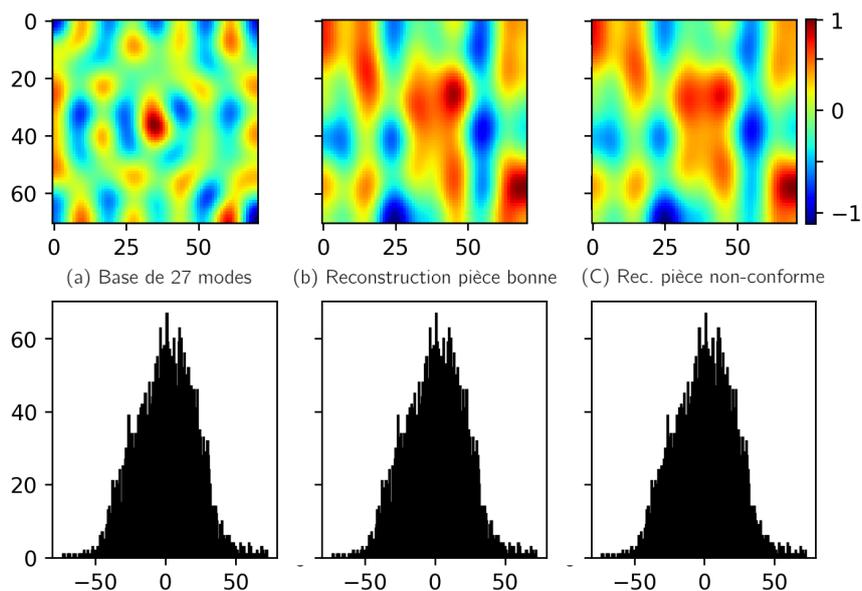


Figure 2.17 – Reconstruction d'une image après description modale
 (a) Base modale moyenne obtenue par sélection des 27 modes par validation croisée.
 Reconstruction d'une image (b) d'une pièce conforme et d'une image (c) d'une pièce non-conforme, après description modale à l'aide de la base (a) de 27 modes.

il est facile de distinguer visuellement une pièce conforme d'une pièce non-conforme : leurs descriptions modales possèdent des différences visuelles.

2.5.4 Sélection automatique de descripteurs pertinents

Dans cette section, nous présentons la méthode de sélection de descripteurs que nous avons utilisée dans nos travaux. L'objectif de cette démarche est d'obtenir un nombre réduit de valeurs qui contiennent l'information pertinente de la mesure de la qualité. À partir de ces valeurs, un algorithme de classification est utilisé pour déterminer la qualité de la pièce. Nous discutons des méthodes existantes pour construire ce modèle classifieur dans le Chapitre 3 suivant.

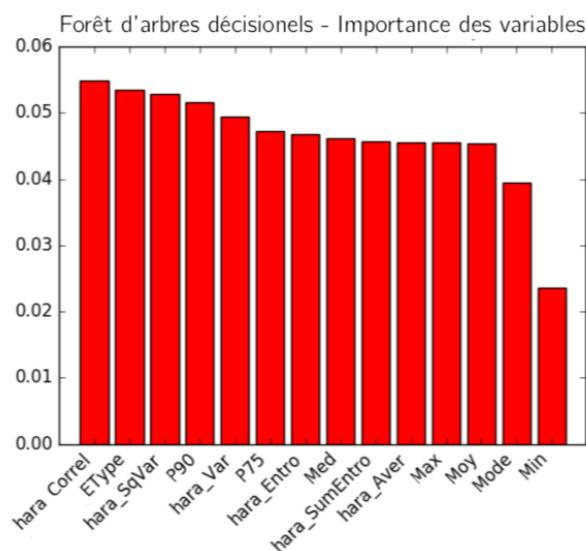


Figure 2.18 – Importance des descripteurs par Forêt d'arbres décisionnels.

Nous avons retenu comme méthode de sélection automatique des descripteurs les Forêts

d'arbres décisionnels pour leurs meilleures performances sur nos cas d'études. Pour chaque arbre, il est possible d'obtenir le nombre de variables qui sont associées. On obtient ainsi une valeur sur l'importance relative des variables. Plus une variable est associée à un grand nombre d'arbre, plus cette variable est importante.

La Figure 2.18 montre les résultats de cette méthode dans le cadre de l'étude de classification de la qualité à partir des images thermiques §2.3 [Nag+17]. Les paramètres de Haralick §2.5.3.1 sont les plus représentés. En particulier, l'homogénéité, la variance et l'entropie sont les plus pertinents. L'homogénéité telles que définis par HARALICK, SHANMUGAM et DINSTEIN est un indicateur de l'uniformité d'une image. L'entropie évalue la présence de motifs aléatoires. Dans notre cas, la présence de défauts entraîne un écart plus important de ces valeurs, par rapport à une image conforme, ce qui permet de classifier.

2.5.5 Description d'images par apprentissage statistique

L'intérêt de l'utilisation de méthodes d'apprentissage pour la description d'images est que c'est l'algorithme qui va construire la méthode de traitement optimale des données brutes. Nous présentons les méthodes que nous avons évaluées sur notre problématique dans le Chapitre §3 §3.2.4.

En particulier, nous avons obtenu des résultats encourageants à l'aide des auto-encodeurs variationnels §3.2.4.7. Un auto-encodeur cherche à reproduire la donnée entrée, avec le minimum de paramètres possibles. Ainsi, l'auto-encodeur apprend à compresser l'information dans un vecteur de petite dimension. C'est une méthode d'apprentissage non-supervisée. Aucune annotation des données n'est requise.

Dans le Chapitre §3, nous comparons différentes méthodes d'apprentissage non-supervisées. Nous discutons en particulier du coût des calculs des différentes méthodes et de la possibilité d'intégration de ces algorithmes sur des systèmes embarqués, au plus près des capteurs.

Synthèse : Fusion multimodale de l'information

Les images capturées par nos capteurs ont une grande dimension. Il est nécessaire d'extraire l'information pertinente de ces images, afin de pouvoir utiliser le résultat pour classifier si les pièces sont conformes ou non-conformes.

Nous avons présenté différentes méthodes issues de la littérature du traitement d'images. En particulier, les paramètres de Haralick et le filtrage par décomposition modale sont intéressants dans le cadre du contrôle d'aspect. Enfin, nous avons présenté la méthode de sélection automatique des variables les plus pertinentes par les forêts d'arbres décisionnels, que nous avons retenue.

Cependant, les méthodes d'extractions de descripteurs que nous avons présenté sont limitées à l'imagination humaine qui définit les descripteurs. Dans la suite de ce travail, Chapitre 3, nous nous intéresserons aux méthodes qui utilisent des réseaux de neurones profonds afin de construire automatiquement les descripteurs les plus appropriés au problème en présence.

2.6 Synthèse et perspectives

Pour conclure ce chapitre, nous réalisons une synthèse de l'apport de notre travail au contrôle de la qualité des pièces plastiques. Nous proposons ensuite plusieurs pistes de recherche à privilégier.

2.6.1 Synthèse : la mesure non-invasive en cycle industrielle

Dans ce chapitre, nous avons mis en évidence l'importance de la sélection d'un moyen de mesure adapté aux contraintes industrielles. L'invasivité d'un moyen de mesure pour le procédé est un critère important à prendre en compte. Nous avons sélectionné des moyens de mesures sans contacts qui s'appuient sur l'imagerie non-conventionnelle. Afin d'évaluer la pertinence de l'imagerie thermique et de la polarimétrie pour le contrôle de la qualité, nous avons réalisé des études sur une production de 192 pièces. Une perspective importante à nos travaux est la reproduction de nos résultats sur des cas d'études différents et sur un nombre de pièces beaucoup plus important.

La triangulation laser permet d'obtenir un nuage de point de la géométrie de la pièce. Cependant, les difficultés de mises en place et la faible répétabilité de la mesure nous ont amené à écarter ce moyen de mesure. La thermographie contient une information sur la géométrie de la pièce. C'est une mesure rapide qui peut être déployée facilement. Une perspective de recherche est l'étude du refroidissement dynamique des pièces. La polarimétrie permet de mettre en valeur différents types de défauts : les défauts géométriques et les défauts sur la structure de la matière. C'est également une méthode de mesure rapide que nous avons mis en place avec succès en cycle industriel. Nous avons conçu un polarimètre bas-coût pour réaliser cette mesure et il sera nécessaire de confronter nos mesures à un capteur calibré.

Enfin, nous avons discuté de différentes méthodes de traitement de ces mesures multimodales. Dans le Chapitre 3, nous discuterons en particulier de l'exploitation de ces mesures par apprentissage statistique. L'objectif est de réaliser un système qui classe la qualité des pièces à partir des mesures brutes.

À la suite de ce travail exploratoire, nous avons intégré la mesure thermique et la polarimétrie dans un système compact, adapté aux contraintes industrielles. Nous présentons ce système dans le Chapitre 4.

2.6.2 Perspectives de recherche

Nous détaillons dans la suite trois perspectives majeures à nos travaux : la première concerne l'exploitation dynamique de la mesure thermographique, la seconde est l'apport de la mesure de réflectance de la surface de la matière, et enfin l'exploitation optimale de la polarimétrie par l'imagerie de la matrice de Mueller complète.

2.6.2.1 Thermographie dynamique

L'intérêt de l'utilisation d'une caméra thermique est que la fréquence d'acquisition est au minimum de 9 images par secondes⁹. Cela permet de réaliser des mesures dynamiques. Une perspective de travail intéressante est la mesure du refroidissement de la pièce à partir de plusieurs images thermiques prises dans le temps. La soustraction des valeurs de température donnera l'évolution de la température. L'équation analytique du transfert thermique par convection permet de dimensionner la durée de l'intervalle de capture en fonction de la sensibilité des microbolomètres (dans notre cas 0,05°C en moyenne à 30°C).

9. L'utilisation de fréquences d'acquisition supérieures à 9 Hertz est limitée par la politique de restriction du commerce international de la défense *International Traffic in Arms Regulations*.

En posant l'hypothèse que le transfert de la chaleur par conduction au sein de la pièce et par convection à l'interface avec l'air sont du même ordre de grandeur, on obtient l'Équation 2.8

$$h(T_{surface} - T_{ambiante}) \approx \frac{k}{L_{\text{épaisseur}}} (T_{interne} - T_{surface}) \quad (2.8)$$

On pose l'hypothèse que la température de la pièce est uniforme, ce qui permet de négliger les gradients de température internes. On obtient $\dot{Q}_{pièce}$, le flux de chaleur transféré à l'air par la pièce, Équation 2.9.

$$\dot{Q}_{pièce} = Sh(T - T_{ambiante}) = -\rho V C_p \frac{dT}{dt} \quad (2.9)$$

Une solution représente l'évolution de la température de la pièce au court du temps, Équation 2.10.

$$\frac{T_t - T_{ambiante}}{T_{sortie} - T_{ambiante}} = \exp\left(-\frac{hS}{\rho cV} t\right) \quad (2.10)$$

- $\rho = 0,9210E^{-3} \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, la densité du polypropylène,
- $C_p = 2000 \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, la capacité thermique massique approximative du polypropylène,
- $h = 15 \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, le coefficient d'échange thermique de l'air ambiant,
- $S = 503,0 \text{cm}^2$, la surface de la peau de la pièce étudiée,
- $V = 61,7 \text{cm}^3$, le volume de matière de la pièce étudiée,
- $T_{sortie} = 363 \text{K}$, le température de la pièce à sa sortie de l'outillage,
- $T_{ambiante} = 293 \text{K}$, le température ambiante de l'atelier de production.

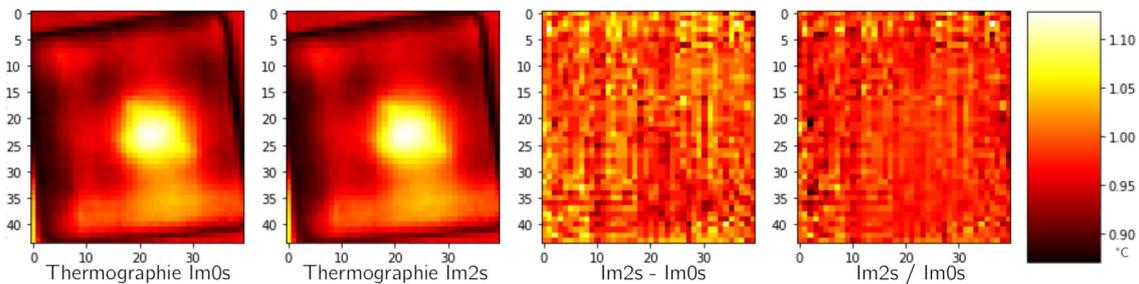


Figure 2.19 – Mesure par caméra thermique de l'évolution sur 2 secondes de la température d'une pièce.

Le modèle analytique prévoit une diminution de $0,5^\circ\text{C}$ par seconde de la température de la pièce. Il est possible de réaliser une mesure dynamique en capturant des images thermographiques toutes les secondes ; ce qui est compatible avec le temps de cycle industriel. La Figure 2.19 montre une mesure préliminaire réalisé sur une pièce 10 secondes après sa production. On observe que la diminution de la température sur 2 secondes est en moyenne de 1°C , ce qui est concordant avec le résultat analytique §2.10. Le champ de l'évolution de température est difficile à interpréter visuellement. Il est possible que cette mesure dynamique contienne beaucoup de bruit. Une étude statistique sur de nombreuses pièces devra être réalisée. La plage temporelle pourrait alors être allongée et le nombre de prises d'images augmenté pour moyennner le bruit. Une perspective de recherche est l'exploitation de ces mesures, par exemple à l'aide de réseau de neurones de convolutions ou de réseaux récurrents pour prendre en compte l'évolution temporelle. Le champ de la dynamique de refroidissement pourrait contenir une information intéressante du point de la densité de la pièce.

2.6.2.2 Mesure de la réflectance en ligne de production

Ce travail de doctorat ne nous a pas permis d'explorer l'ensemble des méthodes d'imageries non-conventionnelles. En particulier, nous ne nous sommes pas intéressés à la mesure de la réflectance de la surface de la pièce. Les caractéristiques de l'apparence d'un objet peuvent être mesurées avec un dôme composé de multiples points d'éclairages (aussi appelé "dôme multi-éclairages" ou "dôme de réflectance") [Mar+00; Gho+07]. Ce système est plus rapide que le gonio-réfectomètre qui doit déplacer la source lumineuse avec précision. La mesure de multiple point d'éclairage permet de détecter des défauts géométriques de l'ordre du micromètre. La distribution de la luminosité des réflexions¹⁰ est modifiée par la présence du défaut. Par exemple, un défaut de rayure entraîne une concentration de l'intensité lumineuse sur un petit nombre de pixels du capteur, ce qui permet de le mettre en valeur [Dés+14].

Les caractéristiques de réflectance d'un matériau possèdent un lien direct avec la rugosité de sa surface [TS67]. ZHANG, DANA et NISHINO [ZDN16] propose une méthode d'exploitation intéressante de la mesure d'un matériau sous différents angles d'éclairages, qui utilise un réseau de neurones de convolutions (le principe du réseau de convolution est présenté dans le Chapitre 3 §3.2.1.1). L'étude utilise un jeu de données composé d'une unique image sous 42 angles d'éclairage, et de la valeur du coefficient d'adhérence associé au matériau. 137 échantillons composent le jeu de données, ils sont répartis en 21 classes représentant des coefficients d'adhérence différents. Le modèle à réseau de neurones de convolution est capable de prédire le coefficient d'adhérence du matériau à partir des éclairages avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,7885$. Ce résultat encourageant motive l'utilisation de la mesure de réflectance des pièces.

De plus, la rugosité d'un matériau produit des sensations haptiques lorsqu'il est touché. La sensation haptique d'un objet est une caractéristique importante pour le client final. Certains cahiers des charges spécifient désormais des sensations haptiques pour les produits, en particulier dans le domaine du luxe. L'étude "See to Touch?" a cherché à quantifier la relation entre les mesures réalisées à l'aide d'un dôme multi-éclairages et la sensation haptique perçue sur les échantillons [Lac+17]. Sur un nombre restreint de 12 échantillons, les auteurs établissent un modèle entre le coefficient d'adhérence et les images réalisées à l'aide d'un dôme de réflectance. L'erreur de prédiction maximale est de 7%, ce qui montre l'intérêt de la mesure de réflectance pour l'étude des sensations haptiques.

Cependant, ce système de dôme de réflectance est difficile à intégrer sur les lignes de production, en raison de sa taille. Plus l'objet à mesurer est grand, plus le diamètre du dôme augmente. Pour une application de contrôle de pièces automobiles de 1 mètre de long, le dôme peut atteindre plus de 10 mètres de diamètre.

Un système d'éclairage mono-point est plus simple à intégrer en production, mais il nécessite un positionnement précis de l'équipement d'éclairage et du capteur. Enfin, il n'est pas robuste aux décalages de positionnement de la pièce. Il nécessite un positionnement précis des pièces, ce qui augmente la complexité technique de la chaîne de production. Une perspective importante à nos travaux est l'intégration de la mesure de réflectance en ligne de production, dans le respect des contraintes industrielles.

2.6.2.3 Polarimétrie par imagerie de Mueller

Dans le cadre de ce travail, nous n'avons pas réalisé la mesure de l'ensemble des couples de polarisations. En particulier, nous n'avons pas fait varier la polarisation de l'éclairage. Nous n'avons pas non plus utilisé la polarisation circulaire. Une perspective de recherche intéressante est de réaliser une mesure de la matrice de Mueller complète [PC95].

10. La distribution de la luminosité des réflexions est appelée "réflectivité bidirectionnelle" (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*).

Pour mesurer la matrice de Mueller, il est nécessaire de réaliser 16 images en variant les conditions de polarisation :

- 4 images en variant l'angle de polarisation de la source lumineuse (*Polarization State Generator*),
- 4 images en variant l'angle de polarisation du capteur (*Polarization State Analyzer*).

Notre système réalise déjà 3 images de condition de polarisation linéaire. L'ajout d'une quatrième caméra permettra de mesurer la polarisation circulaire. Enfin, il reste à commander un éclairage afin de faire varier son angle de polarisation.

À partir de la mesure de la matrice de Mueller, QUÉAU et al. calculent des images de dépolarisation qu'ils utilisent pour identifier la classe de différents matériaux [Qué+19]. Les résultats qu'ils obtiennent sont encourageants et l'approche de l'exploitation des données brutes par apprentissage est similaire à la notre. L'introduction de la polarimétrie de Mueller pour le contrôle des défauts sur les pièces plastiques pourrait ouvrir un large champ de recherche.

3

Modélisation de la notion de qualité par apprentissage

Dans ce chapitre, nous étudierons différentes méthodes de la littérature qui pourraient nous permettre de modéliser la qualité par apprentissage statistique. L'objectif est de construire un modèle qui permet à partir d'images, d'inférer la qualité des pièces. Dans un premier temps, il est nécessaire de disposer d'un jeu de données représentatif du phénomène à modéliser. Ensuite, il faut sélectionner l'algorithme à utiliser pour modéliser par apprentissage. Enfin, nous discuterons de l'optimisation de ces modèles. Le diagramme 3.1 synthétise cette démarche. C'est sous le prisme des contraintes industrielles que nous discuterons des limites au déploiement de ces méthodes sur les lignes de production.

Sommaire

3.1	Construction d'un jeu de données représentatif	68
3.1.1	Exploration humaine en cycle de production	68
3.1.2	Réglage automatique du procédé pour la création d'un jeu de données	68
3.1.3	Annotation humaine du jeu de données en contexte industriel	69
3.1.4	Conclusion : transmission de l'expertise humaine en condition industrielle	74
3.2	Construction d'une métrique de la qualité par apprentissage	76
3.2.1	Apprentissage statistique supervisé	76
3.2.2	Apprentissage par transfert de domaine	80
3.2.3	Apprentissage semi-supervisé	81
3.2.4	Apprentissage non-supervisé	88
3.3	Optimisation automatique des hyper-paramètres d'un modèle	105
3.3.1	Optimisation par recherche aléatoire	106
3.3.2	Optimisation par méta-modèle bayésien	106
3.3.3	Méthodes de réduction du coût d'évaluation du méta-modèle	109
3.3.4	Optimisation par algorithmes bandits	110
3.3.5	Optimisation par algorithmes évolutionnistes	111
3.3.6	Optimisation de l'architecture de réseaux de neurones profonds	111
3.4	Conclusion : modélisation par apprentissage pour l'industrie	113

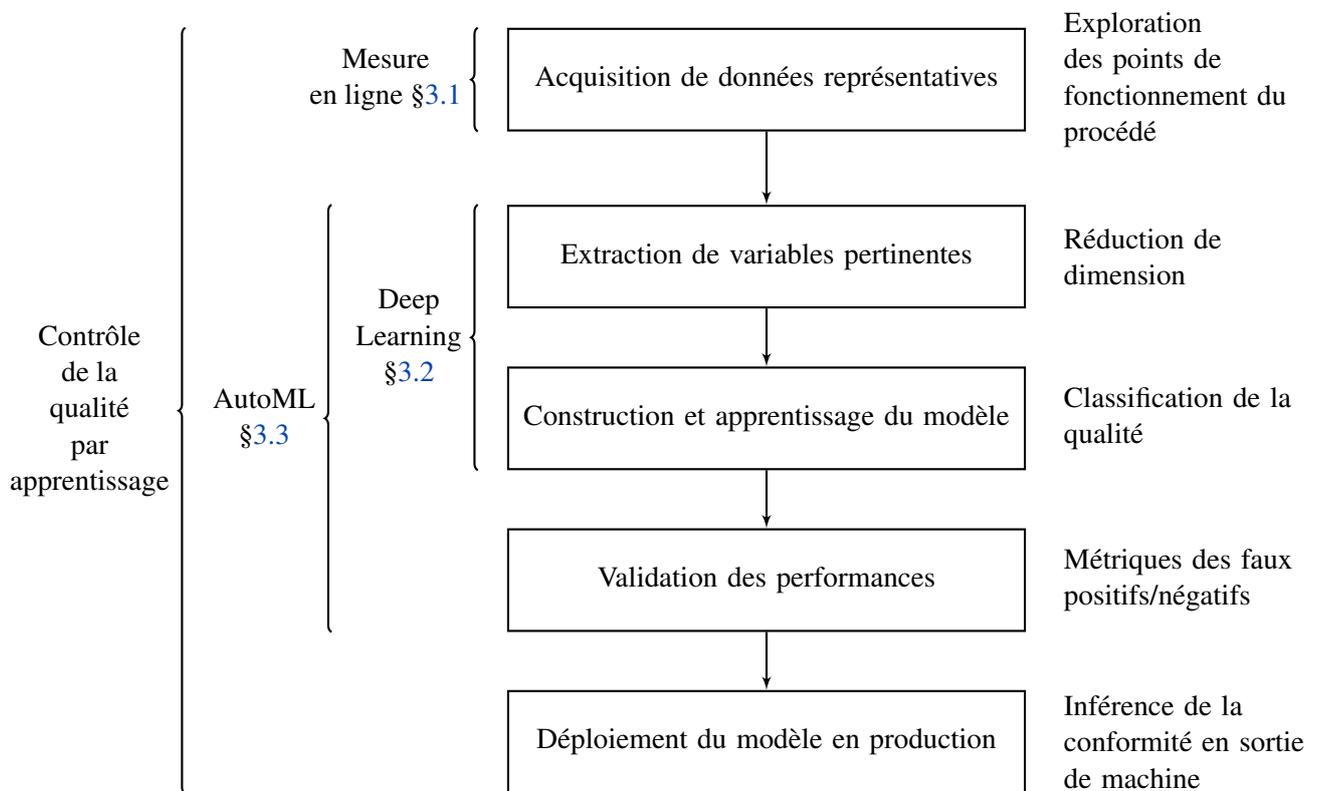


Figure 3.1 – Diagramme du processus de construction d'un algorithme de contrôle de la qualité par apprentissage.

3.1 Construction d'un jeu de données représentatif

Tout système d'apprentissage statistique nécessite un jeu de données représentatif du modèle à construire. Pour maximiser son adoption, un système de mesure de la qualité ne doit pas modifier le moyen de production en place : il doit être non invasif. Il doit s'intégrer au procédé et aux pratiques métiers. La réalisation de plans d'expériences, afin de modéliser le procédé, est difficile à intégrer dans la pratique industrielle. Nous avons présenté la méthode de construction d'un jeu de données par plan d'expériences dans la Section 2.1.1. Les plans d'expériences sont conçus pour limiter le nombre d'essais, mais malgré cela, il est admis que la seule utilisation du savoir-faire du technicien-régleur est plus avantageuse pour régler le procédé. Sur les pièces simples que nous avons pu étudier dans le cadre de ce travail, le technicien régleur est capable de régler le procédé d'injection pour obtenir une pièce de qualité satisfaisante en une trentaine de minutes, soit 30 pièces produites pour un temps de cycle de production d'une minute par pièce. Deux solutions sont possibles :

- utiliser la phase de réglage, pilotée par le technicien-régleur, afin de recueillir des données variées,
- automatiser la phase de réglage de la machine.

Le Tableau 3.1 présente les méthodes envisagées. Le réglage automatique du procédé n'est aujourd'hui pas possible, c'est pourquoi nous n'avons pas évalué l'exploration du procédé lors du pilotage automatique.

Méthode de construction	Avantage	Inconvénient
Plan d'expériences §2.1.1	Exploration de l'ensemble des réglages	Difficile à intégrer en production
Réglage manuel §3.1.2	Pendant le réglage du procédé	L'explo. dépend de la variabilité du procédé
Réglage automatique §3.1.2	Exploration de l'ensemble des réglages	

Tableau 3.1 – Méthodes de construction du jeu de données d'apprentissage.

3.1.1 Exploration humaine en cycle de production

Nous avons conduit deux expérimentations sur des machines industrielles, sans planification préalable des configurations de réglage de la machine. Ces essais ont permis d'obtenir des retours sur la faisabilité et la fiabilité de notre dispositif de mesure de la qualité. Afin d'explorer les plages de fonctionnement du procédé, nous recommandons d'acquérir les données en particulier pendant ces événements :

- pendant les réglages,
- pendant les défaillances du procédé,
- pendant que certains asservissements du procédé sont arrêtés et que le procédé dérive.

Ces recommandations permettent de maximiser la variance du jeu de données. Nous notons que c'est pendant la phase de réglage que la variance des données est maximale. En effet, le réglage de la machine est un processus itératif qui nécessite d'appliquer successivement plusieurs points de fonctionnement au procédé. Les vingt pièces produites pendant le réglage possèdent des caractéristiques de qualité variées. Le jeu de données pourra être complété au fur et à mesure de la production pour que les données soient représentatives du point de fonctionnement industriel.

3.1.2 Réglage automatique du procédé pour la création d'un jeu de données

Nous définissons le réglage d'un procédé comme la sélection d'un point de fonctionnement initial (réglage du procédé), son optimisation (ajustement des réglages), puis sa régulation. Le

réglage est aujourd'hui réalisé par un opérateur humain. Dans le cas où la phase de réglage serait automatisée, il deviendrait possible d'explorer la plage de fonctionnement du procédé, tout en ajustant les réglages. Les plans d'expériences §2.1.1 sont particulièrement adaptés à l'acquisition de données sur l'ensemble de l'espace de fonctionnement d'un procédé. Il est possible de compléter un plan d'expériences par de nouveaux essais, dans les plages de réglages qui possèdent les meilleurs performances.

3.1.3 Annotation humaine du jeu de données en contexte industriel

C'est par l'annotation d'un jeu de données que l'expert humain transfère sa connaissance au système informatique.

Nous distinguons deux méthodes d'annotation humaine d'un jeu de données d'apprentissage :

- l'annotation "hors production", qui est effectuée à posteriori de la production des données,
- l'annotation "en production".

Une des principales limites au déploiement de système par apprentissage est le coût de l'annotation. En effet, le coût de l'annotation humaine est conséquent car il monopolise un expert du domaine. En 2015, BEARMAN et al. évalue les durées moyennes de différents types d'annotations [Bea+15]. Le Tableau 3.2 présente leurs résultats. Pour un humain, déterminer et annoter si une image est d'une certaine catégorie dure une seconde. Dans notre cas d'application, si ces résultats sont respectés, l'humain mettrait une seconde à déterminer si la pièce est conforme ou non. Si l'humain doit déterminer la présence et la localisation approximative de l'élément sur l'image, cette durée est de 2,4 secondes. Enfin, si la localisation est un rectangle la durée augmente ; elle est supérieure à la minute si l'humain identifie précisément la position de l'élément en dessinant un masque sur l'image.

Dans notre cadre industriel, la durée d'annotation détermine le coût économique du travail de l'expert qualité qui la réalise. Ainsi, il n'est pas envisageable de réaliser une segmentation précise de l'emplacement des défauts depuis une ligne de production. Nous discuterons dans la suite de la problématique de l'annotation d'un jeu de données dans un contexte industriel.

3.1.3.1 Annotation hors production

Nous proposons une méthode de notation de la qualité basée sur l'expertise humaine. De précédents travaux sur l'évaluation visuelle de la qualité par de multiples experts ont montré la difficulté d'accorder les avis d'experts humains. BAUDET, PILLET et MAIRE étudie l'évaluation de la qualité de 18 produits [BPM11], par un panel de cinq contrôleurs humains. Les résultats de l'évaluation de ce panel possédaient une dispersion maximale de 50% sur l'ensemble des niveaux de qualité. Cette dispersion est très élevée. Elle n'est pas acceptable pour un moyen de mesure. Cette étude montre qu'il est nécessaire de formaliser l'évaluation. Il faut également former les contrôleurs humains pour harmoniser les évaluations. Afin d'évaluer la dispersion des évaluations humaines, BAUDET [Bau12] propose une évolution de la méthode *R&R (Repeatability & Reproducibility)* qui a été initialement proposée par le AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP et al. pour évaluer la dispersion des moyens de mesure [Aut+10]. La dispersion peut avoir deux causes : un problème de répétabilité de la mesure ou un problème de reproductibilité. Pour que le système de mesure soit conforme et puisse être utilisé, la pratique industrielle accepte généralement une dispersion inférieure à 30%. Dans notre cas, nous chercherons à concevoir un système de contrôle qui réalisera moins de 10% d'erreurs de classification.

Sur notre cas d'application "boîte noire", présenté dans le Chapitre 2 Section 2.1, nous avons expérimenté une notation de la qualité des pièces. Une échelle de notation est construite au fur et à mesure, par comparaison manuelle entre les défauts présents sur les pièces. Afin de réduire la variabilité de l'évaluation, ce classement est réalisé par vote de quatre contrôleurs. Nous justifions cette démarche par la nécessité de limiter la dispersion intra-classe. Si les contrôleurs ne sont

Méthode	Durée par classe	Qualité de localisation	Illustration de l'annotation
Label de présence	1,0 s	Aucune localisation	
Label + point	2,4 s	Localisation globale	
Label + rectangle	10 s	Localisation locale	
Label + masque	78 s	Segmentation précise	

Tableau 3.2 – Durées d'annotations moyenne d'une image pour un humain.

pas capable de différencier deux pièces, alors ces pièces appartiennent à une même classe. Nous n'avons pas réalisé d'analyse de répétabilité *R&R* du panel de quatre experts. C'est une perspective intéressante pour des travaux complémentaires.

La Figure 3.2 présente la réalisation de l'annotation hors-production. Les numéros sous les colonnes de pièces indiquent la valeur attribuée à chaque colonne sur l'échelle de qualité qui a été construite. L'échelle va de 1 (le niveau de qualité le meilleur), à 7 (les pièces qui possèdent les pires caractéristiques du point de vue des défauts d'aspect).

Il s'est avéré difficile pour les contrôleurs de donner une note qui prend en compte plusieurs types de défaut. Les contrôleurs experts possèdent un a-priori de la notion de qualité qui s'appuie sur des typologies de défauts. C'est pourquoi nous avons identifié trois défauts présents sur les pièces de cette étude : la retassure, le givrage et les brûlures. Aussi, la démarche de notation par comparaison a été réalisée trois fois de suite, pour les trois types de défaut. Une moyenne géométrique des notes combine les trois types de défaut et produit l'évaluation finale de la qualité de chaque pièce.



Figure 3.2 – Annotation hors-ligne par les experts humains.

Nous identifions trois limites à ce processus d'annotation humaine :

- la durée de trois heures avec quatre experts pour évaluer deux cents pièces, soit soixante pièces par heure,
- la surface de travail nécessaire pour organiser les pièces et que les trois experts puissent les manipuler librement,
- les risques liés à la détérioration des pièces entre leur production et l'étape d'annotation.

C'est pourquoi, nous recommandons de réaliser l'annotation au plus près du procédé d'injection-moulage ; si possible dès la sortie des pièces du moule d'injection.

3.1.3.2 Annotation en ligne de production

Réaliser l'annotation en ligne de production permet d'éliminer trois risques d'erreurs critiques sur le jeu de données d'apprentissage :

- la perte du lien entre les mesures en production et l'annotation hors-production,
- la transformation des pièces entre leur production et leur annotation
- l'erreur d'annotation *a posteriori* : l'expert peut ici observer la pièce.

En contrepartie, la durée disponible pour l'annotation est très limitée. En plus de la durée de l'annotation, l'expert humain doit assister les opérations de manutention des pièces et les opérations connexes. Nous estimons la disponibilité de l'expert humain à une trentaine de secondes pour un temps de cycle du procédé d'une minute.

Dans le cas d'une annotation au fil de la production de pièces, il n'est pas envisageable de réaliser une segmentation précise, à cause de sa durée élevée proche de la minute (voir le Tableau 3.2 qui présente les durées moyennes de la tâche d'annotation. Nous obtenons de ces résultats l'intérêt de réaliser une annotation rapide, sans nécessairement chercher à localiser les défauts. Indiquer la présence ou l'absence de défauts est rapide. Ensuite, nous pouvons préciser le niveau de la qualité en proposant une échelle discrète simple, par exemple à cinq niveaux de qualité. Afin de répondre à ce problème de vitesse d'annotation, une interface logicielle a été spécifiquement développée. Nous discutons de cette interface dans le Chapitre 4. Cette interface permet aussi de conserver le lien entre les mesures et l'annotation.

3.1.3.3 Intégration de l'humain dans le système d'apprentissage

L'expertise humaine est indispensable à la modélisation par apprentissage statistique. L'humain doit transférer ses connaissances au logiciel informatique. C'est pourquoi, il nous paraît

indispensable d'intégrer l'humain au plus près du processus d'apprentissage. Cela nécessite une interface adaptée. Par ce biais, l'expert humain peut effectuer deux actions :

- identifier la cause du défaut,
- alerter si le modèle statistique donne une information erronée.

Afin de motiver l'expert humain à transmettre ses connaissances au système informatique, l'interface informatique d'annotation doit simple et conviviale. De nombreuses sociétés informatiques l'ont bien compris et nous annotons actuellement de manière naturelle et transparente des bases de données d'apprentissage : par le biais de notre navigation sur l'Internet ou des interactions avec notre smartphone, et de toutes les données recueillies par les capteurs connectés. Le déploiement d'un système d'évaluation de la qualité dans les ateliers de production sera facilité par l'attrait de l'interaction avec l'interface d'annotation.

Nous avons développé une solution logicielle afin de satisfaire cette nécessité. Nous discuterons de ce développement logiciel dans le Chapitre 4. Une interface sur navigateur web est accessible depuis tous les terminaux. Tout au long de la production de nouvelles pièces, celles-ci s'affichent en temps réel et l'expert humain peut annoter la qualité. L'annotation peut être réalisée sur la ligne de production, ce qui permet alors en plus le contrôle visuel direct des pièces. L'annotation peut également être effectuée à distance : dans ce cas, l'expert humain se base sur l'image enregistrée par le dispositif de mesure pour évaluer la qualité. Dans le cas de pièces techniques à haute valeur ajoutée, la présence de l'expert sur la ligne est recommandée. Il peut ainsi manipuler les pièces pour réaliser une annotation précise.

3.1.3.4 Assistance à l'annotation humaine

Il est possible d'assister l'expert qualité dans la tâche d'annotation en proposant une note qu'il suffit de confirmer. Il est également possible de limiter le nombre d'annotations à réaliser aux cas les plus critiques. C'est à dire de ne pas demander à l'expert d'annoter toutes les pièces, mais de détecter les pièces nouvelles qui peuvent enrichir le jeu de données et de requérir leur annotation. Deux démarches peuvent être réalisées en parallèle : suggérer et détecter les pièces nouvelles, qui sont pertinentes à annoter.

3.1.2.4.1 Suggestion d'annotation

Dans certains cas, l'expertise humaine ne permet pas de différencier la qualité entre deux pièces. Plusieurs limites humaines peuvent être la cause d'une telle situation :

- l'expert ne peut pas mémoriser les caractéristiques de l'ensemble des pièces produites,
- l'expert humain ne peut pas comparer les pièces car elles ne lui sont plus accessibles.

Il est alors intéressant de suggérer à l'expert humain une annotation pour la pièce. De plus, si cette suggestion est motivée par un argumentaire, elle sera d'autant plus crédible. Il ne faut néanmoins pas influencer l'expert humain. C'est pourquoi cette suggestion ne doit être effectuée que lorsque le niveau de confiance du modèle statistique est élevée. Des les autres cas, il vaudra mieux écarter la pièce incertaine du jeu de données d'apprentissage. Nous recommandons une certitude de classification supérieure à 90% pour suggérer une annotation.

Pour suggérer la catégorie de la pièce, les méthodes de *clustering* permettent d'identifier des paquets de pièces similaires. Pour suggérer, il faut également justifier. Il est nécessaire de transmettre à l'expert humain l'information. C'est pourquoi, l'affichage sous forme d'un graphique des paquets de pièces similaires est utile. Les algorithmes *ACP* 3.2.4.3, *t-SNE* 3.2.4.5 ou *UMAP* 3.2.4.6 permettent de projeter un espace de grandes dimensions dans un graphique à deux ou trois dimensions. Nous détaillons leur application dans la Section 3.2.4. Ce graphique peut être interprété par un humain. Sur ce graphique, nous ajoutons l'affichage automatique de l'image de chaque pièce lors du survol des points par le curseur d'une souris informatique. Cela permet

d'identifier les paquets de pièces similaires très rapidement, mais aussi les erreurs de classification (humaine ou du système automatique).

3.1.2.4.2 Détection de nouveautés

Dans le cas spécifique des productions industrielles sur des procédés stables, la majorité des pièces produites sera de bonne qualité. C'est pourquoi, la tâche d'annotation de toute la production industrielle sera laborieuse pour l'expert humain et aura peu d'intérêt pour le modèle. Aussi, la variabilité maximale sur les procédés industriels est produite lors de la phase de réglage du procédé. Il est capital d'annoter les pièces issues de cette phase. Par la suite, les pièces seront similaires et de bonne qualité. De plus, différents points de fonctionnement du procédé peuvent amener à la production de pièces similaires, car le procédé d'injection moulage est non-bijectif, à cause de la multiplicité de ses paramètres réglables et de leurs réponses non-linéaires. Il est ainsi nécessaire de mettre en évidence les pièces qui présentent de l'intérêt pour la base d'apprentissage : c'est à dire les pièces qui sont "nouvelles". Des méthodes d'analyses de données sans supervision permettent de réaliser cette tâche. Nous détaillons l'application de ces méthodes dans la Section 3.2.4. Nous présentons ici les deux méthodes que nous avons implémentées : la mesure de distance de Mahalanobis ; la machine à vecteurs de support à une classe.

Mesure de distance dans un espace réduit par l'Analyse en Composantes Principales

La dimension d'une image numérique est grande. Une image couleur de 1920×1080 pixels est composée de 6,2 millions de valeurs. Une comparaison pixel à pixel n'est pas envisageable car la position des points d'intérêt entre les images peuvent légèrement varier. Il est intéressant de comparer la similarité en dépassant les variations de positionnement mais on conservant les points d'intérêts.

Il est possible de réduire l'espace des données en projetant les valeurs des pixels dans un espace de dimensions réduit. L'Analyse en Composantes Principales §3.2.4.3 réduit l'espace des données initial en combinant les relations linéaires existantes entre les composantes. La dimension de l'espace de donnée réduit est choisi afin de limiter la perte d'informations à partir de l'espace initial. Cette perte d'information est mesurée par la diminution de la variance exprimée dans les données. Dans notre cas spécifique, les données d'entrée sont des images qui comportent 6,2 millions de pixels. Nous projetons ces valeurs dans un espace de dimensions 100. La perte de variance dans les données projetée est alors inférieure à 0,01% de la variance des données initiales.

Dans cet espace de dimensions réduit, il devient possible de mesurer la distance entre les points. La distance euclidienne ne prend pas en compte les corrélations entre les variables, c'est pourquoi la distance de Mahalanobis [Mah36], Équation 3.1 est couramment employée pour mesurer des distances entre paquets d'individus. La distance de Mahalanobis entre un paquet de pièces de référence et une pièce nouvelle est représenté par une hyper-ellipse.

$$D_{Mahalanobis}(x,y) = \sqrt{(x-y)^T \Sigma^{-1} (x-y)} \quad (3.1)$$

Pour obtenir un détecteur de nouveauté, il reste à définir un seuil à partir duquel la pièce est considérée comme nouvelle. Ce seuil est soit imposé, soit défini de manière automatique. Dans le cas d'un seuil automatique, on choisira un seuil égal à la distance de Mahalanobis de l'ensemble des pièces actuellement dans la base d'apprentissage. La distance de toute pièce nouvelle dépassera alors ce seuil et la nouveauté sera détectée. Cette démarche est employée avec succès dans les travaux de LACOMBE sur le contrôle visuel automatique par système multi-éclairage, afin de détecter les pièces conformes et les pièces non-conformes [Lac18].

Machine à Vecteurs Supports à une classe

À partir d'un classifieur machine à vecteurs de support¹, SCHÖLKOPF et al. proposent de chercher à classifier l'ensemble des individus existants dans une unique classe [Sch+99; Sch+01]. C'est la méthode *One-Class SVM*. Les individus qui seront similaires aux individus existants ne seront pas détectés comme nouveaux. En revanche, les individus qui ne sont pas similaires seront détectés. Le paramètre de marge b correspond à la probabilité de classifier un nouvel individu, qui serait situé en dehors de l'hyperplan de marge maximal, comme nouveau.

À l'aide de noyau gaussien, cette méthode permet de prendre en compte des données aux propriétés fortement non-linéaires, ce que la matrice de covariance de la distance de Malhanobis ne permet pas.

3.1.2.4.3 Détection de modification sur le procédé

Une approche complémentaire, pragmatique, au problème de la détection de nouveauté, est de réaliser la détection de l'intervention du technicien humain sur les réglages du procédé. En effet, lorsque le technicien modifie les réglages, il cherche nécessairement à optimiser la qualité des pièces produites. Il suffit alors d'ajouter, au jeu de données d'apprentissage, les pièces pour lesquelles une intervention humaine sur les réglages a eu lieu. De manière pratique, le système de mesure doit disposer d'une mémoire tampon où les mesures des quelques dernières pièces produites sont conservées. En cas d'intervention humaine sur les réglages du procédé, les mesures de cette mémoire tampon sont ajoutées au jeu de données d'apprentissage. Nous ajouterons également un certain nombre de pièces qui seront produites à la suite avec les nouveaux réglages. Nous proposons d'ajouter un nombre de pièces e , fonction de la variabilité court-terme du procédé. Dans le cas de l'injection des thermoplastiques, suite à un réglage, une dizaine de pièces permettent de stabiliser le procédé. C'est pourquoi nous proposons d'enregistrer deux pièces précédant la modification des réglages, ainsi que les dix pièces suivant la modification. Cette contrainte dimensionne la capacité de mémoire informatique du système d'apprentissage. Dans le cas de douze pièces, la mémoire tampon sera de l'ordre d'un gigaoctet pour notre application.

Nous n'avons pas pu évaluer notre proposition dans le cadre de ce travail, car cela aurait nécessité l'enregistrement automatique de la valeur des réglages de la machine. Cette intégration doit être réalisée en lien avec les constructeurs des presses d'injection-plastique; ou par rétro-ingénierie, ce qui demandera des ressources conséquentes. L'évaluation de cette proposition est une piste de travail importante pour la suite de nos travaux.

3.1.4 Conclusion : transmission de l'expertise humaine en condition industrielle

Dans cette section, nous avons présenté plusieurs méthodes de construction d'un jeu de données. Pour identifier un modèle par apprentissage, il est nécessaire de disposer d'individus qui sont représentatifs de l'ensemble de la plage de fonctionnement du procédé. Si les individus ne couvrent pas l'ensemble du procédé, le modèle sera partiel, voir biaisé.

Dans la première partie, nous avons discuté de l'intérêt du réglage automatique du procédé pour construire un jeu de données représentatif. Nous utilisons dans notre travail de doctorat, pour valider expérimentalement nos hypothèses, une table L12 de criblage §2.1.2. Cette table permet de faire varier 11 paramètres en ne réalisant que 12 essais, ce qui permet de couvrir rapidement la variabilité des réglages du procédé.

Dans la seconde partie, nous avons présenté notre méthode d'évaluation de la qualité de pièces plastiques par un panel d'experts. L'évaluation est nécessaire afin d'annoter notre jeu d'apprentissage; c'est à dire d'associer à chaque pièce une information : pièce conforme ou pièce non-conforme. Notre méthode a permis d'obtenir une évaluation de la qualité de 210 pièces sur

1. Le principe de fonctionnement d'un classifieur machine à vecteurs de supports est discuté dans l'Annexe §E.2.1.

une échelle ordinale. Cette méthode nécessite la comparaison d'une production complète; c'est une évaluation réalisée à posteriori de la production.

L'annotation d'un jeu de données est l'étape clé de la modélisation par apprentissage statique : l'expert humain transfère sa connaissance au système informatique.

L'annotation d'un jeu de données est une opération longue. Nous avons proposé des méthodes pour réduire la durée de l'évaluation de la qualité par l'expert humain et pouvoir réaliser une annotation du jeu de données d'apprentissage au fur et à mesure de la production de nouvelles pièces. En particulier, la détection de nouveauté permet de demander à l'expert humain d'évaluer uniquement les pièces qui possèdent des caractéristiques "nouvelles". Il est également possible de suggérer une évaluation de la qualité, pour que l'expert humain puisse annoter plus rapidement §3.1.3.4. Enfin, nous proposons de suivre les modifications des réglages du procédé : si le réglage est modifié, il est très probable que les caractéristiques de la pièce produite soient différentes des caractéristiques précédentes. Il faut demander à l'expert humain d'annoter les pièces lorsque les réglages sont modifiés §3.1.3.4.

Synthèse : Transmission de l'expertise humaine par l'annotation d'un jeu de données

L'annotation d'un jeu de données est une étape clé de l'apprentissage statique; l'expert humain transfère sa connaissance au modèle.

Les plans d'expériences permettent d'explorer rapidement la réponse d'un système, puis il est possible d'enrichir le jeu de données au fur et à mesure de la création de nouveaux individus par une annotation production.

Enfin, afin d'augmenter la vitesse d'annotation et de simplifier le travail de l'expert humain, il est possible de suggérer automatiquement des annotations.

3.2 Construction d'une métrique de la qualité par apprentissage

La qualité d'un produit est spécifiée dans le cahier des charges. Cependant, lorsque les spécifications ne sont pas normalisées, elles entraînent souvent une traduction subjective afin de réaliser le contrôle. C'est pourquoi la qualité d'un produit, lorsqu'elle intègre les aspects sensoriels en plus des aspects géométriques, est souvent subjective. Elle s'appuie sur une connaissance holistique d'un expert qualité humain. La notion de qualité d'aspect est difficile à formaliser. Des travaux de recherche ont permis des avancées dans ce domaine. L'analyse ontologique de corpus de textes de références permet par exemple de hiérarchiser les descriptions formelles afin de normaliser ces notions de qualité, du point de vue visuel [Bau12], et sensorimoteur [Alb+17]. Une fois normalisée le contrôle de la qualité peut être automatisé [Des15b; Pit16; Lac18; Alb19] afin de garantir la répétabilité.

Construire une métrique de la qualité par apprentissage revient à apprendre la fonction f_θ qui a pour paramètres θ tel que $f_\theta(\mathbf{x}) : \mathbb{R}^F \rightarrow \mathbb{R}^D$ transforme les points de l'espace d'origine \mathbb{R}^F dont les propriétés sont similaires (par exemple un niveau de qualité de pièces équivalent) vers des points proches au sens de la métrique, dans l'espace \mathbb{R}^D . Réciproquement, la fonction f_θ doit transformer les points d'origines dont les propriétés sont opposées, vers des points distants de l'espace \mathbb{R}^D . La transformation $f : X \times X \rightarrow \mathfrak{R}_0^+$ dans un espace vectoriel X est une métrique si $\forall \vec{\mathbf{x}}_i, \vec{\mathbf{x}}_j, \vec{\mathbf{x}}_k \in \mathcal{X}$:

1. $f(\vec{\mathbf{x}}_i, \vec{\mathbf{x}}_j) + f(\vec{\mathbf{x}}_j, \vec{\mathbf{x}}_k) \geq f(\vec{\mathbf{x}}_i, \vec{\mathbf{x}}_k)$, inégalité triangulaire
2. $f(\vec{\mathbf{x}}_i, \vec{\mathbf{x}}_j) \geq 0$, inégalité non négative.
3. $f(\vec{\mathbf{x}}_i, \vec{\mathbf{x}}_j) = f(\vec{\mathbf{x}}_j, \vec{\mathbf{x}}_i)$, symétrie.
4. $f(\vec{\mathbf{x}}_i, \vec{\mathbf{x}}_j) = 0 \iff \vec{\mathbf{x}}_i = \vec{\mathbf{x}}_j$, identité des indiscernables.

Dans le cas de la construction d'une métrique par apprentissage, il est probable que l'identité des indiscernables ne soit pas remplie. Aussi, nous cherchons dans ce travail à apprendre une pseudo-métrique et non pas une véritable métrique. La littérature sur ce sujet est vaste, c'est pourquoi ce travail de doctorat n'a pas permis d'explorer de manière exhaustive l'ensemble des méthodes d'apprentissage de métriques proposées dans la littérature. Un excellent état de l'art sur le sujet est le doctorat de BELLET [Bel12]. Nous nous sommes intéressés aux méthodes les plus pertinentes compte-tenu de notre problématique d'analyse d'images. Ce travail de doctorat a permis de comparer différents algorithmes sur notre problème de classification binaire de la conformité des pièces. Nous nous sommes uniquement intéressés à l'utilisation de données de mesure sous forme d'images numériques. Nous présenterons les algorithmes supervisés étudiés, puis les algorithmes semi-supervisés qui permettent de limiter la durée de l'annotation humaine requise dans les Sections 3.2.3 et 3.2.4. Enfin, nous présenterons les moyens disponibles pour optimiser les performances des classifieurs par sélection automatique des hyper-paramètres dans la Section 3.3.

3.2.1 Apprentissage statistique supervisé

Sur notre problématique du contrôle qualité, nous cherchons ici à résoudre un problème de classification (aussi appelé "discrimination"). C'est à dire que nous cherchons à classer automatiquement dans des groupes les individus qui ont des propriétés similaires. Ici, nous cherchons à classer les pièces qui sont observées comme conforme dans le groupe des pièces non-conformes, et réciproquement. Cette fonction de classification est modélisée par l'Équation 3.2. Pour un vecteur d'observations $\vec{\mathbf{x}}$ dans \mathbb{R}^N , la prédiction \hat{y} du classifieur f est donnée par :

$$\hat{y} = f(\vec{\mathbf{x}}) \quad (3.2)$$

Pour un classifieur, y est souvent un vecteur de la probabilité d'appartenance de l'individu à chacune des classes. La dimension de y est le nombre de classes possible dans notre problème.

Un cas particulier est le classifieur dit "linéaire", Équation 3.3. La fonction est alors le produit scalaire des observations avec la matrice de poids. Le terme linéaire signifie que la fonction est une combinaison linéaire. \mathbf{W} est alors une matrice de poids et $\vec{\mathbf{b}}$ est un vecteur de biais. L'apprentissage supervisé consiste à trouver les valeurs de la matrice de poids \mathbf{W} et du biais $\vec{\mathbf{b}}$ tel que la valeur de \hat{y} s'approche le plus possible de la valeur connue du couple (\mathbf{x}, y) .

$$\hat{y} = f\left(\mathbf{W}^T \cdot \mathbf{x} + \vec{\mathbf{b}}\right) = f\left(\sum_{i=1}^N \mathbf{w}_i \cdot x_i + b_i\right) \quad (3.3)$$

Plusieurs distances mathématiques peuvent être utilisées pour estimer l'écart entre deux populations. La distance de MAHALANOBIS [Mah36] a été utilisée dans les travaux de doctorat de LACOMBE sur une problématique similaire de contrôle automatique de la qualité à partir de mesures visuelles [Lac18]. Cependant l'utilisation de la distance de MAHALANOBIS est limitée aux espaces linéaires. Il est difficile de l'utiliser pour séparer des motifs visuels compliqués. Il est alors nécessaire de transformer les données pour les rendre linéairement séparables, en amont de la mesure de distance. Nous détaillons l'utilisation de la distance de Mahalanobis dans la Section 3.2.3.2. Nous avons choisi dans ce travail de comparer des approches traditionnelles d'apprentissage supervisé, avec des approches par réseaux de neurones de convolution profonds. L'intérêt de ces méthodes est la forte non-linéarité et le grand nombre de degrés de liberté des modèles. Ces types de classifieurs représentent aujourd'hui l'état de l'art académique et industriel en analyse d'images.

L'Annexe E propose une synthèse de la théorie de l'apprentissage statistique et des principaux algorithmes traditionnels. Dans ce travail de doctorat, nous nous sommes intéressés en particulier aux méthodes de *Deep Learning*, que nous détaillons dans la suite de ce chapitre.

3.2.1.1 Réseaux profonds de convolutions

Les réseaux de neurones de convolutions, proposés par LECUN et al. [LeC+89], ont un comportement non linéaire particulièrement adapté à l'analyse de données complexes, telles que des images, et à l'apprentissage de représentations de ces données. La couche de convolution est l'élément principal du réseau. Les couches de convolutions sont associées les unes à la suite des autres pour former un réseau profond (d'où le nom de *Deep Learning*). Entre chaque couche peuvent être ajoutées des couches composées de fonctions d'activations non linéaires, des couches de moyennes globales ou locales, ou d'autres fonctions avancées. Le réseau résultant est une composée de fonctions de convolutions avec des fonctions intermédiaires. L'Équation 3.4 détaille la forme d'un modèle complet F et de l'application d'une couche f_n : c'est un modèle affine composé d'une matrice de poids \mathbf{W} et d'un vecteur de biais \mathbf{b} .

$$F(\mathbf{x}) = (f_n \circ f_{n-1} \circ \dots \circ f_2 \circ f_1)(\mathbf{x}), \text{ avec } f_n(\mathbf{x}) = \mathbf{w}_n \cdot \mathbf{x} + \mathbf{b}_n \quad (3.4)$$

De plus, l'opération de convolution est très efficace pour des problèmes en grandes dimensions [GBC16]. Pour une entrée de dimensions m , et une sortie de dimensions n , l'application matricielle complète $x \rightarrow y$ aura une complexité $O(m \cdot n)$. L'opération de convolution pour un noyau de dimensions k aura une complexité de $O(k \cdot n)$. Lorsque la dimension du noyau k est très petite devant la dimension de l'entrée m , l'opération de convolution permet un gain d'occupation mémoire et ainsi de coût de calcul. Le gain est considérable lorsque les données d'entrée ont de grandes dimensions, comme dans notre cas avec des images. Il est bien plus efficace de créer des architectures profondes, supérieures à c couches de convolutions successives avec des noyaux de petite dimension k , car c est très petit devant m .

La dernière couche du réseau est appelée couche de classification (ou classifieur). Si le problème est binaire (comporte uniquement deux classes), la sortie du réseau est une probabilité d'appartenance à la première classe. Pour un problème multi-classes, la sortie du réseau serait

un vecteur de probabilité d'appartenance à chacune des classes. Pour un problème binaire, une fonction d'activation sigmoïde, Équation 3.5, est utilisée afin de transformer les valeurs de la précédente couche vers une probabilité : $s_{[-\infty;+\infty]} \rightarrow P_{[0;1]}$.

$$\text{Sigmoïde } f(s_i) = \frac{1}{1 + e^{-s_i}} \quad (3.5)$$

Pour un problème multi-classes, une fonction *SoftMax* (Équation 3.6), inverse de la sigmoïde, est utilisée. $\text{SoftMax} = \vec{s}_{[-\infty;+\infty]} \rightarrow \vec{p}_{[0;1]}$ Chaque classe a préalablement été encodée sous la forme d'un vecteur à la dimension égale au nombre total de classes, c'est le *one-hot encoding*.

$$\text{SoftMax } f(s_i) = \frac{e^{s_i}}{\sum_c \text{classes } e^{s_c}} \quad (3.6)$$

Le modèle à réseau de neurones est pleinement différentiable. C'est pourquoi la méthode traditionnelle d'ajustement des poids des neurones du réseau est la rétro-propagation de l'erreur proposée, par RUMELHART, HINTON et WILLIAMS [RHW85] qui est adaptée aux réseaux de convolutions à couches multiples par LECUN et al. [LeC+89]. Par la suite, LECUN et al. [LeC+98] développe l'apprentissage progressif stochastique des poids du réseau, aussi appelée descente de gradient stochastique : l'apprentissage est réalisé successivement sur une portion des données choisie aléatoirement (les *mini-batch*), car calculer le gradient pour la totalité du jeu de données serait trop coûteux en matière de puissance de calcul.

VAPNIK définit dans la théorie Vapnik–Tchervonenkis la notion d'apprentissage statistique comme un problème d'optimisation [Vap92], Équation 3.7, où on cherche à minimiser l'erreur empirique E , en fonction des poids \mathbf{W} du réseau et d'un terme de régularisation λ sur les poids \mathbf{W} (régularisation de Tikhonov §F.4.5).

$$E(\mathbf{W}, \lambda_p) = \frac{1}{\ell} \sum_{i=1}^{\ell} \mathcal{L}(y_i, F(x_i, \mathbf{W})) + \lambda_p \|\mathbf{W}\|_2 \quad (3.7)$$

À chaque itération, une fonction de coût \mathcal{L} calcule l'erreur entre les prédictions du réseau \hat{y} et les valeurs de références y . La fonction de coût est choisie pour être adaptée au problème de classification en présence.

Dans le cas de l'apprentissage supervisé, on cherche à trouver la fonction F qui minimise la perte de l'information entre l'approximation finale et le jeu de données initial. L'entropie H est une métrique importante de la théorie de l'information, proposée par [Sha48]. Pour une distribution de probabilité p donnée, l'entropie est exprimée par l'Équation 3.8. Elle mesure la quantité de données minimale nécessaire pour encoder l'information de la distribution.

$$\text{Entropie } H(p) = - \sum_{i=1}^N p(x_i) \cdot \log p(x_i) \quad (3.8)$$

Aussi, en comparant les entropies d'une distribution source y et d'une approximation de \hat{y} , on mesure la quantité d'information perdue par la méthode d'approximation F . C'est la divergence de KULLBACK et LEIBLER [KL51], Équation 3.9 et nous cherchons ici à la minimiser.

$$\text{Divergence}_{KL}(y||\hat{y}) = \sum_{i=1}^N y(\mathbf{x}_i) \cdot (\log y(\mathbf{x}_i) - \log \hat{y}(\mathbf{x}_i)) \quad (3.9)$$

Dans le cas d'une classification binaire, on utilise ainsi la fonction de coût logistique (Équation 3.10), aussi appelée entropie-croisée binaire. Cette fonction est généralisable aux problèmes multi-classes avec $i > 1$.

$$\mathcal{L}_{\text{logit}}(\hat{y}, y) = - \sum_{i=1}^2 y_i \log(\hat{y}_i) = -y_1 \log(\hat{y}_1) - (1 - y_1) \log(1 - \hat{y}_1) \quad (3.10)$$

Le calcul est simplifié en combinant la fonction d'activation sigmoïde et la fonction de coût logistique, Équation 3.11.

$$\begin{aligned}
 (\mathcal{L}_{\text{logit}} \circ f_{\text{sig}})(X, y_1) &= -y_1 \log(f_{\text{sig}}(X)) - (1 - y_1) \log(1 - f_{\text{sig}}(X)) = -y_1 \cdot X + \log(1 + e^X) \\
 \text{d'où } (\mathcal{L}_{\text{logit}} \circ f_{\text{sig}})(X, y_1) &= \begin{cases} -X + \log(1 + e^X) & \text{si } y_1 = 1 \\ \log(1 + e^X) & \text{si } y_1 = 0 \end{cases}
 \end{aligned}
 \tag{3.11}$$

À chaque itération, la dérivée² de cette erreur est rétro-propagée pour ajuster chacun des poids du réseau. De plus, la dérivée est pondérée par un facteur $0 < \eta < 1$ qui est appelée le facteur d'apprentissage. La valeur du facteur η est critique pour obtenir la convergence de l'erreur vers zéro. Plus le réseau sera compliqué et plus le problème d'optimisation en présence sera non-linéaire et non-convexe; c'est à dire qu'il possèdera de nombreux minima locaux. C'est pourquoi, un facteur η trop petit demandera un grand nombre d'itérations avant d'obtenir la convergence et l'équilibre sera souvent atteint sur un minima local. *A contrario*, un facteur η trop grand empêchera la convergence car le gradient oscillera. Les deux problèmes critiques à éviter lors de l'ajustement par descente de gradients sont l'effondrement du gradient qui occasionne une convergence globale des poids du réseau vers zéro et l'explosion du gradient qui occasionne une divergence globale des poids du réseau vers l'infini [BSF94; Hoc+01]. Des algorithmes avancés existent pour limiter ces problèmes.

La vaste littérature sur le sujet ne nous permettra pas de détailler l'intérêt des différentes méthodes proposées, aussi, nous utiliserons dans l'ensemble de nos travaux l'algorithme d'optimisation récent *Adam* proposé par KINGMA et BA [KB14]. Ce dernier permet l'ajustement automatique du facteur d'apprentissage η au fur et à mesure des itérations. De plus, des facteurs de régularisation sur la dérivée seconde (aussi appelé "moment") sont ajoutés pour accélérer la convergence et éviter les minimums locaux.

Nous récapitulons dans le Tableau 3.3 les différents hyper-paramètres critiques de l'apprentissage par descente de gradient stochastique des réseaux de neurones profonds. Dans ce travail, nous ne présenterons pas de manière exhaustive les contraintes qui existent sur l'architecture des réseaux de convolutions. Le choix des nombres de couches, des dimensions des noyaux de convolutions, des décalages, remplissages (*padding*), réduction (*pooling*, §F.4.4). Nous invitons le lecteur à se référer à l'excellente synthèse de DUMOULIN et VISIN [DV16].

Dans ce travail, nous avons étudié un panel représentatif de différentes architectures récentes de réseaux de neurones profonds, sur notre cas d'application de contrôle de la qualité. Le Tableau 3.4 présente les architectures étudiées avec leurs occupations de mémoire de travail, le nombre de paramètres (Degrés De Libertés) et les scores de justesse obtenus sur le jeu de données de validation d'*ImageNet*. L'erreur *Top-1%* correspond à l'erreur de justesse pour l'annotation qui est prédite avec la plus grande probabilité par le réseau. L'erreur *Top-10* correspond à l'erreur de justesse pour les dix annotations qui sont prédites avec la plus grande probabilité par le réseau. Ainsi, si l'annotation qui devait être prédite est "chat", mais que le réseau prédit l'annotation "chat" en neuvième position, alors l'erreur *Top-10%* sera nulle, mais l'erreur *Top-1* sera maximale. Dans notre problématique de classification binaire de la qualité, nous nous intéressons uniquement à l'erreur *Top-1*.

Nous distinguons également les ressources informatiques nécessaires à entrainer ces modèles : la durée du calcul et la mémoire de travail nécessaire. De plus, pour réaliser l'inférence à l'aide de ces modèles, ils doivent être chargés en mémoire de travail (*RAM* du processeur, ou *RAM* du *GPU*). Les modèles qui possèdent un grand nombre de poids nécessitent de grandes quantités de

2. Le lecteur pourra se référer à la note de référence de SADOWSKI pour le détail du calcul de la dérivée [Sad16].

Hyper-paramètres	Valeurs de la littérature	Description
Nombre de couches	[2; 200]	Nombre de couches dans le réseau.
Type de couche	Convolution, Connectés, Pooling	Type de couche, varie à chaque couche.
Neurones par couche	[1; 4000]	Varié à chaque couche successive.
Fonction d'activation	tanh, sigmoïde, SoftMax	Transforme la sortie en probabilités.
Fonction de coût	Logistique, Entropie-croisée, ℓ_1 , ℓ_2	Erreur entre référence et prédiction.
Initialisation	Loi uniforme, normale ...	Méthode d'initialisation des poids.
Régularisation des poids	ℓ_1 , ℓ_2	Limite l'explosion des poids.
Facteur d'apprentissage	$[10^{-7}; 10^{-1}]$	Pas du gradient, vitesse de convergence.
Lots d'apprentissage/ <i>mini-batch</i>	[16; 128]	Nombre d'individus par lot

Tableau 3.3 – Hyper-paramètres critiques pour l'apprentissage de réseaux de neurones profonds.

mémoires ce qui limite leur utilisation dans des systèmes embarqués qui seraient positionnés au cœur des ateliers de production. La faible quantité de données annotées dont nous disposons est une problématique industrielle qui a orienté nos travaux vers le transfert de domaines de réseaux préalablement appris sur de grandes quantités de données annotées, §3.2.2.

L'Annexe F propose des compléments d'information sur les méthodes d'apprentissages des réseaux profonds. Il est intéressant de construire des réseaux profonds pour résoudre des problèmes d'analyse d'images ; mais il devient alors nécessaire d'employer des méthodes de régularisations des poids, pour garantir la convergence de l'apprentissage itératif.

Architecture	Année	Mémoire	Paramètres	Erreur Top-1%	Erreur Top-5%
MobileNetV2	2018	14 Mo	3,5 M	28,12	9,71
VGG19	2014	549 Mo	143,6 M	25,76	9,12
DenseNet-201	2016	80 Mo	20,2 M	22,80	6,43
ResNet-152	2015	232 Mo	60,3 M	21,69	5,94
ResNext-50_32x4d	2016	85 Mo	25,1 M	22,38	6,30
ResNext-101_32x8d	2016	170 Mo	44,3 M	20,69	5,47
ResNeXt-101_32x48d_wsl	2018	3100 Mo	829 M	14,6	2,4

Tableau 3.4 – Architecture des réseaux de convolutions étudiés.

3.2.2 Apprentissage par transfert de domaine

Le faible nombre d'individus disponibles (inférieur à mille pièces) nous a conduit à utiliser des réseaux de neurones profonds préalablement entraînés sur des très grands jeux de données. Le jeu de données *ImageNet* [Den+09] est composé de 2 millions d'images réparties en mille catégories différentes. L'apprentissage par transfert de domaine, aussi résumé "apprentissage par transfert", cherche à réutiliser un modèle spécialisé sur un certain problème, pour résoudre un autre problème. En pratique, les meilleures approches proposées dans la littérature nécessitent de conserver des caractéristiques fortes entre les deux domaines. Nous nous contenterons ici d'utiliser des modèles spécialisés sur l'analyse d'images à trois canaux de couleurs, et de les spécialiser sur notre propre problématique.

Dans ce cadre d'apprentissage par transfert de domaine, nous n'avons pas la liberté de modifier l'architecture du réseau pré-appris, car il faudrait alors réapprendre les poids des neurones du réseau. La technique répandue est alors de supprimer la ou les dernières couches du réseau pré-appris et d'ajouter de nouvelles couches spécifiques à notre problème. Les dernières couches du réseaux sont considérées comme étant le véritable classifieur. Les couches précédentes se contentent de compresser l'information en une représentation dans un espace de dimensions réduit. Nous travaillons uniquement sur l'architecture du classifieur, c'est à dire de la fin du réseau. Le choix de l'architecture et de la typologie des couches influence fortement la performance du classifieur, c'est pourquoi des méthodes de sélections automatiques de ces paramètres doivent être employées. Elles sont discutées dans la Section 3.3.

On distingue deux étapes successives à l'entraînement d'un réseau de neurones par transfert : l'entraînement des nouvelles dernières couches, puis la spécialisation de l'ensemble du réseau. Il s'agit dans un premier temps de garantir la convergence du classifieur sur notre problème. On cherche à obtenir un score de classification satisfaisant. C'est pourquoi dans un premier, seuls les poids des neurones des nouvelles dernières couches sont ajustés par rétro-propagation du gradient de l'erreur. Une fois que la convergence des dernières couches a été obtenue, il est possible de spécialiser finement l'ensemble du réseau en réalisant un ajustement de l'ensemble des poids des couches afin d'améliorer le score de classification. Nos travaux ont montré que cette étape de spécialisation n'est pas nécessaire lorsque le jeu de données d'apprentissage est petit (inférieur à mille individus). En effet, nous n'observons pas d'augmentation du score de classification après la phase de spécialisation. De plus, la durée de l'apprentissage de spécialisation est deux ordres de grandeur plus longue que la durée de l'apprentissage des dernières couches du réseau, car le nombre de variables à ajuster sur l'ensemble du réseau est bien plus grande. La durée de l'apprentissage des dernières couches du réseau est de dix secondes sur un processeur graphique récent et puissant (*NVIDIA GTX1080Ti*, 2017). La durée de l'apprentissage de spécialisation est de dix minutes. Cette durée rend l'apprentissage de spécialisation compatible avec une mise à jour horaire du classifieur, sous réserve de disposer d'un processeur graphique adapté. L'apprentissage des dernières couches peut en revanche être réalisé en cycle de production, pièce après pièce. Un classifieur de la conformité qui utilise l'apprentissage par transfert sera adapté aux productions dans lesquels les changements de séries ou bien la dérive du procédé est supérieure à l'heure. Ce qui est compatible avec une mise à jour régulière du modèle de la conformité.

3.2.3 Apprentissage semi-supervisé

Le coût de l'annotation humaine d'un jeu de données est élevé. De plus, la problématique qui oppose qualité de l'annotation contre quantité d'annotation est critique dans le contexte du contrôle industriel. Les annotations doivent avoir un niveau de certitude élevé afin d'éviter les erreurs de types faux-positifs et faux-négatifs. Il vaut mieux que l'expert humain passe du temps pour annoter une pièce avec certitude, plutôt qu'il annote rapidement plusieurs pièces, avec nécessairement moins de certitudes. C'est pourquoi, les méthodes d'apprentissage qui nécessitent peu d'exemples par classe (*few-shot learning*), voir un unique exemple par classe (*one-shot learning*), sont intéressantes.

De plus, l'apprentissage semi-supervisé permet d'utiliser des individus qui n'ont pas été annotés. Le jeu de données d'apprentissage est alors plus grand et les performances en classification sont augmentées. L'apprentissage semi-supervisé repose sur plusieurs hypothèses sur la structure des données §3.2.3, synthétisées dans la monographie de référence sur le sujet *Semi-supervised learning* [CSZ10]. Plus récemment, la thèse de DURAND [Dur17] propose trois méthodes de classification semi-supervisées qui utilisent des réseaux de convolutions profonds.

Hypothèse de continuité : les points qui sont proches dans l'espace des données ont plus de chances d'appartenir à la même classe.

Hypothèse d'ensembles : les points sont souvent regroupés en ensembles discrets (paquets ou *clusters*). Les points dans le même ensemble ont plus de chances d'appartenir à la même classe.

Hypothèse de densité faible : du point de vue de la séparation des classes, la limite entre deux classes devrait se situer dans une région de l'espace où la densité de présence d'ensembles de différentes classes est faible.

Hypothèse de variétés : pour un espace de données initial, il existe un espace latent de dimensions réduit qui conserve les propriétés des données, pour les trois hypothèses précédentes.

L'hypothèse de variétés rend possible l'apprentissage de la transformation vers l'espace latent à l'aide de l'ensemble des données (annotées ou non), puis d'apprendre le classifieur dans l'espace latent. Ainsi, les données non annotées permettent de mieux capturer la distribution des données dans l'espace initial, puis dans l'espace latent. De plus, utiliser une plus grande quantité d'individus annotés partiellement permet d'obtenir un classifieur qui sera généralisable pour une plus grande diversité de nouveaux individus. Nous détaillerons dans cette partie les méthodes les plus utiles à notre problème de classification de la conformité à l'aide d'un jeu de données partiellement annoté.

3.2.3.1 Réseau de neurones siamois profond

Un réseau siamois (*Siamese Networks*) est un réseau de neurones qui contient deux sous-réseaux identiques. Le premier réseau siamois a été appliqué à la vérification d'empreintes digitales, en 1992 [BC93]. Deux réseaux de convolutions identiques sont utilisés pour l'analyse de similitude entre deux individus. Puis la distance entre la sortie des deux réseaux est calculée. Les distances employées sont souvent la norme, la norme Euclidienne ou la fonction de coût de contraste proposée par HADSELL, CHOPRA et LECUN [HCL06], Équation 3.12.

Enfin, une fonction exponentielle normalisée (*SoftMax*) sur ces valeurs retourne la probabilité de similarité entre les deux individus. Ce travail détaille la méthode employée pour prétraiter les images à partir des données enregistrées. En parallèle, une architecture similaire a aussi été appliquée à la vérification de signatures [Bro+93]. Un modèle à réseau de neurones est spécifiquement utilisé pour exploiter pleinement les informations temporelles obtenues lors de l'enregistrement de la signature par la tablette *5990 Signature Capture Devices* : position cartésienne, distance du stylo au support, pression sur la pointe, le tout inscrit dans le temps ; ce qui rend toute falsification très difficile. Ces deux travaux montrent des résultats supérieurs à 95% de bonnes réponses en classification, dès 1992.

La montée en performance du calcul sur processeur graphique à permis de multiplier les couches de convolutions. L'utilisation de réseaux siamois profonds a ainsi été proposée en 2015 et est devenue une thématique de recherche prolifique. KOCH, ZEMEL et SALAKHUTDINOV [KZS15] les utilisent par exemple pour la détection de caractère sur de multiples alphabets. La Figure 3.3 montre l'architecture d'un tel réseau. L'architecture présentée est celle utilisée par RAO, WANG et COTTRELL [RWC16] pour la détection de similarité entre différentes expressions de visages.

La fonction de coût de contraste, Équation 3.12, se compose de $D_{\mathbf{W}}$ qui est une distance entre les vecteurs en sortie des deux branches du réseau. Dans le cas le plus simple, c'est la norme Euclidienne ℓ_2 entre les vecteurs \mathbf{s}_A et \mathbf{s}_B . Dans cette équation, $D_{\mathbf{W}}$ correspond à la distance entre les matrices de poids \mathbf{W} . La matrice de poids \mathbf{W} est l'ensemble des poids de la branche du réseau précédent cette fonction. Ainsi, cette fonction de coût de contraste permet de réaliser l'apprentissage des poids du réseau afin de rapprocher dans l'espace latent les images similaires,

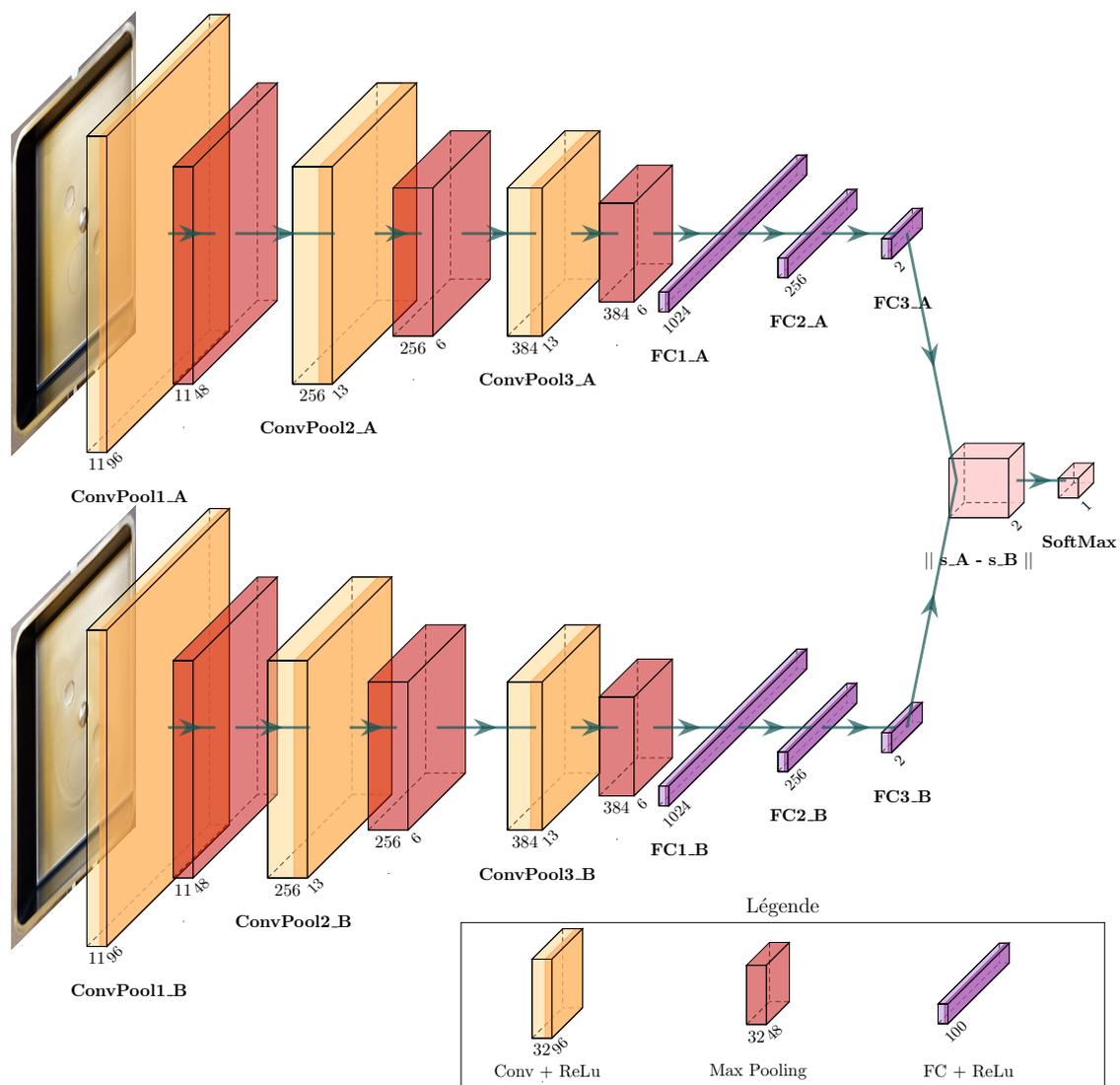


Figure 3.3 – Architecture d'un réseau siamois.

et au contraire d'éloigner les images non similaires. $\mu \in [0; 1]$ est un terme qui permet de balancer les effets d'attraction et de répulsion.

$$\mathcal{L}_{\text{contraste}}(0, \mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j, \mu) = (1 - \mu) \frac{1}{2} (D_{\mathbf{w}})^2 + (\mu) \frac{1}{2} \{\max(0, m - D_{\mathbf{w}})\}^2 \quad (3.12)$$

avec $D_{\mathbf{w}} = \|f(\mathbf{x}_i) - f(\mathbf{x}_j)\|_2^2$

Afin que la fonction de coût réagisse en particulier aux paires d'images non similaires, on introduit une marge m , de valeur supérieure à zéro, qui permet aux paires d'images dont la distance est inférieure à cette marge de ne pas être prises en compte dans le résultat du calcul du coût. La valeur de la marge peut être choisie selon les résultats de précision et de résidus souhaités. Dans notre cas de contrôle qualité, nous souhaitons par exemple limiter les faux positifs : les pièces mauvaises qui sont classées comme étant bonnes. Minimiser le coût de contraste revient à positionner toutes les images d'une même classe en un unique point de l'espace. Cette propriété peut devenir une limite lorsque des images d'une même classe possèdent des caractéristiques d'autres classes. C'est pourquoi la fonction de coût de triplet a été proposée et nous la détaillons dans la Section suivante 3.2.3.2.

3.2.3.2 Réseau de neurones de triplets profond

Basé sur la même idée que le réseau siamois, le réseau de triplets (*Triplet Networks*) utilise trois réseaux de convolutions en parallèles. Les trois sorties des convolutions sont utilisées par la fonction de coût de triplets (*Triplet Loss*, Équation 3.14), proposée par [Wan+14] WANG et al., appliquée à la détection des images au contenu similaire.

La fonction de coût de triplets est dérivée de la fonction de coût *LMNN* (*Large Margin Nearest Neighbor*), Équations 3.13, proposées par WEINBERGER, BLITZER et SAUL [WBS06]. *LMNN* s'appuie sur la distance de MAHALANOBIS [Mah36] (ici notée \mathbf{L}_{Maha}) pour la classification par la méthode des K-plus-proches voisins. Le terme $\mathcal{E}_{\text{éloignement}}$ pénalise les petites distances entre les points. Il garantit également que les exemples négatifs sont éloignés des exemples de la classe i . $\mu \in [0; 1]$ permet de balancer les deux termes (en pratique $\mu = 0,5$ est satisfaisant).

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{LMNN}(0, \mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j, y, \mu) &= (1 - \mu) \mathcal{E}_{\text{rapprochement}} + \mathcal{E}_{\text{éloignement}} \\ \mathcal{E}_{\text{rapprochement}}(\mathbf{L}_{Maha}) &= \sum_{j \sim i} \|\mathbf{L}(\vec{\mathbf{x}}_i - \vec{\mathbf{x}}_j)\|^2 \\ \mathcal{E}_{\text{éloignement}}(\mathbf{L}_{Maha}) &= \sum_{i, j \sim i} \sum_n (1 - y_n) \max\left(0, 1 + \|\mathbf{L}_{Maha}(\vec{\mathbf{x}}_i - \vec{\mathbf{x}}_j)\|^2 - \|\mathbf{L}_{Maha}(\vec{\mathbf{x}}_i - \vec{\mathbf{x}}_n)\|^2\right) \end{aligned} \quad (3.13)$$

Cette méthode est proche de la méthode employée par les Machines à Vecteurs Supports (*Support Vector Machines*) : maximiser la marge séparant les classes dans l'espace métrique appris. La fonction de coût $\mathcal{E}_{\text{éloignement}}$ est composée du coût de *hinge* (*Hinge loss*, $\mathcal{L}_{Hinge}(z) = \max(0, z)$) aussi utilisé par les *SVM*. Cependant, contrairement aux *SVM*, la méthode peut être utilisée pour de la classification multi-classes, sans modification et avec de meilleures performances que l'algorithme *SVM*.

Récemment, SCHROFF, KALENICHENKO et PHILBIN [SKP15] ont fait évoluer le coût \mathcal{L}_{LMNN} et propose la fonction de coût de triplet $\mathcal{L}_{\text{triplet}}$ Équation 3.14. Trois images sont présentées en entrée au réseau : une image A de référence, une image Positive d'une catégorie et une image Négative d'une autre catégorie. La distance entre l'image R de Référence et l'image P Positive doit être plus petite que la distance entre l'image R et l'image N Négative. La fonction de coût de triplets cherche à entraîner le réseau afin séparer la paire positive (image R, image P) de la paire négative (image A, image N) par une distance de marge : c'est à dire minimiser la distance entre (images R, image P) et maximiser la distance entre (image R, image N).

Les travaux de WANG et al. [Wan+14] et SCHROFF, KALENICHENKO et PHILBIN [SKP15] proposent également l'utilisation d'architectures de réseaux de convolutions profonds issues de la littérature sans les modifier (*AlexNet* modifié [ZF13] et *GoogleLeNet-InceptionV1* [Sze+14]), à la manière de boîtes noires, et d'entraîner l'ensemble du réseau ainsi constitué. A la suite du réseau, la norme Euclidienne entre les trois branches est calculée. Ainsi, la distance entre toutes les images qui sont de la même catégorie sera petite, tandis que la distance entre les paires d'images de différentes catégories sera grande. WU et al. [Wu+17] justifient l'utilisation de la norme Euclidienne au lieu de la norme Euclidienne élevée au carré utilisée dans SCHROFF, KALENICHENKO et PHILBIN [SKP15].

A la différence de la fonction de coût de contraste (Équation 3.12) qui cherche à positionner toutes les images d'une même classe en un unique point de l'espace latent, la fonction de coût de triplet cherche à maximiser une marge entre chaque paire d'images de catégories différentes. Ainsi, les images similaires peuvent être positionnées librement à des points différents de l'espace latent, sous réserve que la condition sur la marge entre les catégories différentes soit remplie.

$$\mathcal{L}_{\text{triplet}}(\mathbf{x}_r, \mathbf{x}_p, \mathbf{x}_n) = \max(0, \|f(\mathbf{x}_i^R) - f(\mathbf{x}_i^P)\|_2 - \|f(\mathbf{x}_i^R) - f(\mathbf{x}_i^N)\|_2 + \alpha) \quad (3.14)$$

\mathbf{x}_i^R représente l'ensemble des images de référence, \mathbf{x}_i^P l'ensemble des images de catégorie positive et \mathbf{x}_i^N de catégorie négative.

Le problème majeur de cette fonction de coût est que sur l'ensemble d'un jeu de données, la majorité des triplets d'images répondront à cette contrainte. Dans ce cas, le réseau ne pourra pas optimiser rapidement ses poids sur cette condition, car la fonction de coût sera le plus souvent constante. C'est pourquoi il est nécessaire de sélectionner judicieusement des triplets d'images qui sont difficiles à discriminer, en commençant au début par des triplets faciles, puis en raffinant la difficulté au fur et à mesure de l'apprentissage par descente de gradient.

Pour l'entraînement optimale du réseau, il s'agit de sélectionner, pour toutes images \mathbf{x}_i^R de référence, les images \mathbf{x}_i^P et \mathbf{x}_i^N telles que les Équations 3.15 soient remplies.

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_i^P &= \operatorname{argmax}_{\mathbf{x}_i^P} \|f(\mathbf{x}_i^R) - f(\mathbf{x}_i^P)\|_2 \\ \mathbf{x}_i^N &= \operatorname{argmin}_{\mathbf{x}_i^N} \|f(\mathbf{x}_i^R) - f(\mathbf{x}_i^N)\|_2 \end{aligned} \quad (3.15)$$

Les auteurs de [SKP15] appellent ces paires d'images "négatives-difficiles" et "positives-difficiles". Ainsi, les images "négatives-difficiles" sont celles qui possèdent le plus de similarités avec l'image de référence, mais qui devront être les plus éloignées de l'image de référence après l'apprentissage. Réciproquement, les images "positives-difficiles" sont celles qui sont les moins similaires avec l'image de référence, mais qui devront être les plus rapprochées de l'image de référence après l'apprentissage. La figure 3.4 présente les trois cas d'images Négatives \mathbf{x}_i^N possibles pour un couple d'images (Référence, Positive) :

- Négatives-faciles : $\|f(\mathbf{x}_i^R) - f(\mathbf{x}_i^N)\|_2 > \|f(\mathbf{x}_i^R) - f(\mathbf{x}_i^P)\|_2 + \alpha$, dans ce cas $\mathcal{L}_{\text{triplet}} = 0$.
- Négatives-modérées : $\|f(\mathbf{x}_i^R) - f(\mathbf{x}_i^P)\|_2 < \|f(\mathbf{x}_i^R) - f(\mathbf{x}_i^N)\|_2 < \|f(\mathbf{x}_i^R) - f(\mathbf{x}_i^N)\|_2 + \alpha$, avec ici $0 < \mathcal{L}_{\text{triplet}} < \alpha$.
- Négatives-difficiles : $\|f(\mathbf{x}_i^R) - f(\mathbf{x}_i^N)\|_2 < \|f(\mathbf{x}_i^R) - f(\mathbf{x}_i^P)\|_2$, on a $\mathcal{L}_{\text{triplet}} > \alpha$.

La condition de similarité maximale sur les images négatives peut cependant créer un minima local lors de l'apprentissage, en ne sélectionnant que certaines images du jeu de données, ce qui empêche la convergence. Il est nécessaire d'introduire une certaine variabilité dans les images négatives. C'est pourquoi [SKP15] introduit une troisième condition, Équation 3.16.

$$\|f(\mathbf{x}_i^R) - f(\mathbf{x}_i^P)\|_2 < \|f(\mathbf{x}_i^R) - f(\mathbf{x}_i^N)\|_2 \quad (3.16)$$

Il s'agit de sélectionner des images "négatives-modérées", c'est à dire des images qui sont plus éloignées de l'image de référence que les images positives, mais qui ont une similarité élevée avec

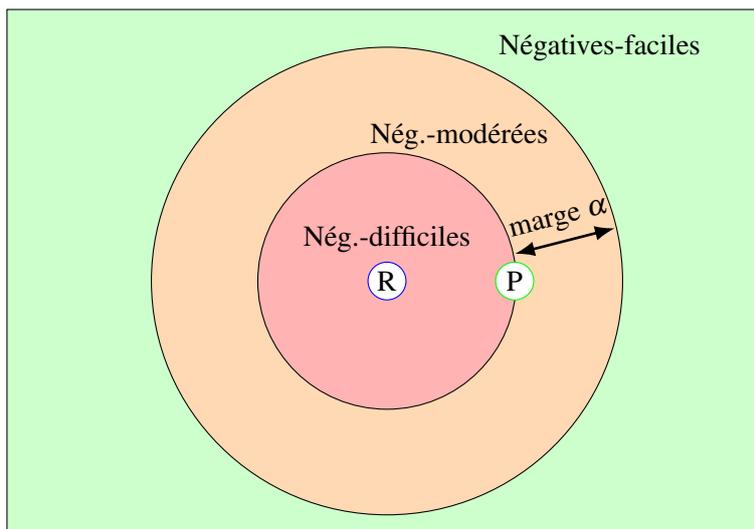


Figure 3.4 – Trois différents types d’images Négatives possibles pour un couple d’images (Référence, Positive)

Figure inspirée de l’article de blog de O. Moindrot.

l’image de référence. Dans la même démarche, SHI et al. [Shi+16] proposent de sélectionner en plus les images "positives-modérées". La Figure 3.5 récapitule la méthode d’apprentissage d’un réseau de triplets.

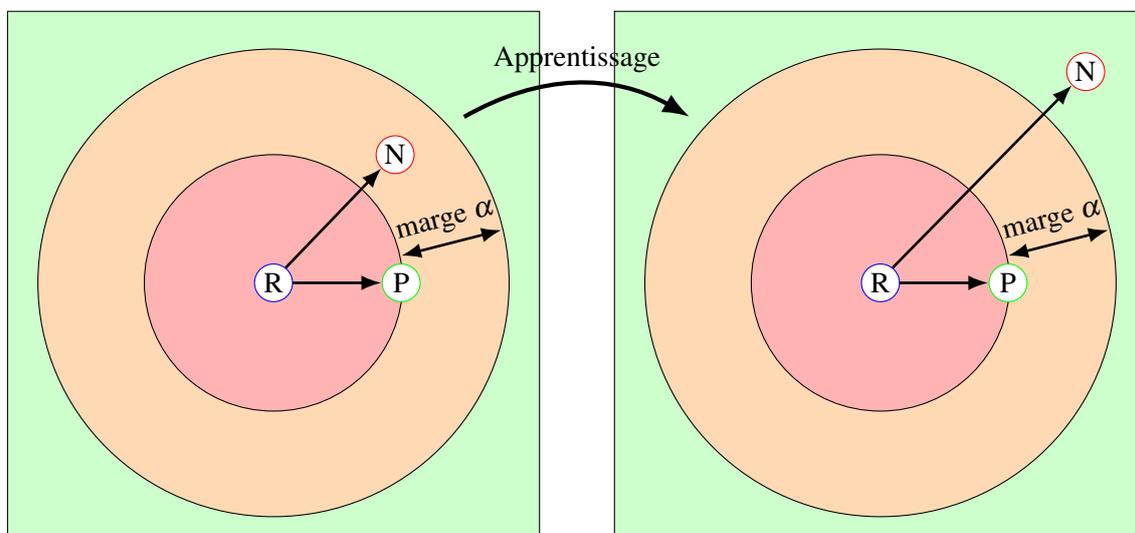


Figure 3.5 – Principe de l’apprentissage d’un réseau de triplets.

Figure inspirée de [SKP15].

Le calcul des Équations 3.15 pour la sélection d’images sur l’ensemble du jeu de données est très coûteux. C’est pourquoi ce calcul est traditionnellement réalisé en amont de l’apprentissage. De plus, pour sélectionner les images parmi l’ensemble du jeu de données, il est nécessaire que le jeu de données puisse être chargé dans la mémoire de travail de la machine qui effectue le calcul des conditions. Les jeux de données actuels sont souvent trop volumineux pour pouvoir être chargés en entier dans la mémoire. C’est pourquoi il a été proposé de réaliser ce calcul pendant l’apprentissage [Wan+14; SKP15]. Pour maximiser les performances du calcul de la méthode d’optimisation des poids par descente de gradient sur processeur graphique, les données

d'apprentissage sont séparées en paquets (*mini-batch*) avant d'être présentées en entrée du réseau pour l'apprentissage. Pour chaque paquet, les couples d'images "négatives-moderées" sont alors sélectionnées de manière itérative, en parallèle de l'apprentissage. Récemment, HERMANS, BEYER et LEIBE [HBL17; Yu+18] proposent de sélectionner les images négatives-difficiles dans les paquets. Sur leur problème spécifique de la détection de visages, ils montrent qu'il n'est pas nécessaire d'introduire la condition de marge modérée car le fait de découper le jeu de données en paquets aléatoires garantit une certaine variété d'images dans les paquets.

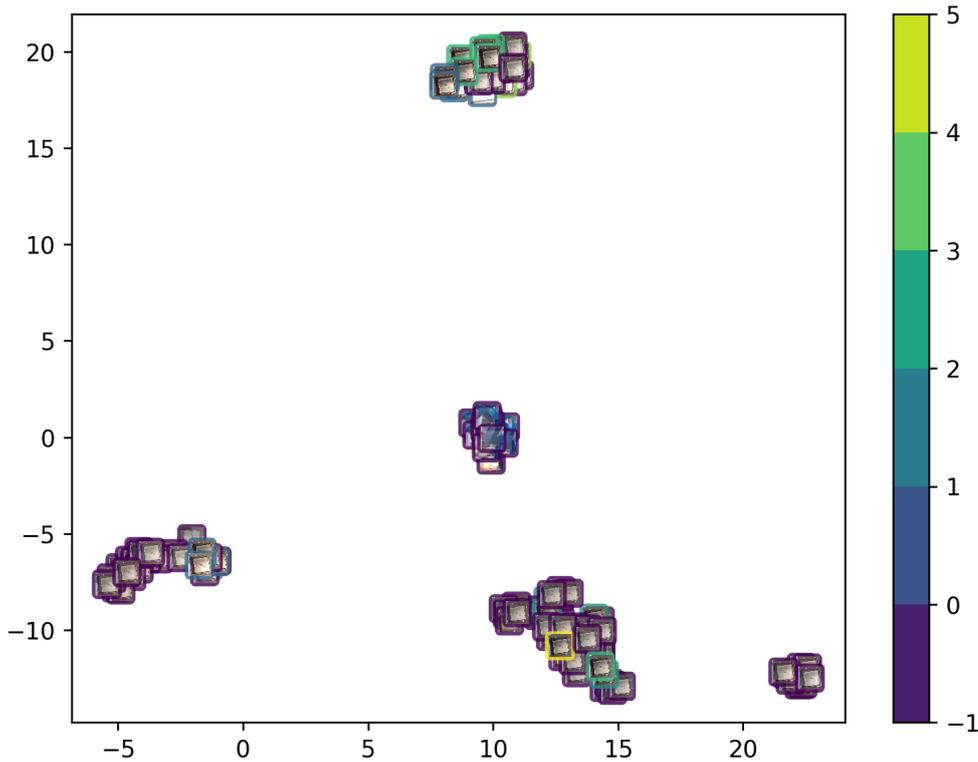


Figure 3.6 – Projection par *t-SNE* à partir des valeurs de la dernière couche d'un réseau de triplets. L'échelle 1-5 correspond aux niveaux de qualité évalués par les experts humains ; -1 correspond aux pièces non annotées.

La Figure 3.6 présente les valeurs de la dernière couche d'un réseau de triplets, de 200, projetée en deux dimensions par l'algorithme *t-SNE* §3.2.4.5. Les différentes classes annotées par les experts humains sont bien séparées. Les pièces non annotées sont également positionnées dans les bonnes classes. Enfin, il est intéressant d'observer qu'un paquet correspondant à une erreur de mesure, comme par exemple l'absence de pièces et la capture du bras robotique préhenseur est mis en évidence.

L'apprentissage de métrique est un domaine de recherche actif. SOHN [Soh16] généralisent par exemple ces méthodes à *N*-paires d'images et montre l'intérêt d'une fonction de coût à 72-paires en comparaison des triplets (3-paires). SONG et al. [Son+15] proposent une méthode d'adaptation de domaine : un modèle pré-appris peut être complété à l'aide de nouveaux individus. [Wan+17] WANG et al. proposent d'utiliser une fonction de coût basée sur une projection dans un espace angulaire. DUAN et al. [Dua+18] proposent la méthode *DAML* (*Deep Adversarial Metric Learning*) qui utilise un réseau antagoniste génératif (détaillé dans la Section 3.2.4.8) afin de produire une image négative-difficile artificielle, à partir d'un triplet d'images défini. Les résultats obtenus montrent l'intérêt de la méthode dans le cas où le nombre d'individus est faible. Dernièrement, ZHENG et al. [Zhe+19] proposent une comparaison de ces méthodes (*N*-paires, métrique angulaire et *DAML*) sur trois jeux de données de références.

3.2.3.3 Intérêt des méthodes issues de l'apprentissage par renforcement

Les récents succès des méthodes d'apprentissage par renforcement peuvent également être inclus dans cette section. À chaque itération, l'algorithme choisit de réaliser une action et il obtient, pour cette action, une récompense, positive en cas d'amélioration de l'objectif, ou négative dans le cas inverse. L'apprentissage par renforcement est particulièrement adapté au réglage optimal des procédés. Il est nécessaire de disposer d'un environnement capable de recevoir une action et produire une récompense. Cet environnement peut être une simulation réaliste de l'environnement, ou bien l'environnement réel. Dans notre cas, les actions seraient la modification des réglages du procédé et la récompense, la pièce produite. Cependant, nous ne disposons actuellement pas de simulation informatique réaliste de notre problème. De plus, l'évaluation en conditions réelles nécessite de disposer d'une machine pilotée par l'algorithme, qui produit un minimum de mille pièces. Néanmoins, dans le contexte d'une production en quantité industrielle, l'utilisation de l'apprentissage par renforcement devient possible. C'est une piste de recherche qui devra être évaluée à la suite de ces travaux.

3.2.4 Apprentissage non-supervisé

Contrairement aux méthodes précédemment présentées, nous cherchons ici à classer sans aucune assistance d'un expert humain. Supprimer le besoin d'annotation d'un expert amène deux bénéfices : une disponibilité totale du système et une suppression des risques d'erreurs humaines. Ces méthodes permettent de réduire la dimension des données et de classifier en utilisant uniquement les hypothèses sur la structure des données, précitées dans la Section 3.2.3, sans annotation. La réduction de dimensions est un enjeu important dans notre problématique industrielle. En effet, les données enregistrées par les capteurs ont un ordre de grandeur de l'ordre du million de valeurs scalaires par pièces. Le traitement de la mesure doit être effectué sur un système embarqué, intégrable à la ligne de production, qui a une puissance de calcul faible. Plus la dimension de l'information issue des capteurs est réduite, plus l'inférence de la conformité sera rapide. De plus, la réduction de l'information est un objectif crucial afin de pouvoir piloter en boucle fermée le procédé. En effet, le pilotage multivarié des procédés industriels est possible dans un espace de dimensions faibles (de dimensions dix à cent). Il existe deux grandes classes de méthodes de réduction de dimensions. Celles-ci s'appuient sur deux démarches distinctes : la factorisation de matrices (ACP §3.2.4.3, ACP à noyau §3.2.4.4, Auto-encodeurs) et les graphes de voisinages (K-moyennes §3.2.4.1, §3.2.4.5, §3.2.4.2, §3.2.4.6). Nous évaluons dans cette section les algorithmes les plus importants que nous utilisons pour répondre à notre problème de contrôle automatique de la conformité des produits. La réduction de dimensions et le *clustering*³ spectral (aussi appelé "apprentissage de variétés") sont souvent combinées. Dans un premier temps on réduit la dimension de l'information, puis on regroupe par paquet les individus (*clustering*) à partir de l'espace réduit.

3.2.4.1 K-moyennes

L'algorithme des K-moyennes (*K-means*), proposé par MACQUEEN [Mac67; Llo82] cherche à séparer les individus X en C groupes de classes telle que la variance soit égale entre les groupes. C'est une méthode de *clustering* spatial dans l'espace des données initiales. Soit c_j le barycentre d'un groupe dans l'espace des données, l'algorithme cherche à minimiser la distance Euclidienne des individus au point c . Il s'agit de minimiser l'inertie⁴ du groupe d'individu $c_j \in C$. L'algorithme

3. Nous employons le terme anglais *clustering* en lieu et place du mot français "regroupement", afin de préciser qu'il s'agit de réaliser un regroupement algorithmique des données en paquets de données similaires, et non pas d'autres formes de regroupement.

4. L'inertie est la somme des distances Euclidiennes entre les individus du groupe.

est itératif. Le nombre de groupes doit être préalablement connu. La position initiale des points c_j est initialisée aléatoirement. À chaque itération, les individus $\mathbf{x}_i \in X$ sont associés au point c_j le plus proche. La position de c_j est alors mise à jour comme barycentre des points \mathbf{x}_i qui lui sont associés, Équation 3.17.

$$C(X) = \arg \min_{c_j \in C} \sum_{j=1}^{n_c} \sum_{i=1}^n \left(\|\mathbf{x}_i - c_j\|^2 \right) \quad (3.17)$$

La convergence est nécessairement atteinte mais elle peut être un minimum locale. Le résultat final est fortement dépendant de la position initiale des points centroïdes c . C'est pourquoi l'algorithme complet est répété de nombreuses fois avec des initialisations de c_j différentes. La méthode d'initialisation *k-means++*, plus performante, a été proposée par ARTHUR et VASSILVITSKII [AV07]. Elle propose de positionner les points centroïdes c de manière à les éloigner au maximum entre eux. Les résultats obtenus sont ainsi meilleurs. Enfin, la distance Euclidienne ℓ_2 est une métrique qui répond mal aux problèmes en très grandes dimensions ou aux formes de groupes allongées ou irrégulières. Cette distance ne prend pas en compte la variation de la densité des points dans l'espace. C'est pourquoi une transformation de l'espace des données est souvent réalisée en amont de cet algorithme (ACP, *kernel trick* ...). Des méthodes de *clustering* spectral ont alors été proposées pour répondre à cette limite.

La complexité de l'algorithme K-moyennes est de l'ordre de $O(N \log(N))$. C'est la méthode de *clustering* la plus efficace qui existe.

3.2.4.2 HDBSCAN

ESTER et al. [Est+96] proposent la méthode *DBSCAN* (*Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise*) qui s'appuie sur l'organisation spatiale, en matière de densité, des données. L'algorithme distingue en amont trois catégories d'individus dans les données. Pour chaque point c , on distingue : les points centraux s'ils sont entourés d'un nombre minimal *MinPts* de voisins et sont situés dans un rayon ϵ du point c ; les points de bordures s'ils ont moins de *nb_min_points* voisins et sont situés dans un rayon ϵ ; et les points de bruit, dont la distance avec c est supérieure à ϵ . Ainsi, le nombre de paquets est défini par *nb_min_points* et les points de bordures sont associés au paquet par leur point c correspondant. À la différence de l'algorithme K-moyennes §3.2.4.1, l'algorithme *DBSCAN* ne cherche pas à produire des paquets circulaires et les points trop éloignés sont ignorés ce qui le rend robuste aux perturbations. Néanmoins, les performances de la méthode *DBSCAN* sont limitées sur les problèmes où les individus ont de grandes dimensions. On cherchera à réduire la dimension de l'information, par exemple lorsque l'on traite des images, avant d'appliquer cette méthode. Les hyper-paramètres *nb_min_points* et ϵ doivent être optimisés. Trouver un couple optimal peut être difficile, dans le cas où les données sont réparties de manière fortement non homogène ; c'est à dire lorsque les différences de densités de la répartition des points sont grandes.

Récemment, CAMPELLO, MOULAVI et SANDER [CMS13] introduisent la méthode *HDBSCAN* (*Density-Based Clustering Based on Hierarchical Density Estimates*) qui fait évoluer *DBSCAN* en prenant en compte l'organisation spatiale des données. *HDBSCAN* ne nécessite pas de paramètre ϵ .

De nombreuses méthodes de *clustering* s'appuient sur l'organisation hiérarchique des données. C'est le *clustering* hiérarchique, qui utilise les arbres binaires de tri. Le résultat est souvent visualisé sous forme de dendrogrammes. Une évolution du *clustering* hiérarchique ajoute l'utilisation de l'analyse spectrale. Ce sont les méthodes de *clustering* spectral qui proposent des solutions à ces limites. Il s'agit d'utiliser les relations entre les individus au sein des paquets, par la construction de graphes et par l'analyse spectrale, c'est à dire l'utilisation des vecteurs propres des données. Nous invitons le lecteur à consulter l'excellent tutoriel "A Tutorial on Spectral

Clustering” [von07] sur les méthodes de *clustering* spectrales, qui ne peuvent être approfondies dans le cadre de ce travail.

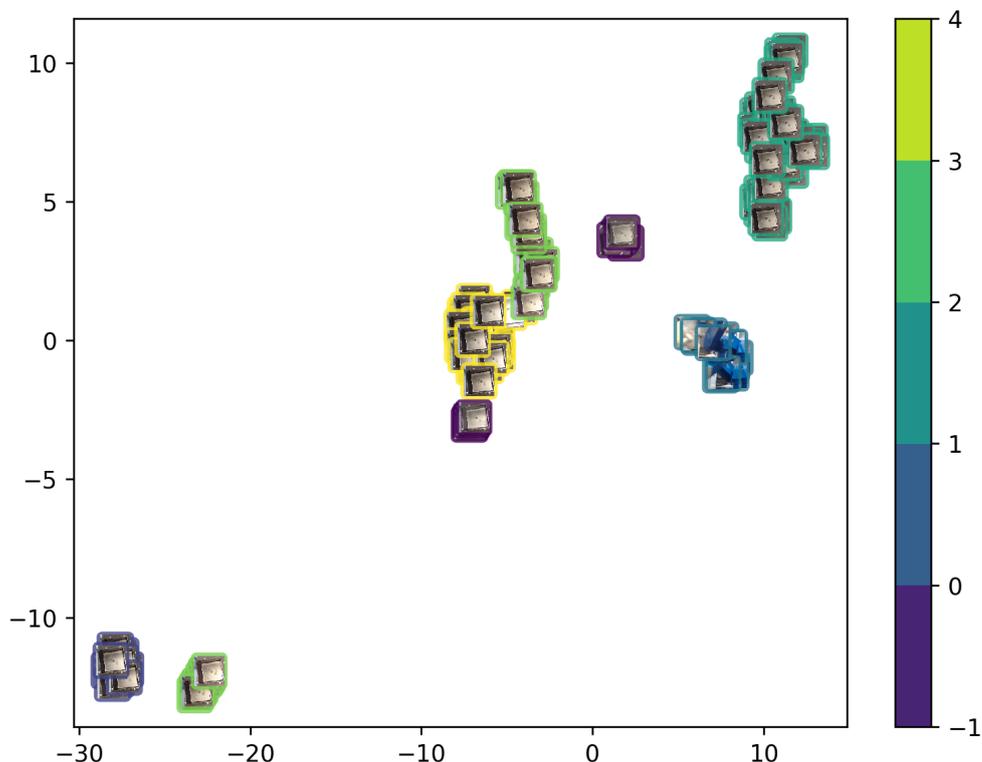


Figure 3.7 – Projection par UMAP à partir de la valeur des pixels des images. L'échelle -1 à 4 correspond aux clusters obtenus par HDBSCAN.

La Figure 3.7 présente les clusters obtenus par l'algorithme *HDBSCAN*. La dimension des données a préalablement été réduite par l'algorithme *UMAP* §3.2.4.6. Les différents niveaux de qualité annotés par l'expertise humaine sont détectés.

3.2.4.3 Analyse en Composantes Principales

Dès 1901, PEARSON; HOTELLING [Pea01; Hot33] proposent la méthode d'Analyse en Composantes Principales (*Principal Component Analysis*). C'est la méthode de réduction de dimensions de référence qui s'appuie sur une factorisation de la matrice représentative des données. Pour un jeu de données X de N individus, on calcule la matrice de covariance \bar{C} , Équation 3.18.

$$\bar{C} = \text{cov}(X) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_n - \bar{x}) \cdot (x_n - \bar{x})^T \quad (3.18)$$

$$\lambda(X \cdot V) = (X \cdot \bar{C} \cdot V) \quad (3.19)$$

Soit m le nombre de variables par individus. Les vecteurs propres v_k (avec $1 \leq k \leq N$, de la matrice de covariance \bar{C} sont appelés les composantes principales de X , Équation 3.19. Les valeurs propres λ_k sont utilisées pour ordonner les vecteurs propres v_k , dans l'ordre croissant de la variance des données exprimées par chaque vecteur propre. On obtient un espace de dimensions réduit où l'on peut projeter les données. La réalisation d'une ACP entraîne nécessairement une réduction de la variance, en comparaison de la variance de l'ensemble des individus du jeu de données initial. La

valeur de cette réduction indique la perte d'informations liée à l'ACP. Dans ce travail, nous serons satisfaits des ACP qui ne font perdre que 1% de la variance des données initiales. On choisira le nombre k de vecteurs supports en fonction de ce critère. Dans notre application, cinquante vecteurs supports sont suffisants.

L'Analyse en Composantes Principales peut être employée comme méthode de réduction de l'information, par transformation linéaire. Nous pouvons appliquer une ACP à k composantes sur l'image brute, ce qui compresse l'information dans un vecteur de dimension k . Puis nous appliquons la transformée inverse pour obtenir une reconstruction. La Figure 3.8 montre la capacité de l'ACP à encoder les caractéristiques d'une image, en fonction du nombre de composantes. Des artefacts de couleurs (ici vertes) sont présents. L'erreur de reconstruction est la différence des valeurs des pixels entre l'image originale et l'image reconstruite. Le graphique 3.9 montre l'évolution de la qualité de reconstruction en fonction de la proportion de la variance conservée. On observe que l'erreur diminue lorsque le nombre de composantes et la variance conservée augmente. Il est intéressant d'observer que pour 5 composantes, ce sont les détails des côtés de la pièce et des défauts du fond de la pièce qui ne sont pas représentés. Nous nous intéressons ; dans le cadre de notre problématique de contrôle de la conformité, à ces défauts, mais l'ACP prend en compte en priorité les caractéristiques globales de l'image. Lorsque l'on utilise 100 composantes, l'erreur de reconstruction est négligeable. Des artefacts restent néanmoins présents. Dans les sections suivantes, nous étudierons des méthodes qui permettent de supprimer la présence d'artefacts et de prendre en compte les caractéristiques locales des images.

Nombre de composantes	Reconstruction	Différence	Reconstruction	Différence	Variance conservée	Erreur de reconstruction
n=1					41%	0,015
n=2					64%	0,0093
n=5					87%	0,0035
n=100					99.7%	0,00025

Figure 3.8 – Compression par ACP.

La Figure 3.10 présente les valeurs des deux dimensions obtenues pour chaque pièce en appliquant une ACP sur la valeur des pixels bruts de l'image. On observe une séparation intéressante des images qui ne contiennent pas de pièce, mais par exemple le bras robotique préhenseur. En revanche, seuls deux paquets sont mis en évidence, parmi lesquels des pièces de bonnes qualité et des pièces de mauvaises qualité sont mélangées. L'ACP réalisée sur les pixels bruts est limitée aux motifs globaux de l'image. Il est nécessaire de réaliser un prétraitement

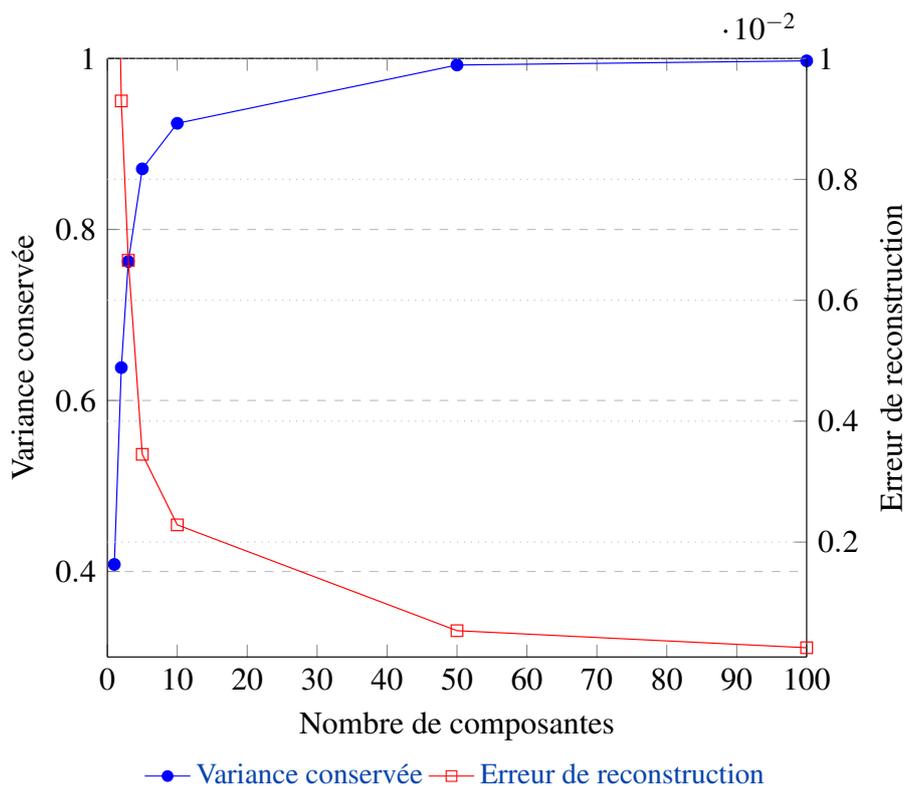


Figure 3.9 – Qualité de la compression par ACP en fonction du nombre de composantes.

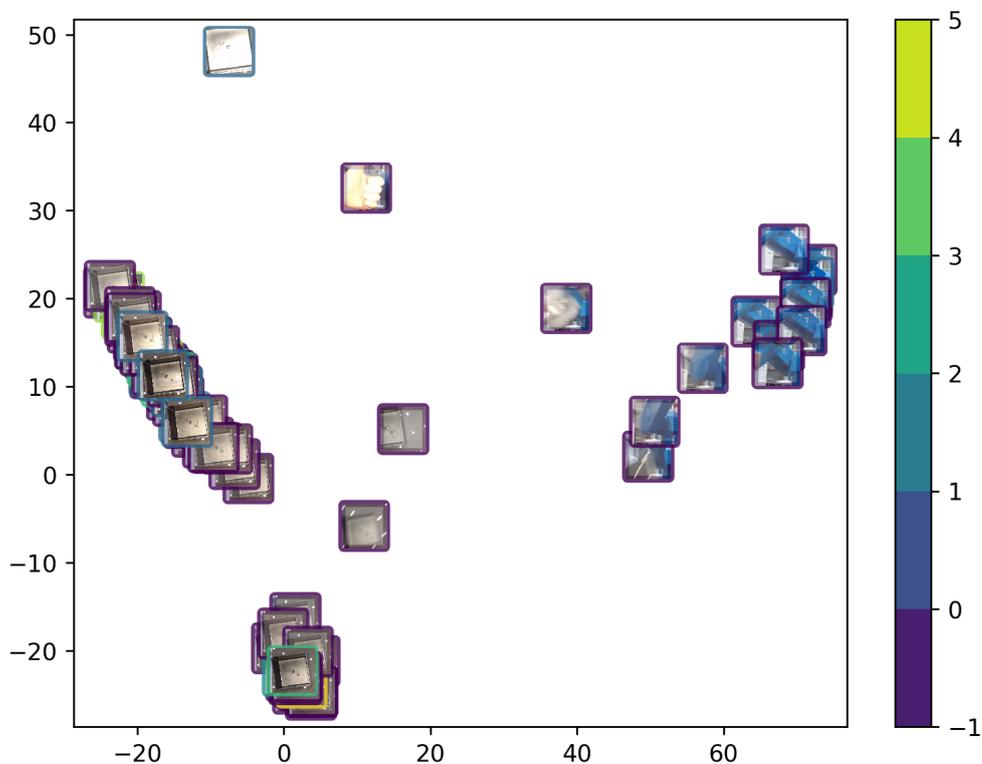


Figure 3.10 – Projection par ACP à partir de la valeur des pixels des images. L'échelle 1-5 correspond aux niveaux de qualité évalués par les experts humains; -1 correspond aux pièces non annotées.

des images pour extraire les motifs pertinents sur notre problème avant d'appliquer une ACP. L'expertise humaine est requise pour choisir les méthodes judicieuses de prétraitement à appliquer. Nous détaillons des approches de ce type dans la Section 2.5.1. L'ACP utilise ici deux uniques composantes. Comme présenté dans les figures 3.8 et 3.9, une centaine de composantes permettent de modéliser la variance de notre jeu de données de manière satisfaisante. Avec deux composantes, la perte de variance est de 36 %, ce qui est important. Il sera judicieux d'utiliser un nombre de composantes plus important, ou bien d'utiliser une méthode plus robuste tels que le *t-SNE* §3.2.4.5 ou *UMAP* §3.2.4.6.

Le calcul de la matrice de covariance \bar{C} a une complexité de l'ordre de $O(m^2 \cdot N)$. La décomposition en valeur propre a une complexité $O(m^3)$. La complexité de l'ACP est $O(m^2 \cdot N + m^3)$. Soit, pour un nombre de variables constant $m \ll N$, l'ACP a une complexité linéaire $O(N)$. Ainsi, le coût de son calcul est négligeable sur les ressources informatiques modernes. C'est une méthode très efficace de réduction de l'information.

3.2.4.4 ACP à noyau

L'ACP à noyau (*Kernel-PCA*) réalise une ACP dans l'espace transformé par un noyau K (voir la méthode de construction d'un noyau, §E.2.1). Elle a été proposée par SCHÖLKOPF, SMOLA et MÜLLER [SSM97 ; SSM98]. La méthode de la transformée par noyau utilise une transformation φ de l'espace initial des données, vers un espace où les données sont linéairement séparables. On applique alors la méthode de l'ACP dans ce nouvel espace pour trouver les k vecteurs propres \mathbf{V} , Équation 3.20.

$$\begin{aligned} \bar{C}_{ker} = \text{cov}(\varphi(X)) &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \varphi(\mathbf{x}_n - \bar{\mathbf{x}}) \cdot \varphi(\mathbf{x}_n - \bar{\mathbf{x}})^\top \\ \lambda (\varphi(X) \cdot \mathbf{V}) &= (\varphi(X) \cdot \bar{C}_{ker} \mathbf{V}) \end{aligned} \quad (3.20)$$

L'optimisation des hyper-paramètres d'une ACP à noyau (choix du noyau et de ses paramètres) peut être réalisée par recherche exhaustive d'hyper-paramètres et validation croisée. On cherche à obtenir la transformée qui limite au maximum la corruption de l'information du jeu de données initial. Ainsi, on cherche l'ACP qui, suite à une projection des données dans l'espace des vecteurs propres, puis à la transformée inverse dans l'espace initial, conserve les données. La métrique utilisée est la norme Euclidienne, entre les données initiales et les données transformées puis transformées inverses, par l'ACP à noyau.

La Figure 3.11 présente le résultat d'une optimisation sur k : le nombre de paramètres et γ : coefficient d'un noyau *RBF*. On choisira ici $k = 20$ et $\gamma = 0,02154$.

Nous obtenons des performances inférieures à l'ACP, Figure 3.12. La transformation par un noyau gaussien est ici inutile. De manière générale, le traitement d'images aux textures complexes nécessite l'utilisation de modèles fortement non linéaires, ce qui n'est pas le cas du noyau gaussien. C'est pourquoi les méthodes par réseaux de neurones non linéaire obtiennent de meilleurs résultats. Nous les étudierons dès la section suivante, §3.2.4.7.

La complexité de l'ACP à noyau est $O(m^2 \cdot n^2 + m^3)$ pour un noyau linéaire et $O(m^2 \cdot n^3 + m^3)$ pour un noyau gaussien (*RBF*). Dans le cas $m \ll n$, les complexités sont quadratiques $O(n^2)$ pour un noyau linéaire et cubique $O(n^3)$ pour un noyau gaussien. Lorsqu'on utilise l'ACP à noyau, on limitera le nombre de variables m des individus. De plus, la difficulté apparaît dans le cas où le jeu de données est grand ($n > 1000$) : le coût du stockage du noyau K en mémoire devient significatif.

3.2.4.5 t-SNE

La méthode *t-SNE* (*t-Distributed Stochastic Neighbor Embedding*) est proposée par VAN DER MAATEN et HINTON [vH08]. C'est une méthode de réduction de l'information itérative

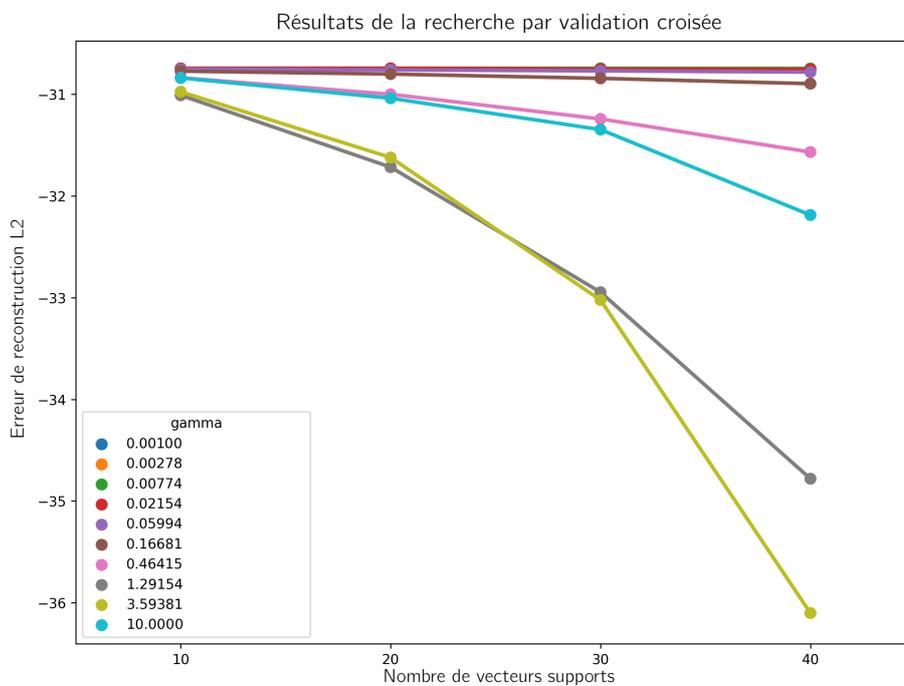


Figure 3.11 – Optimisation des paramètres d’une ACP à noyaux. Métrique : Norme ℓ_2 .

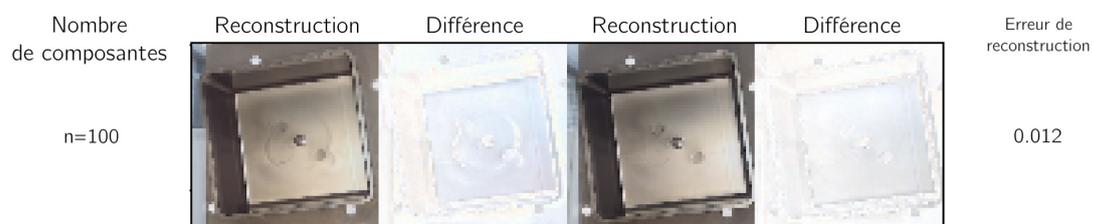


Figure 3.12 – Compression par ACP à noyau.

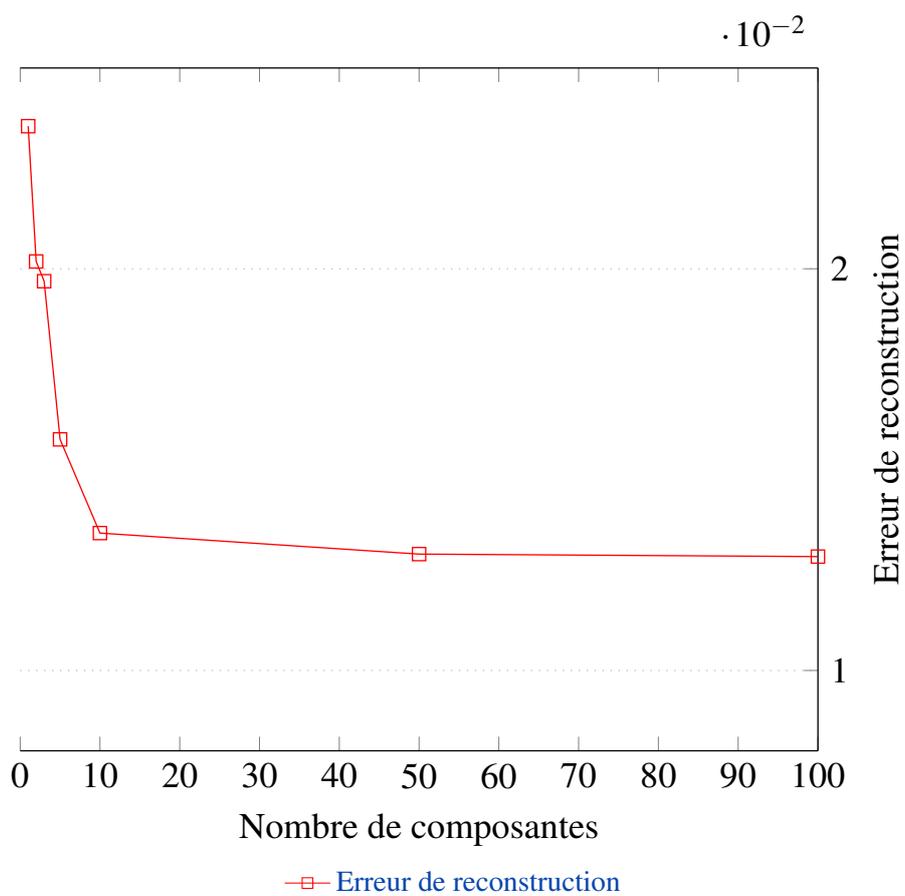


Figure 3.13 – Qualité de la compression par ACP à noyau en fonction du nombre de composantes.

particulièrement adaptée à la visualisation des données dans un espace à deux ou trois dimensions. t -SNE est une évolution de la méthode SNE (*Stochastic Neighbor Embedding*) [HR03]. Les deux méthodes utilisent la même démarche. Une distribution de probabilité P est générée afin de modéliser la distribution des distances entre les points, pour le jeu de données initial. Le nombre de points voisins à prendre en compte est défini par l'hyper-paramètre de *perplexité*. Une petite valeur de perplexité permet de mettre en évidence les structures locales, alors qu'une grande valeur mettra en évidence les structures globales. La valeur de perplexité définira la variance de la distribution. En pratique, on choisira une valeur dans $[5; 50]$. Une distribution Q est générée afin de modéliser les mêmes propriétés des données, mais dans un espace de dimensions réduit. On cherche alors à minimiser l'écart entre les deux distributions P et Q afin de trouver la distribution Q optimale. Cette démarche permet de modéliser la structure non-linéaire des données. Les paramètres de Q sont ajustés par descente de gradient stochastique, afin de minimiser la divergence de Kullback-Leibler entre les deux distributions, Équation 3.9. SNE utilise une distribution de probabilité gaussienne, alors que t -SNE, une distribution qui suit une loi de Student (*t-distribution*). La loi de Student est à queue-longue. Elle tend plus lentement vers zéro qu'une distribution gaussienne. Aussi, elle est plus adaptée à la modélisation des distances entre de petits nombres d'individus. Enfin, t -SNE propose de simplifier les calculs de l'optimisation de Q en utilisant une loi de Student à un degré de liberté, qui est une loi de Cauchy, $f(t) = \frac{1}{\pi(1+t^2)}$.

Trois conséquences de la méthode limitent son utilisation à la seule visualisation de données. La réduction de dimensions obtenue n'est pas une fonction. Aussi, de nouveaux individus ne pourront pas être projetés dans l'espace réduit. L'algorithme est stochastique et chaque exécution produit un résultat différent. Enfin, les résultats dépendent fortement de la valeur de l'hyper-paramètre *perplexité*.

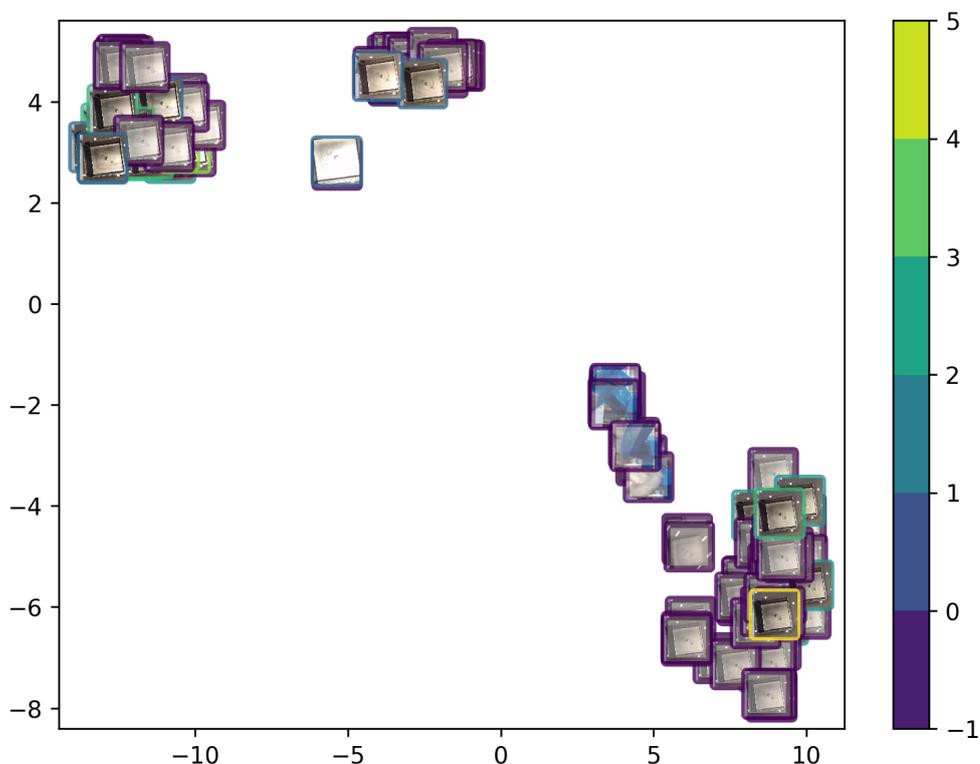


Figure 3.14 – Projection par t -SNE à partir de la valeur des pixels des images. L'échelle 1-5 correspond aux niveaux de qualité évalués par les experts humains ; -1 correspond aux pièces non annotées.

La Figure 3.14 présente la projection obtenue par *t-SNE* sur la valeur des pixels bruts de l'image de chaque pièce. On observe une séparation en quatre paquets, dont un paquet qui contient les images "erronées" (qui ne contiennent pas de pièce). À la différence de la projection par ACP, Figure 3.10, trois paquets de différente qualité de pièces sont mis en évidence. L'algorithme *t-SNE* propose une réduction de dimensions plus pertinente que l'ACP, pour les problèmes où des motifs complexes doivent être distingués. Cependant, appliquer cet algorithme sur les valeurs des pixels bruts limite les résultats à la séparation de motifs globaux. Il est nécessaire de réaliser un prétraitement des images pour extraire les motifs pertinents sur notre problème. Une approche par apprentissage supervisé et réseau de neurones de convolution est la plus pertinente. L'apprentissage par transfert de domaine (§3.2.2) peut également être utilisé, comme méthode d'extraction des motifs pertinents.

Une dernière limite de cette méthode est posée par le calcul de la distance Euclidienne entre les points que l'on cherche à modéliser dans les distributions P et Q . La distance Euclidienne nécessite de vérifier l'hypothèse de linéarité de l'espace entre les points. C'est une hypothèse forte qui est rarement vérifiée pour les données complexes, notamment lorsque la répartition des points n'est pas uniforme. C'est pourquoi de nouvelles méthodes de réduction de l'information ont été proposées. Nous nous intéresserons en particulier à la méthode *UMAP* §3.2.4.6, qui utilise la géométrie riemannienne pour résoudre ces limites.

La complexité de l'algorithme *t-SNE* est de l'ordre de $O(dN^2)$, avec d la dimension de l'espace réduit. [Maa14] propose d'accélérer l'algorithme à une complexité de $O(dN \log N)$, dans le cas où $d \leq 3$ en approximant le gradient par l'algorithme à arbres binaires de recherche de BARNES et HUT [BH86].

3.2.4.6 UMAP

La méthode de réduction de l'information *UMAP* est proposée par MCINNES, HEALY et MELVILLE [MHM18; McI+18]. Elle s'appuie sur l'apprentissage de variété (*manifold learning*). On cherche, dans l'espace de dimensions initiales, une variété (des surfaces topologiques), pour laquelle les données sont au plus proche de celle-ci.

La variété obtenue est alors une représentation des données dans un espace de dimensions réduit. Alors que l'ACP réalise une projection dans un espace euclidien, *UMAP* projette les données dans un espace riemannien. L'espace riemannien possède les hypothèses de connexité et de complétude, ce qui limite la perte d'informations. L'algorithme *UMAP* cherche une variété \mathbb{V} dans cet espace, telle que les données soient situées au plus proches de celle-ci. Afin d'utiliser cette démarche, trois hypothèses sont faites :

- La distribution des données est uniforme sur la variété \mathbb{V} utilisée.
- La métrique riemannienne peut être localement approximée comme une constante.
- L'espace riemannien utilisé est connexe.

Le théorème du nerf [Zis72] affirme qu'il est possible de représenter la variété topologique \mathbb{V} par un n -simplexe⁵. Dans ce cas, \mathbb{V} et sa représentation en simplexes sont équivalentes. Il est alors possible de modéliser ces simplexes par une distribution combinatoire P , en appliquant la logique floue (topologie-floue). Nous invitons le lecteur qui souhaite approfondir ce raisonnement à consulter la publication originale des auteurs de l'algorithme *UMAP* [MHM18]. Par la suite, représenter les données dans un espace de petites dimensions, revient à trouver la variété de petites dimensions qui possède la distribution Q la plus similaire possible, avec la distribution P de la variété des données initiales. Cela revient à trouver la distribution Q telle que l'entropie croisée entre les deux distributions P et Q soit minimale. Cette démarche est similaire à la minimisation

5. Un simplexe est l'élément topologique le plus simple possible.

de la divergence de Kullback-Leibler de t -SNE §3.2.4.5 qui met en évidence la structure locale des données, mais elle permet également de préserver la structure globale.

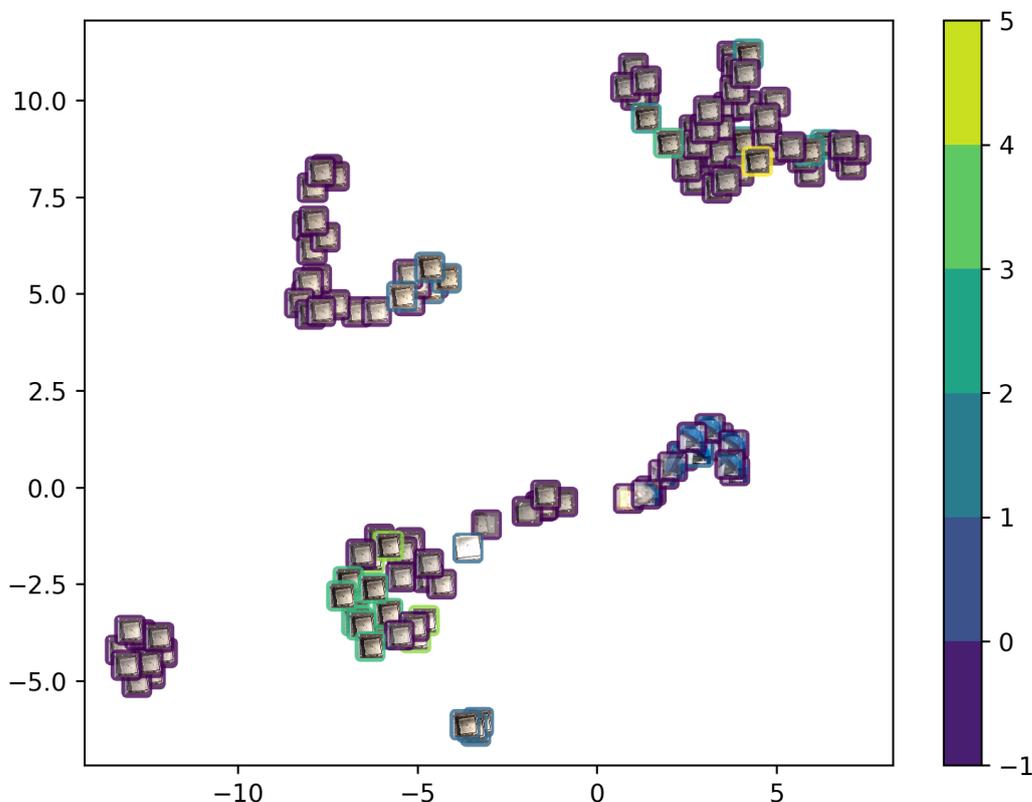


Figure 3.15 – Représentation par UMAP à partir de la valeur des pixels des images. L'échelle 1-5 correspond aux niveaux de qualité évalués par les experts humains; -1 correspond aux pièces non annotées.

La Figure 3.15 présente la représentation en deux dimensions obtenues en appliquant UMAP sur la valeur des pixels brutes de l'image. En comparaison de t -SNE, UMAP permet de mettre en évidence la structure globale des données dans les deux dimensions, tout en conservant la structure locale des paquets d'individus. Les images qui ne contiennent pas de pièces sont séparées, ainsi que le paquet de pièces annotées d'un niveau de qualité 0 (mauvais). De plus, le niveau de qualité 1 est séparé. Les niveaux 2 à 5 sont représentés dans deux paquets distincts. Il apparaît un paquet de pièces de très bonne qualité (niveau 5). Ce paquet contient quelques pièces des niveaux 3 et 4; aussi cela indique que l'annotation humaine n'est pas robuste lorsque l'on approche de la qualité maximale. En comparaison des résultats obtenus avec un réseau de triplets, Figure 3.6, cette méthode présente une séparation des paquets identiques, mais sans annotation humaine et avec un coût de calcul plus de cent fois moindre. L'approche topologique permet d'améliorer les performances et la méthode UMAP montre son intérêt dans le cadre d'une approche non-supervisée de suggestion d'annotation à l'expert humain.

Afin de trouver le graphe de la représentation en petites dimensions, UMAP utilise l'algorithme (*Nearest-Neighbor-Descent*) d'optimisation de graphes proposé par DONG, MOSES et LI [DML11]. Les auteurs évaluent empiriquement la complexité de leur méthode de l'ordre de $O(N^{1.14})$. Aussi, la complexité de la méthode UMAP est limitée par cet algorithme. Elle est de l'ordre de $O(N \log N)$.

3.2.4.7 Auto-encodeurs variationnels

Un auto-encodeur cherche à reproduire la donnée entrée, avec le minimum de paramètres (ou Degrés De Liberté). Aucune annotation des données n'est requise. C'est une méthode qui permet d'apprendre la représentation des données dans un espace de dimensions réduit (aussi appelé *feature learning* ou *representation learning*). En 1987, LECUN et MILGRAM ; GALLINARI et al. proposent un réseau auto-encodeur utilisant des réseaux de neurones, afin de supprimer le bruit d'images [LM87 ; Gal+87]. Dans leurs travaux, ils étudient la capacité du réseau à mémoriser les caractéristiques des images initiales, en fonction de son architecture. En parallèle, BALLARD propose un auto-encodeur (appelé dans ce texte *systèmes auto-associatifs*) à trois couches [Bal87]. Dans ces travaux, les poids des neurones sont ajustés par rétro-propagation du gradient, qui a été récemment proposée.

Un auto-encodeur se compose de deux parties : un encodeur $z = f(x)$ qui compresse l'information initiale dans un espace de dimensions réduit (appelé *espace latent*) et un décodeur $\hat{x} = g(z)$ qui reconstruit ensuite une approximation de x à partir de z . f et g sont généralement des réseaux de convolutions profonds, dont les poids respectifs sont \mathbf{W}_f et \mathbf{W}_g . La Figure 3.16 présente l'architecture d'un auto-encodeur qui utilise des réseaux de convolutions pour ces fonctions.

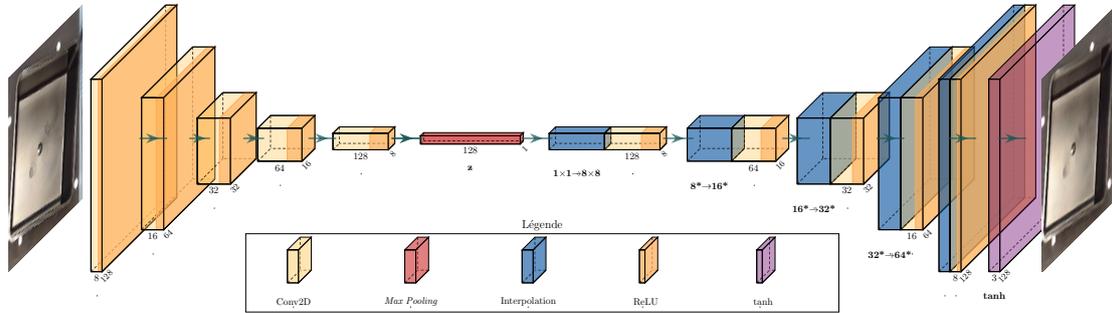


Figure 3.16 – Architecture d'un auto-encodeur.

Afin de mesurer la similitude telle que $x \simeq \hat{x}$, la fonction de coût à minimiser lors de l'apprentissage du modèle est souvent l'erreur quadratique entre x et \hat{x} , Équation 3.21.

$$\min_{\mathbf{W}_f, \mathbf{W}_g} \mathcal{L}_{\text{génération}}(x, \hat{x}) = \min_{\mathbf{W}_f, \mathbf{W}_g} \|x - g(f(x, \mathbf{W}_f), \mathbf{W}_g)\|^2 \quad (3.21)$$

Enfin, une contrainte indispensable est appliquée à la dimension de z , qui doit être très petite devant la dimension de x . Ainsi, seules les propriétés les plus importantes des données sont prises en compte. Un cas particulier apparaît si le décodeur g est une application linéaire et si la fonction de coût est l'erreur quadratique : alors les valeurs de z sont équivalentes aux valeurs propres d'une Analyse en Composantes Principales [BK88].

La Figure 3.17 présente une image entrée et sa reconstruction après le passage dans un auto-encodeur dont z a une dimension de 128 valeurs. On observe la perte d'information visuelle : la marque de l'éjecteur a , par exemple, disparu. En revanche, les défauts d'aspect qui nous intéressent sont reproduits. Le taux de compression est ici de $120 : 124 \times 124 \text{ pixels} \rightarrow 128 \text{ valeurs}$. À la différence de la compression par ACP, Figure 3.8, la reconstruction ne possède pas d'artefacts. En revanche, le coût de calcul de cette méthode est beaucoup plus grand que pour une ACP. Il est nécessaire de disposer d'une accélération des calculs massivement parallèle, par exemple sur processeur graphique, pour pouvoir construire un modèle à partir d'un grand nombre d'individus.

La Figure 3.18 présente les valeurs des 128 dimensions de z projetées par l'algorithme t -SNE, présenté dans la Section 3.2.4.5. Les différentes classes exprimées dans l'espace latent z sont mieux séparées que dans la Figure 3.14 qui utilisait les données brutes : l'ensemble des valeurs des pixels. On observe également que l'évaluation des cinq classes de qualité, évaluées par les

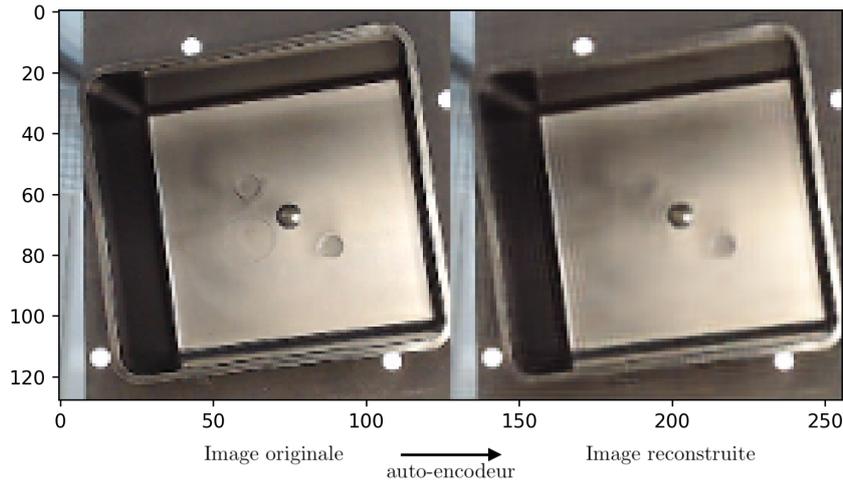


Figure 3.17 – Reconstruction d'une image par un auto-encodeur.

experts humains, est respectée. Les pièces non annotées sont positionnées dans les bonnes classes. Enfin, il est intéressant d'observer qu'un paquet correspondant à une erreur de mesure, comme par exemple l'absence de pièces et la capture du bras robotique préhenseur est mis en évidence.

Un auto-encodeur modélise une application (encodeur $x \rightarrow z$) et l'application inverse (générateur $z \rightsquigarrow \hat{x}$). Cependant, il est difficile d'interpoler les valeurs de z afin de générer des \hat{x} , car l'espace z n'a pas de contrainte de continuité; aussi z est généralement discontinue. Récemment, l'auto-encodeur variationnel (*Variational Auto-Encoder*) est proposé par KINGMA et WELLING; REZENDE, MOHAMED et WIERSTRA [KW13; RMW14]. Il utilise une méthode d'inférence variationnelle. À la différence d'un auto-encodeur, un VAE modélise le générateur g sous la forme d'une distribution de probabilité $p(x|z)$ sur les données. De même, l'encodeur f sera une distribution $q(z|x)$. Un a priori fort sur la distribution q est introduit : on cherche généralement $q(z|x)$ qui soit proche d'une gaussienne centrée $\mathcal{N}(\mu = 0, \sigma = 1)$. Ainsi, q sera continue. Cette condition revient à minimiser la divergence de Kullback-Leibler entre la distribution de l'encodeur $q(z|x)$ et la distribution du générateur $p(z|x)$. L'auto-encodeur variationnel nécessite une fonction de coût composite, Équation 3.22.

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{VAE} &= \mathcal{L}_{\text{génération}} + \mathcal{L}_{\text{latent}} \\ \text{avec } \mathcal{L}_{\text{latent}}(\hat{y}, y) &= \text{Divergence}_{KL}(p(z|x) \| \mathcal{N}(\mu = 0; \sigma = 1)) \end{aligned} \quad (3.22)$$

Lors de l'apprentissage, les distributions p et q sont modélisées par des réseaux de neurones. Les sorties du générateur seront les paramètres de la distribution : la moyenne et l'écart-type, tels que $q(z|x) = \mathcal{N}(z; \vec{\mu}(x), \text{diag}(\vec{\sigma}(x))^2)$. La Figure 3.19, inspirée de [Doe16], représente le graphe de calcul de ce modèle. Il devient possible de générer de nouvelles sorties à partir de la distribution $p(z)$, en tirant les valeurs de z à partir de la distribution $\mathcal{N}(\mu = 0, \sigma = 1)$. Ces nouvelles sorties ne sont pas nécessairement similaires aux données d'apprentissages de x . Ainsi, l'auto-encodeur variationnel généralise l'auto-encodeur et le rend *génératif*.

La Figure 3.20 montre des images générées à partir de tirages aléatoires sur la distribution P de l'espace latent z . On observe la diversité des défauts modélisés dans z , mais également le réalisme limité que produit le générateur d'un VAE. Cela est dû à la compression élevée et au petit jeu de données dont nous disposons ce qui entraîne du bruit. Il est intéressant d'observer des artefacts de couleur bleu, qui correspondent à la présence d'images dans le jeu de données où il n'y pas de pièce, mais où le bras robotique de couleur bleue est présent. Le bras robotique est néanmoins très peu présent dans z en comparaison des pièces : le VAE est robuste.

Les réseaux génératifs permettent de palier de manière intéressante au manque de variétés des individus dans les petits jeux de données. Cependant, les images générées sont souvent

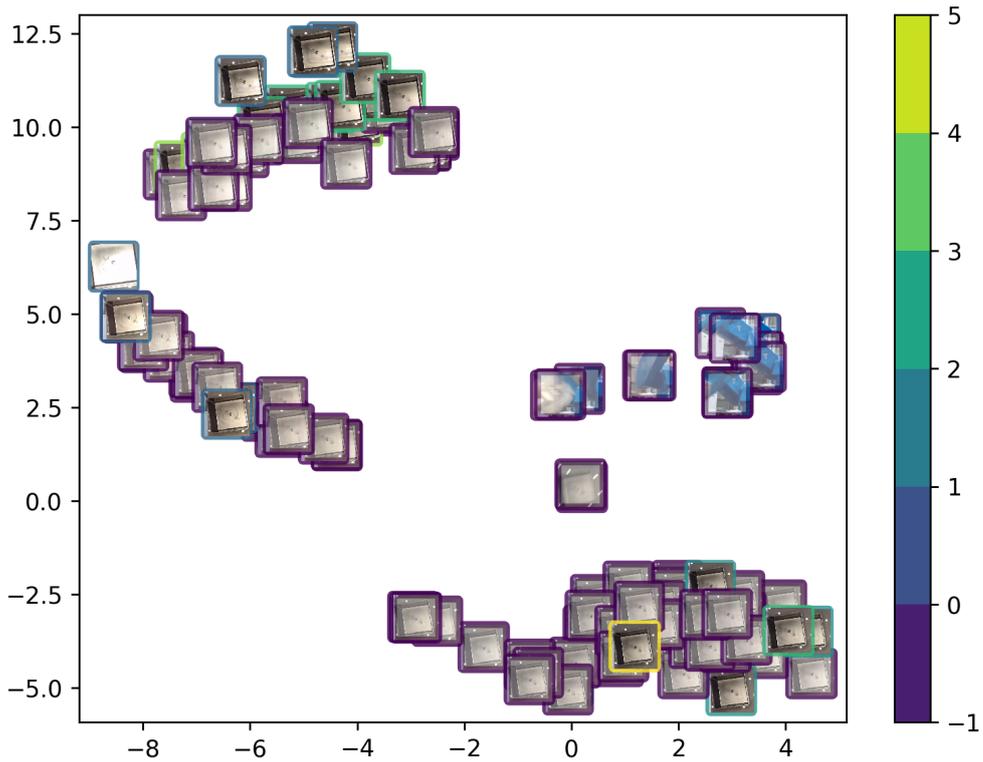


Figure 3.18 – Projection par *t*-SNE à partir des valeurs de l'espace latent z d'un VAE. L'échelle 1-5 correspond aux niveaux de qualité évalués par les experts humains; -1 correspond aux pièces non annotées.

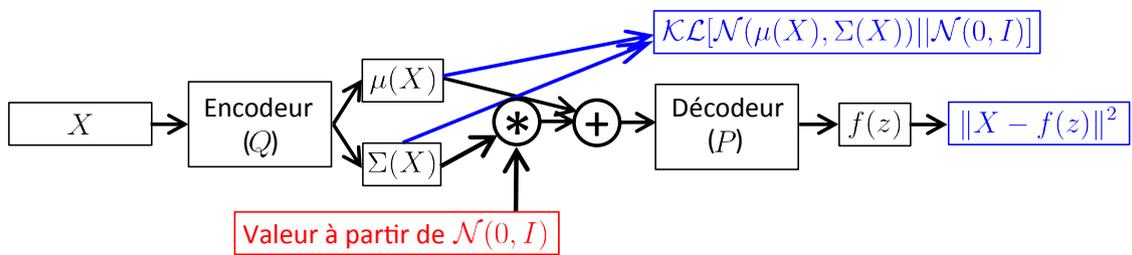


Figure 3.19 – Graphe d'un auto-encodeur variationnel, inspiré de [Doe16].

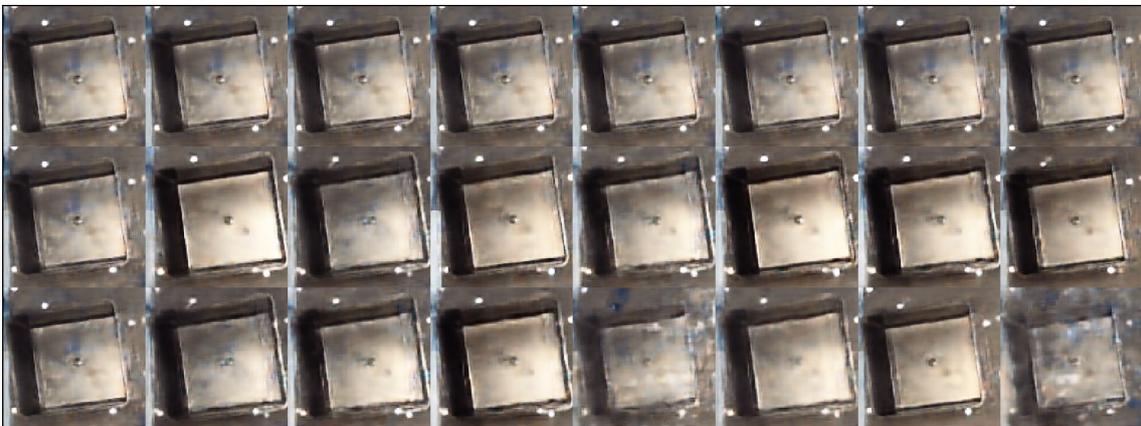


Figure 3.20 – Génération d'images à partir de la distribution modélisant l'espace latent d'un auto-encodeur variationnel.

floues, ce qui est souvent dû à la fonction de coût, l'erreur moyenne entre x et \hat{x} , utilisée lors de l'apprentissage. En effet, l'erreur moyenne ne permet pas la prise en compte dans z des motifs complexes qui sont peu présents dans le jeu de données. Dernièrement, KINGMA et WELLING [KW19] propose une synthèse exhaustive des solutions à cette problématique : construire des modèles plus profonds, ajouter des contraintes plus pertinentes dans la fonction de coût, comme par exemple des tâches de classification auxiliaires, et mettre à jour de manière plus judicieuse les poids lors de l'apprentissage du modèle. Un autre type de modèle génératif propose également d'améliorer le réalisme des images générées. L'apprentissage n'est pas réalisé sur l'erreur entre x et \hat{x} , mais de manière indirecte à partir de la valeur retournée par un second modèle. Ce principe permet d'améliorer le réalisme en prenant en compte des motifs complexes lors de la reconstruction. Il s'agit des modèles antagonistes génératifs que nous détaillons dans la Section 3.2.4.8.

L'apprentissage d'un modèle VAE est réalisé par descente de gradient stochastique. Les poids du modèle sont ajustés sur un individu du jeu de données de taille B individus (appelé mini-batch), pendant T itérations. La complexité de l'apprentissage est de l'ordre de $O(TB^2D + TB^2d)$, avec T le nombre d'itérations, B le nombre d'individus dans un mini-batch, D la dimension d'un individu et d la dimension de l'espace latent. De plus, la quantité de mémoire de travail nécessaire au stockage des mini-batch est de l'ordre de $O(B^2D)$. Ces coûts de calcul sont importants. Dans nos expériences, c'est la quantité de mémoire de travail sur le processeur graphique dont nous disposons (11 gigaoctets) qui conditionne le nombre d'individus par mini-batch (ici, $B = 64$ et $D = 128^2$), d'où la complexité des calculs ($T = 100$, $B = 64^2$, $D = 128^2$). Nous obtenons une complexité de l'ordre de 7 Milliards d'opérations et une occupation mémoire de l'ordre de 10 gigaoctets. La durée de l'apprentissage de notre modèle VAE est d'une heure sur un processeur graphique dédié (NVIDIA GTX 1080 Ti). Avec les ressources informatiques actuelles, une mise à jour journalière de ce modèle peut être envisagée, lors de son utilisation au sein d'un procédé industriel.

3.2.4.8 Réseaux antagonistes génératifs

Proposés par GOODFELLOW et al. [Goo+14], les réseaux antagonistes génératifs (*Generative Adversarial Networks*) permettent de raffiner le modèle de l'espace latent. En comparaison avec les auto-encodeurs, les images issues du générateur sont plus proches des images originales. Les GAN s'appuient sur une association de deux modèles qui sont entraînés en concurrence : un générateur g génère $\hat{x} = g(z)$ et un classifieur d (appelé *discriminateur*) calcule la probabilité p que \hat{x} appartienne au jeu de donnée réel, $p = d(x)$. L'objectif du générateur est de générer \hat{x} tel que $\hat{x} \simeq x$, tandis que l'objectif du discriminateur est de distinguer les \hat{x} générés par le générateur, des x réels, issues du jeu de données initial. La phase d'apprentissage de ce modèle est similaire à un duel de la théorie du jeu où le générateur et son adversaire le discriminateur s'affrontent. Les deux modèles sont entraînés en parallèle afin d'apprendre les poids w_g et w_d qui maximiseront leurs performances. Un équilibre de Nash [Nas50; Nas51] est théoriquement atteint lorsque le générateur produit des \hat{x} qui ne peuvent plus être distingués des x par le discriminateur. Trouver le générateur g optimal revient à résoudre le problème d'optimisation de l'Équation 3.23 pour toute donnée d'entrée x . Cependant, comme le problème d'optimisation cherche à minimiser un terme et maximiser un autre terme, la solution optimale est difficile à obtenir lors de l'ajustement des poids par descente de gradients stochastique car de nombreux optimums locaux (optimum pour un seul des membres) existent [Goo+14].

$$g_{optimal} = \min_g \max_d = \mathbb{E}_{\mathbf{x} \sim p_{réelle}} \log d(\mathbf{x}) + \mathbb{E}_{\mathbf{x} \sim p_{générée}} \log(1 - d(\mathbf{x})) \quad (3.23)$$

Le modèle GAN fait partie des nombreux modèles proposés depuis les années 1990, qui s'appuient sur un apprentissage non-supervisé par affrontement de deux modèles qui s'opposent dans un jeu de minimisation-maximisation. SCHMIDHUBER propose une revue des travaux

fondateurs sur le sujet [Sch19]. Le dynamisme actuel de la littérature sur les modèles de type *GAN*, ainsi que la disponibilité des implémentations ouvertes par leurs auteurs, nous a permis d'évaluer ces modèles sur notre problématique. De nombreux modèles utilisant des idées proches restent à évaluer. Ils pourraient permettre d'obtenir de meilleures performances sur notre problématique d'analyse de la qualité des produits.

À la suite de la proposition originale des *GAN*, RADFORD, METZ et CHINTALA [RMC15] proposent des règles pour adapter les *GAN* à la reconstruction d'images : remplacer les couches de moyenne (*pooling*, §F.4.4) par des convolutions de noyaux 1×1 , utiliser la normalisation de lot F.4.2, ne pas utiliser de couches pleinement connectées, utiliser l'activation *ReLU* F.3 pour le générateur sauf pour la dernière couche *tanh*, utiliser *LeakyReLU* pour le discriminateur et enfin des règles de construction de l'architecture du réseau qu'ils nomment *DCGAN*. Ce travail évalue ces règles avec comme objectif d'encoder des jeux de données d'images complexes dans un espace latent de dimensions 100. Enfin, le travail montre l'intérêt des *GAN* pour réaliser une classification d'images de manière non-supervisée (pas d'annotation des données d'apprentissage). Il s'agit d'utiliser le générateur comme fonction d'extraction des valeurs pertinentes d'une image (espace latent), puis ensuite d'utiliser un classifieur *SVM* E.2.1 sur ces dimensions de l'espace latent. Les performances sont légèrement inférieures à celles obtenues par une approche supervisée, ce qui montre l'intérêt de la méthode puisqu'il n'a pas été nécessaire d'annoter les données pour obtenir ce résultat. Le *GAN*, puisqu'il est entraîné pour reconstruire une image à partir des dimensions réduit de l'espace latent, permet également d'extraire l'information pertinente des images. Cette approche est particulièrement intéressante et nous chercherons à l'utiliser afin de répondre aux problèmes industriels où les jeux de données sont petits.

Par la suite, SALIMANS et al. [Sal+16] complètent les règles du modèle *DCGAN*. ODENA ; SALIMANS et al. [Ode16 ; Sal+16] proposent en parallèle de réaliser l'apprentissage de manière semi-supervisée. L'objectif est de créer un discriminateur qui soit également capable de répondre au problème de classification d'un jeu de données annotées. Il s'agit d'introduire dans le jeu de données annotées une nouvelle classe "image générée". Pour un jeu de données comportant K classes, on obtient un jeu de données de $K + 1$ classes. On utilise alors le générateur pour produire les images correspondant à cette nouvelle classe $K + 1$. Cette démarche est alors introduite dans la fonction de coût du discriminateur, Équation 3.24. Ainsi, on obtient un discriminateur qui répond au problème de classification supervisée, tout en étant capable de distinguer les images générées par le générateur. L'intérêt est double : augmentation artificielle du jeu de données et robustesse aux échantillons adversaires (les "fausses" images générées).

$$g_{optimal} = \min_g \max_d = \mathbb{E}_{\mathbf{x} \sim p_{réelle}} \log d(\mathbf{x}) + \mathbb{E}_{\mathbf{x} \sim p_{générée}} \log(1 - d(\mathbf{x})) \quad (3.24)$$

Par la suite, des améliorations importantes sont apportées à la méthode. ARJOVSKY, CHINTALA et BOTTOU [ACB17] proposent de modifier la fonction de coût du discriminateur qui évalue la qualité de la reconstruction en utilisant la distance de Wasserstein. [Gul+17], ainsi que la normalisation spectrale [Miy+18].

L'ensemble de la littérature évalue les performances de ces modèles sur la base de données *ImageNet*. En comparaison, dans notre cas d'application, le nombre de classes est très faible, de deux classes à une dizaine de classes : pour représenter une échelle qualité bonne — qualité mauvaise, ou pour représenter différentes typologies de défauts. C'est pourquoi un réseau génératif simple est capable de réaliser une synthèse fidèle des nos images. En revanche, sur une base de données qui comporte une grande variété de classes, comme *ImageNet*, il apparaît que les modèles génératifs ne permettent pas de modéliser les associations entre des éléments géométriques qui doivent nécessairement être présents dans les images d'une classe. Un exemple est celui de la représentation d'un chien, auquel la texture de pelage est bien appliquée par le modèle *GAN*, mais qui ne possède pas quatre pattes attachées au corps. Cette limite provient de l'opérateur de convolution qui est une opération locale spatialement contrainte. Par exemple, l'opérateur

de convolution ne peut pas associer la valeur du pixel située en haut à gauche, avec celle en bas à droite. De plus, lors de l’ajustement des poids par rétro-propagation du gradient, il n’y a pas de relation spatiale entre la valeur en sortie de convolution et les valeurs en entrées. Cette problématique est critique dans le domaine du traitement de textes et la traduction (*Natural Language Processing*) : la sémantique d’une phrase dépend de la position des mots dans la phrase. C’est pourquoi le mécanisme d’*attention* a été proposé par BAHNANAU, CHO et BENGIO [BCB14] pour la traduction de texte, puis étendu à l’analyse d’images par un réseau de convolutions par [Xu+15]. Par la suite, VASWANI et al. [Vas+17] propose l’architecture de couche *transformer*, qui généralise la méthode en éliminant l’usage de réseaux récurrents. Ils montrent qu’un réseau constitué uniquement de couches d’*attention* permet d’atteindre les performances de l’état de l’art en traduction de texte. L’*attention* est depuis utilisée dans toutes les méthodes de l’état de l’art en traduction automatique. Une couche d’*attention* pondère la valeur d’entrée par une distribution de probabilité, dont les paramètres sont appris, et qui dépend de la position spatiale de la valeur entrée. Cette démarche est similaire aux portes d’activations des réseaux *LSTM*, ainsi qu’à l’architecture des *Highway Networks*, §F.2, §F.1.

Dernièrement, ZHANG et al. [Zha+18] propose le modèle *SAGAN* (*Self-Attention Generative Adversarial Networks*) qui associe l’utilisation de multiples méthodes et introduit l’utilisation du mécanisme d’*attention*. Il s’agit pour la couche d’*attention* de modéliser une relation de dépendance pour un pixel, entre tous les autres pixels. Il n’y a ainsi plus de restriction spatiale aux convolutions.

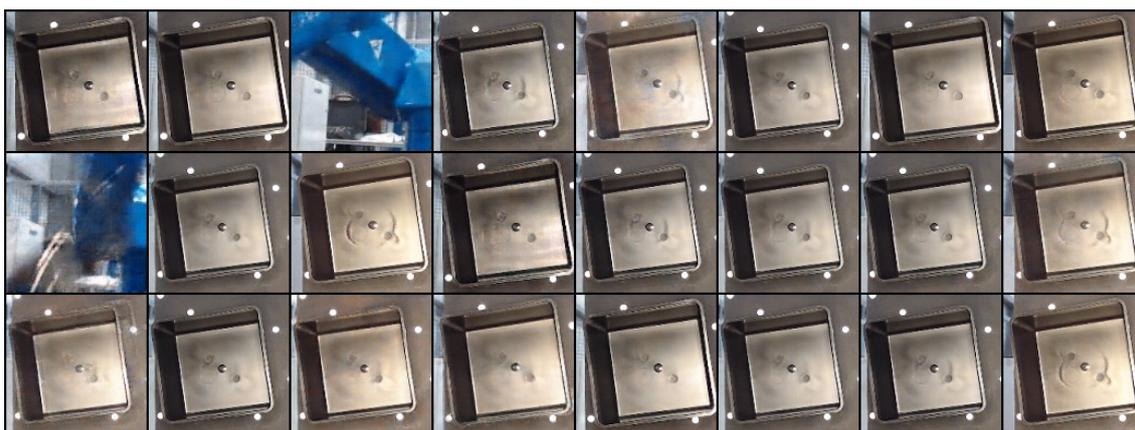


Figure 3.21 – Génération d’images à partir de la distribution modélisant l’espace latent du générateur d’un GAN.

La Figure 3.21 montre des images générées à partir de tirages aléatoires dans l’espace latent du générateur d’un modèle *SAGAN*. On observe le meilleur réalisme des images obtenues, en comparaison des résultats donnés par un VAE 3.20. La diversité des défauts est bien représentée. De plus, il est intéressant de remarquer que malgré le très faible nombre d’images représentant un bras robotique dans le jeu de données initial (1 erreur de capture pour 100 images), ces derniers sont représentés avec beaucoup de réalisme dans l’espace latent du générateur. Un modèle GAN est peu robuste. Il est sensible aux individus extrêmes d’un jeu de données. Dans notre cas, cela peut être un avantage pour modéliser des défauts qui n’apparaissent pas souvent ; mais cela demande également une rigueur dans la construction du jeu de données, pour ne pas introduire d’images erronées, comme ici le bras robotique.

De même que pour le modèle VAE, §3.2.4.7, la complexité de l’apprentissage d’un GAN est très importante. L’apprentissage du modèle est réalisé par descente de gradients stochastiques. Les poids du modèle sont ajustés sur un échantillon du jeu de données de taille B individus (appelé mini-batch), pendant T itérations. La complexité de l’apprentissage est de l’ordre de $O(TB^2D + TB^2d)$, avec T le nombre d’itérations, B le nombre d’individus dans un mini-batch,

D la dimension d'un échantillon et d la dimension de l'espace latent. Nous sommes limités par la capacité de mémoire de travail de notre processeur graphique à $B = 64$ et $D = 128^2$, d'où la complexité des calculs ($T = 5000$, $B = 64^2$, $D = 128^2$). Nous obtenons une complexité de l'ordre de 350 Milliard d'opérations. La durée de l'apprentissage de notre modèle *GAN* est de 10 heures sur un processeur graphique dédié (*NVIDIA GTX 1080 Ti*). Avec les ressources informatiques actuelles, seule une mise à jour hebdomadaire de ce modèle peut être envisagée. Malgré le réalisme de la méthode, il est nécessaire de disposer d'importantes ressources de calculs pour mettre à jour le modèle à une fréquence journalière.

Synthèse : Construction d'une métrique de la qualité d'une pièce par apprentissage

Nous avons évalué l'intérêt de différentes méthodes sur notre problématique de construction d'une métrique à partir d'images numériques. Notre contexte industriel limite le nombre d'individus dans nos jeux de données d'apprentissage, c'est pourquoi nous nous sommes intéressés aux méthodes d'apprentissage non-supervisés et semi-supervisés. Elles permettent de dépasser le coût et les biais de l'annotation humaine du jeu de données d'apprentissage. Enfin, pour que le modèle puisse prendre en compte rapidement les ajouts de données, sa mise à jour doit être une opération courte, d'une durée maximale que nous fixons à une heure. Malgré les performances intéressantes des réseaux antagonistes, nous privilégierons une approche par transfert de domaine (§3.2.2).

3.3 Optimisation automatique des hyper-paramètres d'un modèle

Les algorithmes présentés dans la section précédente possèdent plusieurs dizaines d'hyper-paramètres. Leur ajustement est souvent crucial pour obtenir des performances satisfaisantes. On parle d'optimisation des hyper-paramètres : on cherche à optimiser la performance du modèle pour la tâche à effectuer. Il est également nécessaire de sélectionner les bonnes méthodes de préparation des données. Le Tableau 3.3 recense, par exemple, les hyper-paramètres des modèles à réseaux de neurones de convolutions profonds. Des méthodes d'optimisation automatique de ces hyper-paramètres ont été proposées. Cette optimisation est souvent appelée *AutoML* (*Automated Machine Learning*). Dans le cas des réseaux de neurones profonds, l'architecture du réseau est également importante. Elle doit être considérée comme de nombreux hyper-paramètres. Le nombre de paramètres devient alors très grand et les algorithmes d'optimisation traditionnels deviennent limités; la méta-descente de gradients et les algorithmes évolutionnistes deviennent plus adaptés §3.3.6. Cette section propose de parcourir les méthodes les plus avancées et de discuter de leurs applications sur notre problématique de de contrôle de la conformité.

L'ensemble des expériences d'optimisation de modèles réalisées dans ces travaux ont utilisé la librairie *Sacred* [Gre+17], afin de conserver un historique des hyper-paramètres et des performances associés. Certaines de ces optimisations peuvent prendre plusieurs jours, c'est pourquoi il est nécessaire de sauvegarder l'évolution des performances pour éviter toute perte de ressources temporelles en cas d'erreur. *Sacred* permet également de rendre compte de la progression des optimisations et de surveiller toute erreur.

3.3.1 Optimisation par recherche aléatoire

Afin de réaliser l'optimisation, il s'agit d'évaluer la performance de la méthode sur la plage de valeurs de chacun des hyper-paramètres. Il est possible d'évaluer l'ensemble de la plage de valeurs de manière exhaustive, par une grille d'essais régulière, ce qui est coûteux sur le plan de calcul. Une démarche plus économique est le tirage aléatoire sur la plage de valeurs, proposée par BERGSTRA et BENGIO [BB12].

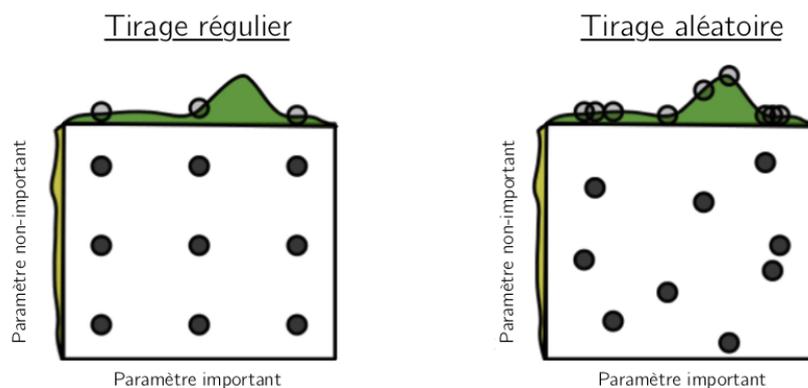


Figure 3.22 – Optimisation d'une fonction à deux variables avec neuf essais. Figure reproduite de [BB12].

La Figure 3.22 présente un tirage de 9 essais pour trouver le maximum d'une fonction à deux dimensions. Dans le cas de la recherche exhaustive, seuls trois essais permettent d'étudier la dimension horizontale. Dans la recherche aléatoire, les 9 essais permettent d'étudier la dimension horizontale, ce qui est plus efficace. Cette limite de la recherche exhaustive est d'autant plus importante que le nombre de dimensions étudiées est grand. Des méthodes plus évoluées qui ont été proposées.

En 2011, BERGSTRA et al. [Ber+11] réalisent un état de l'art des méthodes d'optimisations d'hyper-paramètres, pour les modèles à réseaux de neurones profonds. Ce travail montre l'intérêt de l'optimisation itérative, basée sur le critère de la prédiction de l'amélioration de performance du modèle (*Expected Improvement*, proposée par JONES [Jon01]). L'étude introduit deux méthodes d'optimisation. Une méthode cherche à modéliser le problème d'optimisation par des processus stochastiques gaussiens et la seconde méthode *TPE* propose une modélisation par noyaux, §3.3.2.2. Ces méthodes s'appuient sur la construction de méta-modèles. L'étude montre la supériorité de ces deux méthodes sur l'optimisation par tirage aléatoire.

3.3.2 Optimisation par méta-modèle bayésien

Cette démarche cherche dans un premier temps à modéliser le lien entre les hyper-paramètres \mathbf{x} et les performances $y = f(\mathbf{x}, \mathbf{D})$ du modèle f appris sur le jeu de données \mathbf{D} . Il s'agit ensuite de résoudre le problème d'optimisation des hyper-paramètres \mathbf{x} dans l'espace de valeurs des hyper-paramètres \mathcal{X} , afin de trouver les hyper-paramètres optimaux \mathbf{x}_* . L'Équation 3.25 présente ce problème dans le cas où la sortie de f est l'erreur d'apprentissage du modèle.

$$\mathbf{x}_* \in \underset{\mathbf{x} \in \mathcal{X}}{\operatorname{arg\,min}} f(\mathbf{x}) \quad (3.25)$$

f est approximée par un méta-modèle \mathcal{M} , sous la forme de procédés gaussiens⁶, qui permet

6. La théorie des procédés gaussiens a été développée par MATHERON [Mat63]. Cette démarche est aussi appelée

de prendre en compte l'incertitude sur les futures évaluations de m , Équation 3.26.

$$y = f(\mathbf{x}) \sim \mathcal{M}(\mu(\mathbf{x}), k(\mathbf{x}, \mathbf{x}')) \quad (3.26)$$

On cherche à modéliser la distribution de probabilité de y connaissant les hyper-paramètres $\mathbf{x} : p(y|\mathbf{x})$. Le procédé gaussien \mathcal{M} est défini par sa moyenne μ et son noyau k (différents noyaux sont présentés dans la Section précédente §E.6). Le coût de l'optimisation des procédés gaussiens est néanmoins de l'ordre de $O(N^3)$. L'optimisation de f nécessite généralement de 10 à 100 évaluations de la fonction. Chaque évaluation de la fonction possède le coût de l'apprentissage du modèle sur le jeu de données complet. Ce coût est très grand et il est nécessaire de limiter au maximum le nombre d'évaluations du méta-modèle \mathcal{M} . Des modèles différents des coûteux procédés gaussiens ont été proposés. Nous les présentons dans les Sections suivantes §3.3.2.1, §3.3.2.2.

Il est également nécessaire de choisir judicieusement les points d'évaluations \mathbf{x}_{n+1} de f à la prochaine évaluation. Il n'est pas judicieux de choisir $\mathbf{x}_{n+1} = \mu\mathbf{x}_n$ dans le cas où des minima locaux existeraient. Le dilemme de l'optimisation itérative apparaît : c'est le choix entre l'*exploration* de f pour construire un modèle \mathcal{M} pertinent qui représente tous les minima (dont le minimum de f), et l'*exploitation* des valeurs de $y = f(\mathbf{x}_{n+1})$ qui permet d'atteindre le minimum y_* et trouver \mathbf{x}^* . Dans le cas de l'optimisation bayésienne, l'*exploration* cherche à choisir un point qui diminuera les régions où l'incertitude du modèle est grande. C'est pourquoi JONES, SCHONLAU et WELCH [JSW98] proposent le critère de la prédiction de l'amélioration de performance prédite (*Expected Improvement*), Équation 3.27.

$$EI_{p(f|D)}[\max(y_* - f(\mathbf{x}), 0)] \quad (3.27)$$

Lors de la prochaine évaluation de f , les valeurs \mathbf{x}_{n+1} seront choisies pour maximiser ce critère. Cela permet de choisir les valeurs des hyper-paramètres optimales pour l'évaluation suivante de f . D'autres critères, que nous ne pouvons détailler ici, existent. Ils sont étudiés en réponse aux problèmes de bandits à N bras.

3.3.2.1 Forêts d'Arbres décisionnels

La méthode *SMAC* (*Sequential Model-Based Algorithm Configuration*) est proposée par HUTTER, HOOS et LEYTON-BROWN [HHL11]. La démarche est identique à la modélisation gaussienne, mais elle utilise ici des Forêts d'Arbres décisionnels (§E.2.4). La sélection des premiers essais à réaliser peut être effectuée à partir des plans d'expériences, §2.1.1. Un plan hypercube latin ou une séquence de SOBOL' §D est généralement utilisé.

La librairie *auto-sklearn* [Feu+15] utilise également les Forêts d'arbres décisionnels. Cette librairie utilise la majorité des algorithmes de la librairie *Scikit-Learn* [Ped+11], afin de construire automatiquement le modèle optimal. Cela représente la possibilité d'utiliser 15 classifieurs et 14 méthodes de prétraitement des données, ce qui introduit un nombre conséquent de 110 hyper-paramètres. Cet algorithme utilise un méta-modèle préalablement appris sur un grand nombre de jeux de données, afin de sélectionner les valeurs des hyper-paramètres initiaux. Cette démarche a été proposée par FEURER, SPRINGENBERG et HUTTER [FSH15]. À la manière d'un expert humain qui a appris à prioriser certains algorithmes en fonction du jeu de données auquel il fait face, un méta-modèle est construit sur 140 jeux de données. Ce méta-modèle permet de sélectionner les hyper-paramètres initiaux en fonction du jeu de données en présence. Ce travail montre la pertinence du méta-modèle pour la sélection des essais initiaux, en comparaison d'une sélection basée, par exemple, sur un plan latin hypercube §D. Enfin, *auto-sklearn* propose de

krigeage, d'après les travaux originaux de KRIGE [Kri51].

construire un modèle qui agrège plusieurs méthodes différentes en fonction de leurs performances, dans une démarche ensablée §E.2.3.

La Figure 3.23 montre le résultat de l'exploration des multiples classifieurs par *auto-sklearn*. Le classifieur le plus performant est ici le *Stochastic Gradient Boosting* §E.2.5, *a contrario* d'une durée d'apprentissage importante.

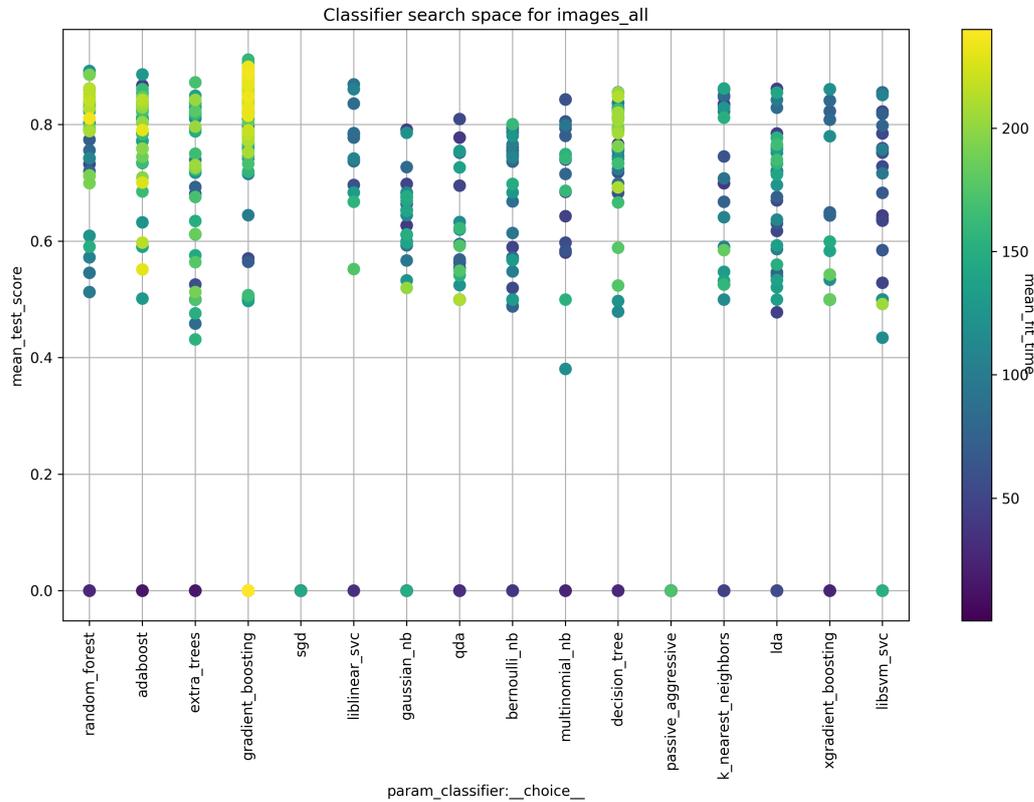


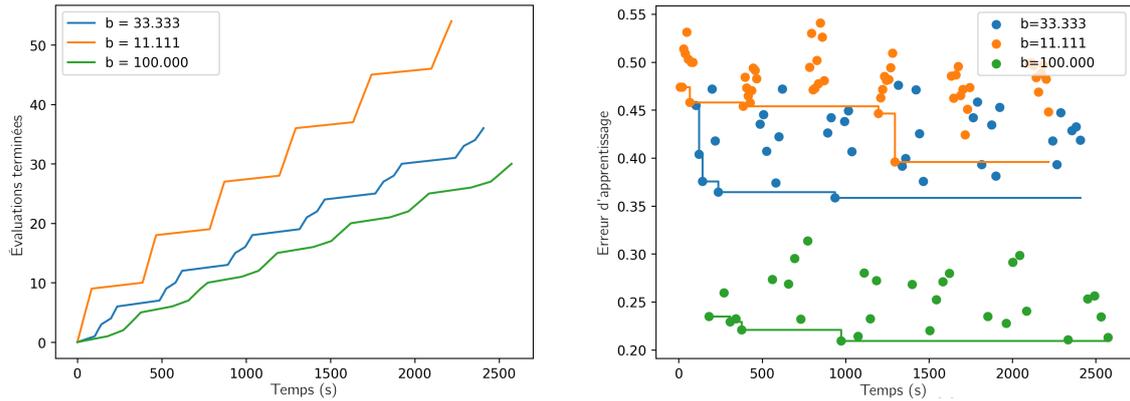
Figure 3.23 – Optimisation d'un modèle appris de manière supervisée, à l'aide de la librairie *auto-sklearn* [Feu+15].

3.3.2.2 Estimateur par noyaux structuré en arbre

La librairie *hyperopt* [BYC13] (*HYPER-parameter OPTimization*) implémente la recherche aléatoire §3.3.1 et l'algorithme *TPE* (*Tree-structured Parzen Estimator*) [Ber+11] qui réalise une approximation de la fonction f par estimation par noyau⁷. La modélisation de chaque hyper-paramètre est structurée dans un arbre de recherche. Le parcours de l'arbre permet de réaliser l'optimisation entre de multiples paramètres. Une limite forte de cette méthode est que les interactions entre chaque hyper-paramètres ne sont pas prises en compte dans le modèle car chaque hyper-paramètres disposent de leur branche indépendante sur l'arbre. Dans le cas où deux hyper-paramètres sont inter-dépendants, cette méthode est moins performante que les procédés gaussiens §3.3.2.

Dans le cas de l'optimisation bayésienne, on cherche à modéliser la distribution de probabilité de y connaissant les hyper-paramètres \mathbf{x} : $p(y|\mathbf{x})$. Dans le cas de l'estimation par densité de noyaux, on cherche à modéliser la distribution de probabilité de $p(\mathbf{x}|y)$ et la distribution $p(y)$. Le théorème de Bayes permet d'obtenir $p(\mathbf{x}|y) = p(y)p(y|\mathbf{x})$. À chaque évaluation de f , on sépare les

7. L'estimation par noyau (*kernel density estimator*) est aussi appelée méthode de Parzen-Rosenblatt, car elle a été initiée par Rosenblatt en 1956 et développée par Parzen en 1962.



(a) Nombre d'évaluations de f réalisées en fonction de la limite de temps b .

(b) Erreur lors de l'apprentissage de f en fonction de la limite de temps b .

Figure 3.24 – Évaluation partielle de f en fonction de b .

combinaisons d'hyper-paramètres qui obtiennent les meilleurs scores $y \leq y^*$ pour \mathbf{x}^{op} et on définit la distribution $m(\mathbf{x}) = p(\mathbf{x}^{meilleurs} | y)$. Les combinaisons, dont le score est inférieur à y^* , définissent la distribution $b(\mathbf{x}) = p(\mathbf{x}^{bof} | y)$. On choisit généralement la limite y^* comme le premier quartile, tel que $p(y < y^*) = 0.75$. [Ber+11] montre que le rapport m/b est équivalent au critère de la prédiction de l'amélioration de performance (§3.3.2), ce qui permet de choisir les prochains essais en minimisant m/b .

3.3.3 Méthodes de réduction du coût d'évaluation du méta-modèle

L'évaluation de $f(\mathbf{x}, \mathbf{D})$ nécessite l'apprentissage d'un modèle sur le jeu de données \mathbf{D} , ce qui peut prendre plusieurs heures dans le cas de l'utilisation de réseaux de neurones profonds (*Deep Learning* 3.2.1.1). C'est pourquoi des démarches ont récemment été proposées.

3.3.3.1 Évaluations partielles des configurations dans une durée limitée

Dans le cadre des algorithmes bandits, JAMIESON et TALWALKAR [JT15] propose la méthode *Successive Halving* qui permet de réduire le coût de l'optimisation de f . Il s'agit d'évaluer uniquement les configurations d'hyper-paramètres qui présentent un apprentissage de f rapide. Dans cet objectif, plusieurs évaluations de f sont lancées en parallèle. Une durée maximale b pour les évaluations est définie. À la fin de cette durée b , l'erreur d'apprentissage de chaque f est évaluée. La moitié des modèles qui possèdent les erreurs les plus petites est conservée. La durée maximale b est alors incrémentée et l'évaluation des modèles restants est à nouveau lancée. Cette démarche est équivalente à l'évaluation itérative de la dérivée de l'erreur d'apprentissage des modèles, tout en étant massivement parallélisable.

Cette méthode s'appuie sur l'hypothèse que le meilleur modèle f aura une vitesse d'apprentissage plus rapide que les autres. La limite de cette méthode est qu'il y a un risque de ne pas explorer des configurations d'hyper-paramètres qui donneraient de meilleures performances, mais qui sont plus lentes que de mauvaises configurations. C'est une hypothèse forte qui a été vérifiée dans ce travail sur des bases de données d'apprentissages consécutives.

La Figure 3.24a présente l'évolution du nombre d'évaluations de f en fonction de b . L'augmentation de b limite le nombre d'évaluations de f réalisées. Il est nécessaire de sélectionner les bonnes configurations d'hyper-paramètres, ce que fait le méta-modèle. La Figure 3.24b présente l'erreur d'apprentissage de modèles f , obtenue pour différentes valeurs de b . L'augmentation de b permet d'augmenter les performances du modèle.

L'utilisation de l'arrêt prématuré §F.4.3 pendant l'apprentissage de chaque modèle f est également proposée par DOMHAN, SPRINGENBERG et HUTTER [DSH15]. Ce travail introduit l'utilisation d'un modèle prédictif de l'évolution de l'erreur d'apprentissage. Pour cela, pendant l'apprentissage de f , un modèle bayésien (méthode Monte-Carlo par chaînes de Markov) est construit pour prédire l'évolution future de l'erreur d'apprentissage. Si l'évolution est défavorable, l'apprentissage est stoppé avant la fin du nombre d'itérations prédéfinies. Dans le cas d'une utilisation de cette méthode pour l'optimisation des hyper-paramètres de réseaux de neurones profonds, les auteurs évaluent le gain à un facteur deux.

3.3.3.2 Évaluation de f sur un sous-ensemble des données

KLEIN et al. [Kle+16] propose d'évaluer f sur une partition réduite du jeu de données, (cette méthode est prénommée *Fabolas*). La dimension du sous-ensemble du jeu de données est progressivement augmentée au fur et à mesure que des configurations d'hyper-paramètres satisfaisantes sont trouvées. La vitesse de l'optimisation est augmentée d'un facteur 10 en comparaison d'une optimisation bayésienne ou de la méthode *Hyperband* §3.3.4. Associée à l'évaluation partielle par arrêt prématuré, cette méthode est très efficace pour limiter le coût de l'évaluation.

3.3.4 Optimisation par algorithmes bandits

Les méthodes bandits à N bras consistent en l'évaluation massivement parallèle de multiples modèles, et en la sélection des meilleurs, à chaque itération. La méthode *Hyperband* est proposée par LI et al. [Li+16]. Elle utilise la démarche d'arrêt prématuré de l'apprentissage §3.3.3.1. L'étude des auteurs démontre que, dans le cas où l'espace des hyper-paramètres est organisé de la pire des façons pour l'algorithme, la recherche d'une solution optimale amènera à un coût d'optimisation 5 fois plus grand qu'avec une recherche aléatoire §3.3.1. *A contrario*, dans le cas où l'espace des hyper-paramètres est organisé dans le meilleur cas, la méthode à un coût 10 fois moins grand qu'une recherche aléatoire. La méthode utilise également l'apprentissage progressif sur des sous-ensembles des données §3.3.3.2. Les auteurs concluent sur la possibilité d'utiliser les plans d'expériences §2.1.1 pour sélectionner les configurations d'hyper-paramètres à évaluer en premier.

Récemment, la méthode *BOHB* (*Bayesian Optimization and HyperBand*) a été proposée par FALKNER, KLEIN et HUTTER [FKH17; FKH18]. Elle associe les techniques d'*Hyperband* pour la sélection du nombre de configurations à évaluer dans un temps limité, et ajoute l'optimisation d'un méta-modèle bayésien (similaire aux noyaux structurés en arbre *TPE* §3.3.2.2) pour sélectionner les meilleures configurations à évaluer. À la différence de *Hyperband* qui sélectionne les configurations de manière aléatoire, le méta-modèle permet de prendre en compte l'information sur les configurations acquise au fur et à mesure des évaluations. La sélection des configurations à évaluer est plus pertinente, ce qui permet d'atteindre la configuration optimale avec environ deux fois moins d'évaluations que *Hyperband*.

Afin d'observer l'influence des différents hyper-paramètres sur la performance du modèle, nous réalisons une analyse de la variance des hyper-paramètres pour f (*ANAVAR/ANOVA*), en utilisant la librairie HUTTER, HOOS et LEYTON-BROWN [HHL14]. Lorsque le nombre d'évaluations du modèle est assez grand (> 100), cela permet de rendre compte des interactions possibles entre les hyper-paramètres. La Figure 3.25 présente les résultats pour deux couples d'hyper-paramètres (β est ici un terme de pénalisation des poids §F.4.5). On observe que les surfaces de réponses sont complexes. De plus, le nombre d'hyper-paramètres présent est ici de 38 et des interactions existent entre les hyper-paramètres. C'est pourquoi un expert humain aurait eu de grandes difficultés à réaliser cette optimisation manuellement, dans un espace continu de dimensions 38.

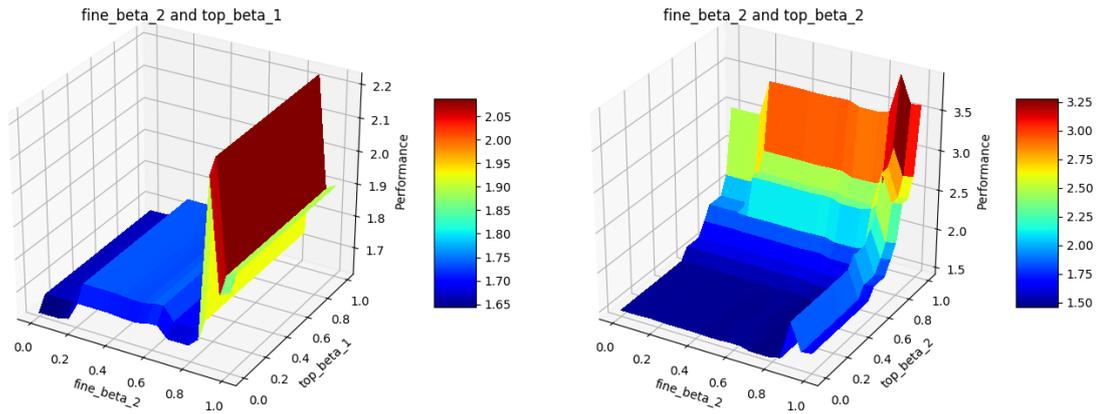


Figure 3.25 – *f*ANOVA des hyper-paramètres suite à l'optimisation avec BOHB.

3.3.5 Optimisation par algorithmes évolutionnistes

Proposée en 2016 dans OLSON et al. ; OLSON et al. [Ols+16a ; Ols+16b], *TPOT (Tree-Based Pipeline Optimization Tool)* s'appuie sur un algorithme génétique pour explorer les configurations d'hyper-paramètres et sur une Forêt d'Arbres décisionnels §E.2.4 pour optimiser le meilleur modèle.

Nous avons appliqué cette méthode dans “Polarimetric Imaging for Quality Control in Injection Molding” [Nag+19], sur notre problématique de l'apprentissage supervisé d'un modèle pour le contrôle de la conformité. Sur des images de dimensions 331×331 pixels, l'évaluation de 300 modèles f est effectuée en 14 heures. Le gain de performances suite à l'optimisation des hyper-paramètres est de 2%. L'algorithme a trouvé le meilleur modèle possible en une demi-journée. Un expert humain n'aurait certainement pas réussi à trouver le meilleur modèle en si peu de temps. Malgré la durée qui est importante, *TPOT* permet de remplacer plusieurs journées d'expertise d'un ingénieur en sciences des données.

3.3.6 Optimisation de l'architecture de réseaux de neurones profonds

Afin qu'un modèle à réseaux de neurones profonds soit fonctionnel, son architecture doit être optimisée. Il est nécessaire d'effectuer une recherche de différentes architectures. Deux solutions apparaissent : une étude bibliographique des meilleurs modèles proposés sur le problème (aussi appelée *Grad-Student Descent*), ou l'automatisation du processus de recherche (aussi appelée *Neural Architecture Search*), que nous présentons dans la suite. Le coût de la recherche et de l'optimisation de ces modèles est très important, à cause de l'infinité d'architecture possibles et des nombreux hyper-paramètres. C'est pourquoi, il est nécessaire de disposer de ressources de calculs conséquentes. Dans le cas où ces ressources ne sont pas disponibles, on préférera utiliser un démarche d'apprentissage par transfert de domaine §3.2.2.

ZOPH et LE [ZL16] propose de réaliser un apprentissage automatique de l'architecture de réseaux profonds : c'est le *Neural Architecture Search*. La méthode permet de proposer l'architecture *NASNet* [Zop+17] qui établit un nouvel état de l'art en matière de performance de classification sur les jeux de données *ImageNet* et *CIFAR-10* [Kri09].

Nous avons étudié l'intérêt de cette démarche d'optimisation de l'architecture d'un réseau de neurones. Dans notre étude [Nag+19], nous avons utilisé la librairie *Auto-Keras* [JSH18] sur notre problématique. Cette méthode propose d'utiliser des architectures de la littérature comme solutions initiales, puis de les modifier progressivement, en utilisant les principes de *Neural Architecture Search* [ZL16]. Un méta-modèle bayésien §3.3.2 est construit pour parcourir et optimiser les hyper-paramètres associés au réseau. Les modèles à réseaux de neurones profonds

nécessitent d’être optimisé sur processeur graphique. Aussi, l’architecture du modèle est contrainte à la dimension de la mémoire de travail du processeur graphique sur lequel le modèle est stocké. Dans le cas de notre expérimentation, les 11 Giga octets de notre processeur graphique était limitant. Il n’a pas été possible d’obtenir de meilleures performances que celles obtenues par une optimisation manuelle du réseau.

La recherche d’architecture de réseaux de neurones possède de grands enjeux, car il est difficile pour les humains d’inventer des architectures plus performantes, aux vues de leurs complexités grandissantes. Dernièrement, [EMH18] propose un état de l’art exhaustif de la littérature *AutoML*. Les dernières avancées s’appuient sur l’apprentissage par renforcement pour proposer une recherche d’architecture efficiente. C’est une perspective de recherche importante pour la modélisation par apprentissage.

Synthèse : AutoML pour l’industrie

L’utilisation de solutions d’optimisation automatique de modèles rejoint une double question économique. Est-il avantageux d’optimiser le modèle pour le procédé industriel? C’est à dire d’augmenter les performances, par exemple dans le cadre du contrôle de la conformité. De même, est-il plus coûteux d’optimiser manuellement les hyper-paramètres d’un modèle, ou d’investir dans la puissance de calcul nécessaire à l’automatisation? Pour des réseaux de neurones profonds, il est aujourd’hui plus avantageux d’utiliser les méthodes *AutoML*.

Dernièrement, GIJSBERS et al. [Gij+19] réalise une comparaison de 4 méthodes sur 39 jeux de données. Ils montrent que sur certaines tâches, l’optimisation n’apporte pas nécessairement de gain, en comparaison d’un classifieur à Arbres de Forêts décisionnels. Les méthodes *auto-sklearn* et *TPOT* obtiennent des performances similaires dans la majorité des cas.

Notre problématique industrielle impose des contraintes en matière de puissance de calcul disponible. C’est pourquoi l’optimisation de modèles complexes, tels que les réseaux de neurones profonds, ne peut être effectuée qu’à une fréquence hebdomadaire. En revanche, sur des cas d’applications à fortes valeurs ajoutées, le modèle doit avoir les meilleures performances possible. Il est alors envisageable d’investir dans de plus grandes infrastructures de calculs, afin de réaliser une optimisation journalière des modèles.

3.4 Conclusion : modélisation par apprentissage pour l'industrie

Nous avons choisi dans ce chapitre d'étudier une diversité représentative des méthodes et algorithmes existants pour résoudre le problème du contrôle automatique de la qualité. Les thématiques de l'architecture logicielle, l'application des calculs sur les ressources matérielles, l'efficacité des algorithmes et la large thématique de l'optimisation non-convexe sont au cœur de ce domaine. Les moyens de production industrielle ont une inertie beaucoup plus grande que cette littérature, c'est pourquoi il est nécessaire de concevoir des systèmes modulaires, qui pourront être mis à jour, au fur et à mesure des progrès de l'apprentissage statistique.

3.4.1 Contraintes industrielles

Nous avons choisi de proposer une vision globale appliquée à notre problématique industrielle. Le choix des méthodes et des algorithmes à utiliser dépend fortement des contraintes industrielles. La Figure 3.26 positionne les méthodes présentées dans l'ensemble des méthodes d'apprentissage existantes. Pour chaque méthode, nous avons discuté du coût des calculs. C'est une des principales limites au déploiement de solutions d'apprentissage dans l'industrie. C'est notamment la limite du coût du calcul, en rapport à sa durée, qui est encore aujourd'hui critique. Nous n'avons pas abordé la problématique de l'utilisation des modèles appris, notamment de la vitesse de l'inférence. En effet, compte tenu des puissances de calculs disponibles aujourd'hui dans les systèmes embarqués, l'inférence à partir d'images peut être réalisée en quelques millisecondes. C'est l'apprentissage des modèles et leurs mises à jour, qui sont coûteux.

Le Tableau 3.5 synthétise les discussions sur le coût des calculs. Le choix de la méthode utilisée est dépendant de la fréquence de mise à jour du modèle de la qualité et de la disponibilité des moyens de calculs. Si les calculs doivent être effectués au plus près de la production, sur des systèmes embarqués, les réseaux de neurones les plus profonds ne sont pas envisageables. Enfin, il est possible de s'appuyer sur les services de solutions de calculs distribués distantes (*Cloud*), qui limitent la nécessité de maintenance locale des moyens de calculs. Elle nécessite néanmoins le déploiement d'une infrastructure de réseau informatique fiable.

Algorithme	Complexité	Référence
Machine à vecteurs de support	$O(N^2)$	§E.2.1
Réseaux de convolutions	$O(N T W)$, T nb. itérations, W dim. des poids	§3.2.1.1
Analyse en Composantes Principales	$O(N)$	§3.2.4.3
ACP à noyau	$O(N^3)$	§3.2.4.4
k-moyennes	$O(N \log(N))$	§3.2.4.1
t-SNE	$O(N^2)$	§3.2.4.5
UMAP	$O(N \log N)$	§3.2.4.6
Auto-encodeur variationnel	$O(T D)$, T nb. itérations, D dim. individu	§3.2.4.7
Réseaux antagonistes adversaires	$O(T D)$, T nb. itérations, D dim. individu	§3.2.4.8

Tableau 3.5 – Complexité de l'apprentissage des méthodes étudiées en fonction du nombre d'individus du jeu de données N .

3.4.2 Vers un modèle robuste de la notion de qualité d'une pièce

La dernière limite est certainement la plus importante. Il s'agit du nombre d'individus présent dans le jeu de données. Nous disposons actuellement de jeux de données qui contiennent moins de

mille individus. L'état de l'art en *Deep Learning*, nous permet d'envisager la quantité de données nécessaire afin de rendre robuste le système, pour toute machine, avec dix mille pièces dans le jeu de données d'apprentissage (le jeu de données *CIFAR-10* [Kri09] propose 6000 images par classes).

La faisabilité du transfert de la modélisation de la qualité apprise sur une machine, vers une autre machine produisant la même pièce, est en cours d'évaluation. À terme, cette démarche permettra de réaliser l'apprentissage supervisé de la notion de qualité sur une unique machine, puis de déployer le modèle sur un parc machines complet. Cela implique que le modèle doit avoir acquis dans sa base d'apprentissage des images prises pour une même pièce, mais dans des configurations de machines différentes, ou bien que la prise de vue soit réalisée dans un environnement maîtrisé et répété entre chaque machine.

La littérature renseigne des cas de biais, où le modèle produit des résultats satisfaisants en apparence, alors que le modèle ne s'intéresse pas aux véritables causes. Dans notre cas, il pourrait s'agir d'une machine qui possède une grille de protection de couleur rouge, qui produirait uniquement des pièces mauvaises, tandis qu'une machine de couleur verte produirait uniquement des pièces bonnes. Le modèle aura alors généralisé par apprentissage qu'aucune pièce ne pourrait être bonne si produite à côté d'une grille rouge. Ce résultat sera alors très difficile à comprendre. L'interprétation des résultats produite par un modèle est un enjeu important. Les visualisations par apprentissage non-supervisé permettent dans notre cas d'identifier des paquets d'individus similaires. Nous obtenons de 4 à 6 classes sur l'étude de la pièce "boîte noire", ce qui correspondent à différents types de défauts.

Enfin, nous pouvons également envisager la construction d'un modèle de la notion de qualité qui serait robuste à toutes pièces. Ce modèle rivaliserait avec l'humain afin de classifier les défauts de n'importe quelle pièce. Le jeu de données d'apprentissage *ImageNet* propose quatorze millions d'images pour vingt mille catégories. Construire un modèle de la notion de qualité robuste nécessiterait une base de données d'apprentissage supérieure à dix mille pièces, pour au moins mille pièces différentes. Il nécessiterait aussi un modèle à réseaux de neurones profonds ayant la capacité de prendre en compte ces données.

La collection de ce grand nombre d'images de pièces nécessite un moyen d'acquisition adapté aux contraintes industrielles. Cela rejoint l'objectif de nos travaux de proposer un dispositif de mesure en ligne de production.

Synthèse : Modélisation de la qualité par apprentissage

Dans ce chapitre, nous avons évalué différentes méthodes afin de construire un modèle de la notion de qualité d'une pièce à partir d'images. Dans un premier temps, il s'agit de construire un jeu de données représentatif de la variabilité du procédé de production. Ce jeu de données doit être annoté par un expert humain qui évalue la qualité des pièces. Ensuite, un algorithme d'apprentissage ajuste un modèle sur ce jeu de données. La sélection de l'algorithme et l'optimisation des hyper-paramètres doivent être réalisés afin d'obtenir les meilleures performances de discrimination de la conformité des pièces. Nous avons en particulier étudié les méthodes d'apprentissage semi-supervisé et non-supervisé qui permettent de limiter le besoin d'annotation du jeu de données.

Notre contribution est l'évaluation comparative de différentes méthodes sur notre problématique de contrôle qualité industriel. Les contraintes de la puissance de calcul disponible et de la durée de la mise à jour du modèle sont discutées. Elles dépendent de la complexité des algorithmes. De nombreuses perspectives sont envisagées car l'apprentissage statistique est un domaine de recherche très dynamique.

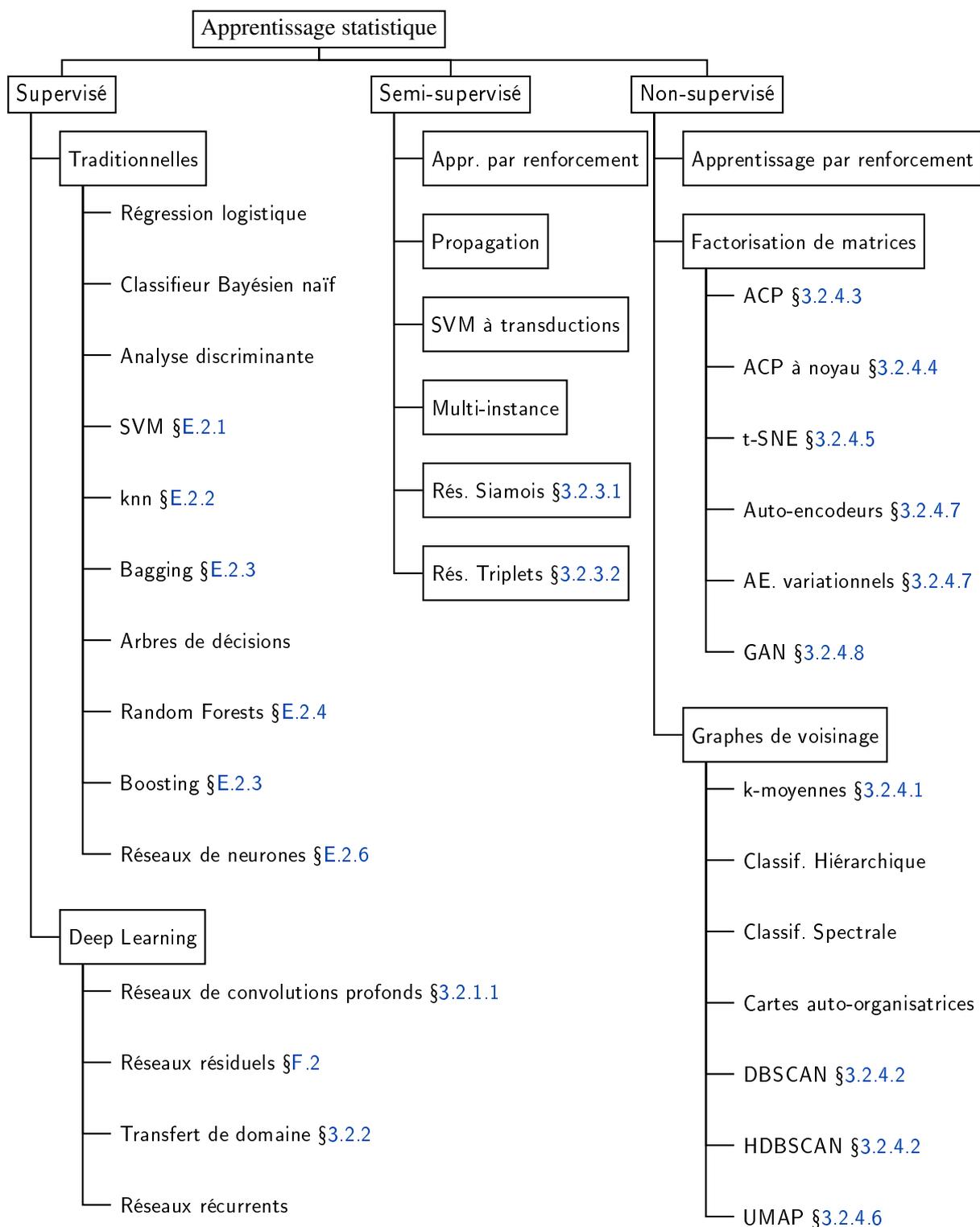


Figure 3.26 – Taxonomie de l'apprentissage statistique.

4

Systeme de controle de la qualite par apprentissage à partir de l'imagerie non-conventionnelle

Dans ce chapitre, nous présentons notre système de contrôle de la qualité des pièces plastiques en ligne de production qui répond aux contraintes industrielles de l'injection-moulage des thermoplastiques. Le système se compose d'un dispositif de mesure et d'une solution logicielle. Nous présentons les résultats expérimentaux que nous avons obtenus à l'aide de ce système lors de deux essais. Enfin, nous discutons des nombreuses perspectives qui sont envisagées.

Sommaire

4.1	Description du système de contrôle de la qualité proposé	118
4.1.1	Dispositif d'acquisition d'images polarimétriques et thermiques en ligne de production	118
4.1.2	Solution logicielle d'analyse d'image pour inférer la qualité	120
4.2	Validation expérimentale : applications industrielles	127
4.2.1	Essai "boîte noire" au Centre Techniques IPC	127
4.2.2	Essai "plaques" confidentiel	131
4.2.3	Discussions et limites du système proposé	131
4.3	Conclusion	132
4.4	Perspectives	132

4.1 Description du système de contrôle de la qualité proposé

Le système que nous proposons se compose d'un dispositif de mesure et d'une solution logicielle permettant d'extraire l'information pertinente des mesures. Positionné en ligne de production, le système classe selon la conformité de chaque pièce. Le système permet la mesure de la qualité d'une pièce moulée dès la sortie du moule.

Les deux éléments matériel et logiciel sont intégrés afin d'obtenir des performances satisfaisantes et de répondre aux contraintes industrielles, en particulier le coût du dispositif doit être faible et la durée de la mesure inférieure à 5 secondes pour être compatible avec la durée du cycle de production.

4.1.1 Dispositif d'acquisition d'images polarimétriques et thermiques en ligne de production

Le dispositif de mesure combine deux techniques d'imagerie non-conventionnelle : la thermographie et la polarimétrie. Cette combinaison originale fait l'objet d'une demande de brevet "Dispositif et Procédé de Contrôle de Pièces" [NPP19]. L'utilisation de la thermographie est motivée par l'information sur la géométrie de la pièce qui est contenue dans le champ de température (voir la Section 2.3). L'utilisation de la polarimétrie est motivée par son intérêt pour la discrimination des défauts de forme et des défauts de structure de la matière. La polarimétrie possède une information complémentaire à l'imagerie traditionnelle (voir la Section 2.4).

4.1.1.1 Intégration matérielle

Afin de faciliter l'installation et la mobilité du dispositif, les capteurs ont été intégrés dans une sphère d'un diamètre de vingt centimètres (voir la Figure 4.1). Les capteurs, l'éclairage et un système embarqué de calcul sont intégrés dans ce faible volume.

Les capteurs sont constitués de quatre caméras (voir la Figure 4.2) :

- 1 caméra thermique FLIR Lepton ¹ (résolution de 160×120 pixels),
- 3 caméras Logitech C922 ² (résolution de 1920×1080 pixels).



Figure 4.1 – Rendu réaliste du dispositif de mesure proposé.

1. Caractéristiques de la caméra Lepton 3 sur le site Internet du constructeur FLIR.

2. Caractéristiques de la caméra C922 sur le site Internet du constructeur Logitech.

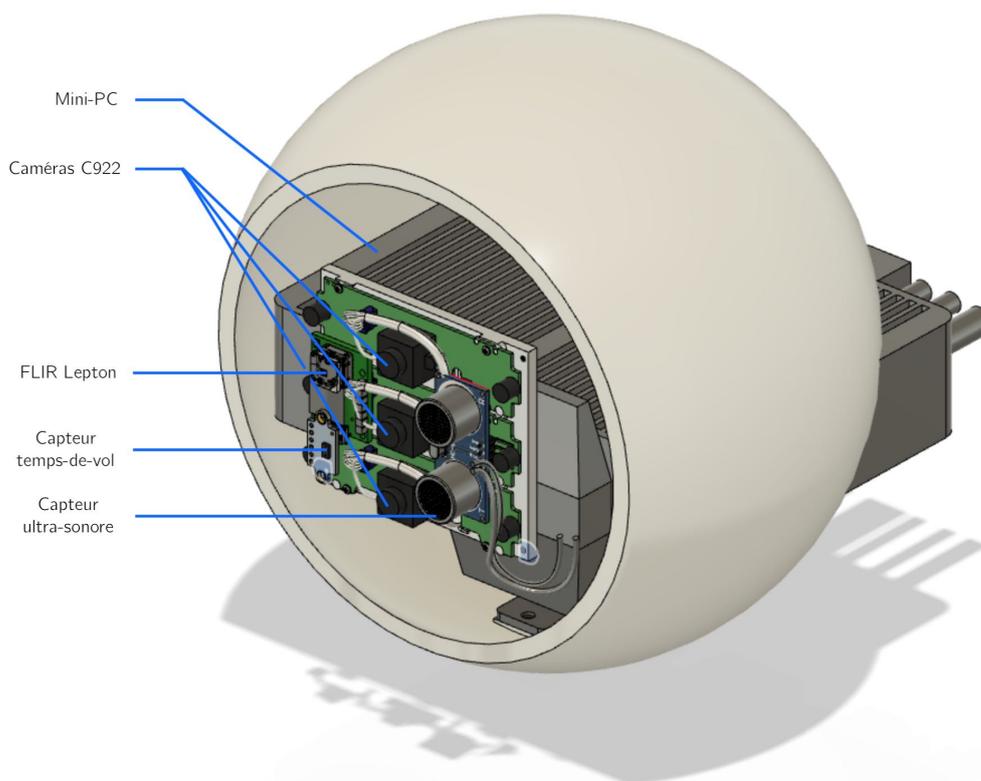


Figure 4.2 – Intégration des capteurs.

Les caméras C922 sont des webcams destinées au grand public. Un filtre polarisant linéaire a été positionné devant chacune d'elles, afin de réaliser un polarimètre, tel que décrit dans la Section 2.4 du Chapitre 2. Un éclairage annulaire linéairement polarisé, d'une intensité lumineuse de 8000 lumens est intégré autour des caméras. L'une des caméras du système image la lumière réfléchie qui est polarisée selon un angle de 0° par rapport à l'angle de polarisation de l'éclairage ; une autre caméra à 90° ; une dernière à 120° . Enfin, un capteur de présence de pièces est aussi intégré.

Le traitement logiciel est réalisé dans un mini-PC et les communications avec l'interface utilisateur sont réalisées par une interface réseau sans-fil *WiFi*.

4.1.1.2 Détection robuste de pièces

Afin de déclencher la mesure, il est nécessaire de savoir de manière fiable si une pièce est présente devant le dispositif. Nous avons volontairement souhaité concevoir un système autonome, indépendant de l'automate de la ligne de production. C'est pourquoi nous n'utilisons pas les informations de l'automate qui commande la presse et le robot de déchargement.

Un capteur de présence permet d'allumer l'éclairage et de déclencher l'enregistrement des images lorsque une pièce est présente devant le dispositif. Pour la détection de présence, nous avons retenu trois technologies :

- l'écho ultra-sonore de type sonar,
- la mesure d'une distance à l'aide d'un capteur laser, temps-de-vol,
- l'analyse d'images, en particulier l'image thermique des pièces chaudes.

Malgré les multiples capteurs, il est possible que des images soient enregistrées alors qu'aucune pièce n'est présente (voir la Figure H.1). Dans ce cas, lors de la notation du jeu de données, l'expert humain peut ne pas annoter la pièce. Une pièce non annotée n'est pas prise en compte dans le jeu de données d'apprentissage.

4.1.1.3 Intégration du dispositif à la ligne de production

Le dispositif de mesure est positionné dans la chaîne de production (voir la Figure 4.3). La mesure est effectuée de manière non invasive, ni pour le procédé de fabrication, ni pour la pièce. C'est à dire que le travail d'intégration du système à la ligne de production est minimal. Le système est indépendant de l'outillage. Un trépied photographique supporte le dispositif de mesure. La pièce à contrôler est positionnée à une distance de vingt à cent centimètres du dispositif.

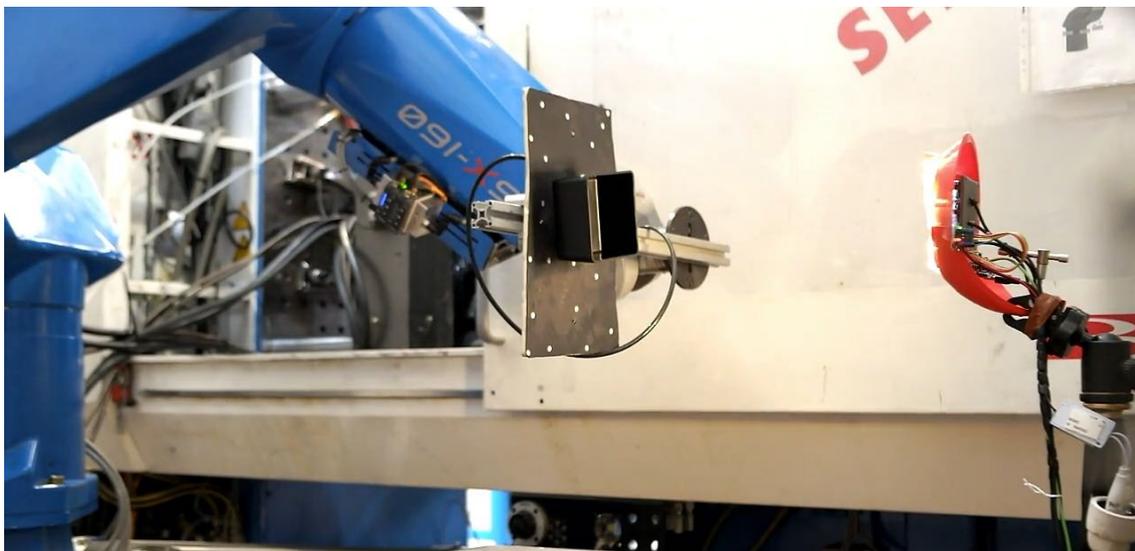


Figure 4.3 – Photographie de la présentation, par le bras robot, d'une pièce devant le prototype du dispositif de mesure, lors de l'essai §4.2.1.

4.1.2 Solution logicielle d'analyse d'image pour inférer la qualité

L'intégration entre les capteurs matériels et la solution logicielle permet d'obtenir un moyen de contrôle qui répond aux contraintes industrielles. Trois grandes tâches sont réalisées à l'aide de la solution logicielle :

- la classification de la qualité des pièces à partir des images,
- l'annotation de la qualité des pièces par l'expert humain,
- la mise à jour du modèle par apprentissage à partir des annotations.

Le logiciel réalise la fusion des données des capteurs et l'extraction de l'information pertinente, afin de déterminer la conformité de la pièce.

4.1.2.1 Architecture logicielle

La Figure 4.4 présente l'architecture logicielle du système qui s'appuie sur le principe du client-serveur. Le dispositif de mesure acquiert quatre images (1) qui sont compressées puis téléversées sur le serveur de traitement (2). Le serveur de traitement (2) réalise l'inférence de la qualité à partir des images, à l'aide d'un modèle à réseau de neurones de convolution profond (3). Le serveur centralise la base de données (4) et les images qui constituent le jeu de données d'apprentissage.

Lorsque le nombre d'échantillons à suffisamment augmenté dans le jeu de données d'apprentissage (4), le modèle (3) est mis à jour par ajustement des poids du réseau de neurones. En pratique, une mise à jour toutes les cent nouvelles pièces est satisfaisante.

La base de données (4) et le logiciel de traitement (2) peuvent être hébergés de manière *serverless* dans le Cloud. La principale limite est le temps de latence de la connexion réseau

4.1. Description du système de contrôle de la qualité proposé

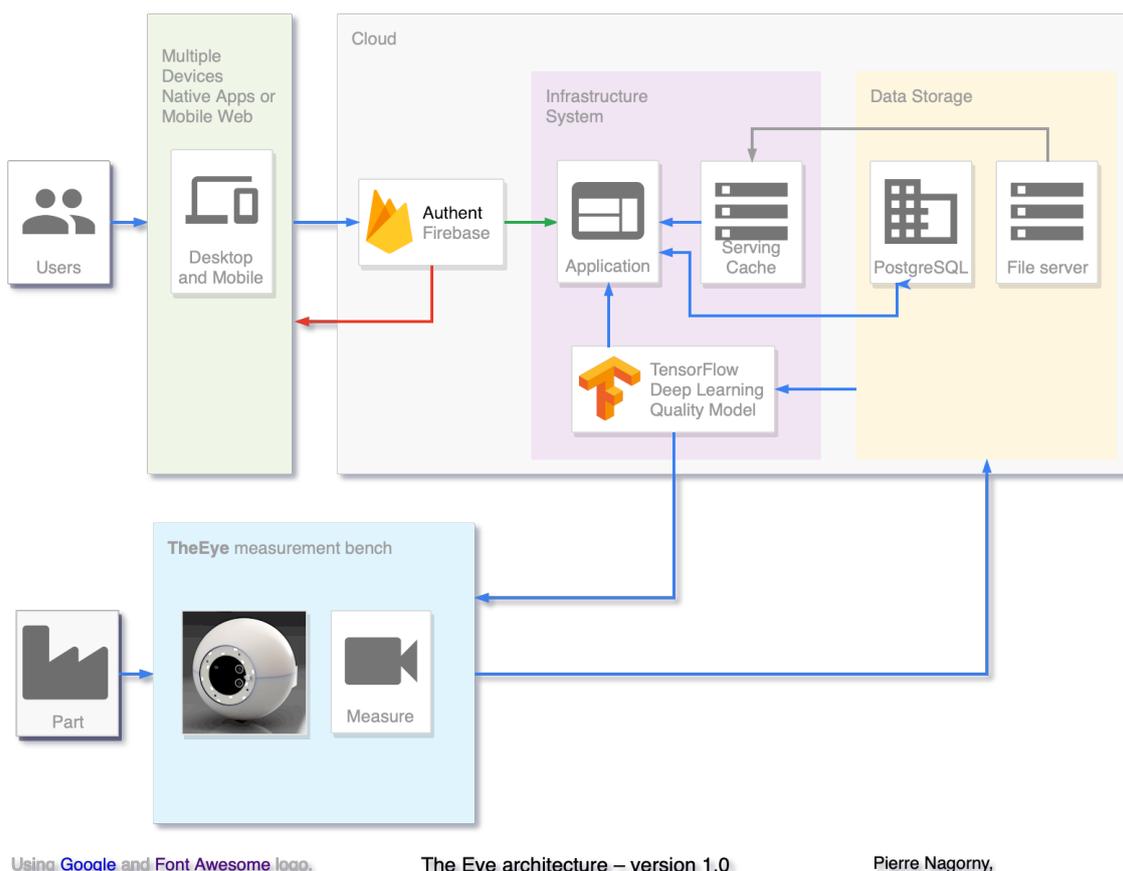


Figure 4.4 – Architecture logicielle du système proposé.

Internet qui nécessite une infrastructure rapide. Dans le cas où l'environnement industriel ne permet pas cette connexion rapide, le serveur de traitement peut être installé dans l'atelier de production.

Les communications entre le client et le serveur sont réalisées par requêtes HTTP à l'aide d'une API à l'architecture REST (*REpresentational State Transfer*) [Fie00]. Cela permet une robustesse aux erreurs de communication. L'horodatage et l'identification de chaque pièce est sérialisé à partir d'un serveur de référence temporel NTP (*Network Time Protocol*). Enfin, le système utilise la plateforme d'authentification et de gestion des comptes utilisateurs *Firebase*³.

4.1.2.2 Réseau de neurones pour le traitement des données

La notion de qualité est spécifique à une pièce, à un cahier des charges et à une interprétation de ce cahier des charges par l'humain. L'utilisation de l'apprentissage supervisé permet de construire une métrique de la qualité à partir de l'expertise humaine. Cette métrique est spécifique à une pièce. Une perspective sera de généraliser cette métrique à toutes pièces, lorsque la quantité et la diversité des pièces présentes dans le jeu de données sera suffisantes (plusieurs millions de pièces).

Nous proposons d'utiliser un unique réseau de neurones de convolution pour réaliser l'extraction de l'information et la fusion des données issues des quatre caméras.

4.1.2.2.1 Fusion multi-modale et transfert de domaine

Dans notre contexte industriel, la quantité de pièces d'apprentissage dont nous disposons est trop

3. [Site Internet](#) de la plateforme développée par la société Firebase.

faible pour réaliser l'apprentissage d'un réseau de convolution profond complet. C'est pourquoi notre approche est de réaliser un apprentissage par transfert de domaine⁴. Nous utilisons le réseau de neurones profond, pré-appris sur un jeu de données différents qui dispose d'un grand nombre d'individus (*ImageNet* possède 2 millions d'images pour 1000 catégories).

L'architecture du réseau de neurones que nous utilisons est constituée de quatre réseaux résiduels⁵ *DenseNet* [Hua+16] parallèles, représentée dans la Figure 4.5. Nous utilisons la librairie TensorFlow [Aba+16] pour construire le réseau et réaliser l'apprentissage par optimisation des poids. Le réseau *DenseNet* est tronqué au niveau de son avant-dernière couche *conv4*. Chaque réseau prend en entrée les données brutes issues de chacune des quatre caméras du dispositif de mesure. À la suite, les quatre réseaux sont fusionnés par concaténation des valeurs scalaires en sortie de la couche *conv4*. Deux couches pleinement connectées, et une fonction d'activation sigmoïde⁶ transforment enfin ces valeurs en une probabilité de conformité de la pièce. Les hyperparamètres de ces deux dernières couches sont optimisés automatiquement par validation croisée⁷.

4.1.2.3.2 Durée de l'apprentissage du modèle

Pour réaliser le transfert de domaine, dans un premier temps, seuls les poids des dernières couches du réseau *FC1* et *FC2* sont ajustés⁸. Ensuite, l'ensemble des poids du réseau est ajusté. Le critère d'optimisation des poids est la minimisation de l'erreur de justesse balancée⁹.

Le nombre d'individus du jeu de données est très faible. C'est pourquoi nous utilisons la méthode d'augmentation artificielle du jeu de données¹⁰. Les images sont aléatoirement recadrées de 10% de leurs dimensions et une rotation de 0° à 10° est appliquée. Ces transformations aléatoires permettent de rendre robuste le réseau aux variations de position des pièces. Elles sont représentatives de notre cas d'application, où les pièces sont positionnées de manière relativement répétable.

Nous utilisons une validation croisée¹¹. C'est pourquoi le jeu de données est divisé en deux sous-ensembles : un ensemble d'apprentissage composé de 60% des pièces et un ensemble de validation composé de 40% des pièces. Afin de limiter le sur-apprentissage, la technique d'arrêt prématuré¹² est employée. Si l'erreur de justesse ne diminue pas pendant plus de trente itérations, l'apprentissage est arrêté et les poids du réseau sont conservés.

La Figure 4.6 présente l'évolution, au cours de l'apprentissage, de l'erreur de justesse pour le jeu de données d'apprentissage et pour le jeu de données de validation. Cette Figure est réalisée à l'aide du jeu de données "boîtes noires", présenté dans la Section 4.2.1 suivante. L'apprentissage est réalisé avec un processeur graphique *NVIDIA GTX 1080Ti* pour accélérer les calculs massivement parallèles. Nous observons en (a) une diminution rapide de l'erreur de justesse lors de l'apprentissage initial des dernières couches du réseau. Cette première phase est également rapide, d'une durée totale de six secondes. En (b), nous observons l'évolution lors de l'apprentissage de spécialisation de l'ensemble du réseau. La convergence est plus lente (quatre-vingt deux secondes) et le nombre d'individus du jeu de données limite l'amélioration de la performance. La durée totale de l'apprentissage est de cent secondes.

4. Nous discutons du principe de l'apprentissage par transfert de domaine dans l'Annexe 3.2.2. Cela consiste à utiliser d'autres jeux de données d'images.

5. Nous détaillons le principe des blocs résiduels dans l'Annexe F.2.

6. La fonction d'activation *sigmoïde* est discutée dans la Section 3.5.

7. Nous détaillons le principe de la validation croisée dans l'Annexe E.1.6.

8. On parle d'"apprentissage du réseau". Nous avons détaillé le principe de l'apprentissage par optimisation itératif des poids (la rétro-propagation du gradient de l'erreur de classification) dans l'Annexe 3.2.1.1.

9. La métrique de justesse balancée est discutée dans la Section E.2.

10. La méthode d'augmentation artificielle du jeu de données est présentée dans l'Annexe F.4.6.

11. La méthode de validation croisée est présentée dans l'Annexe E.1.6.

12. La technique de l'arrêt prématuré est une méthode de régularisation qui est détaillée dans l'Annexe F.4.3.

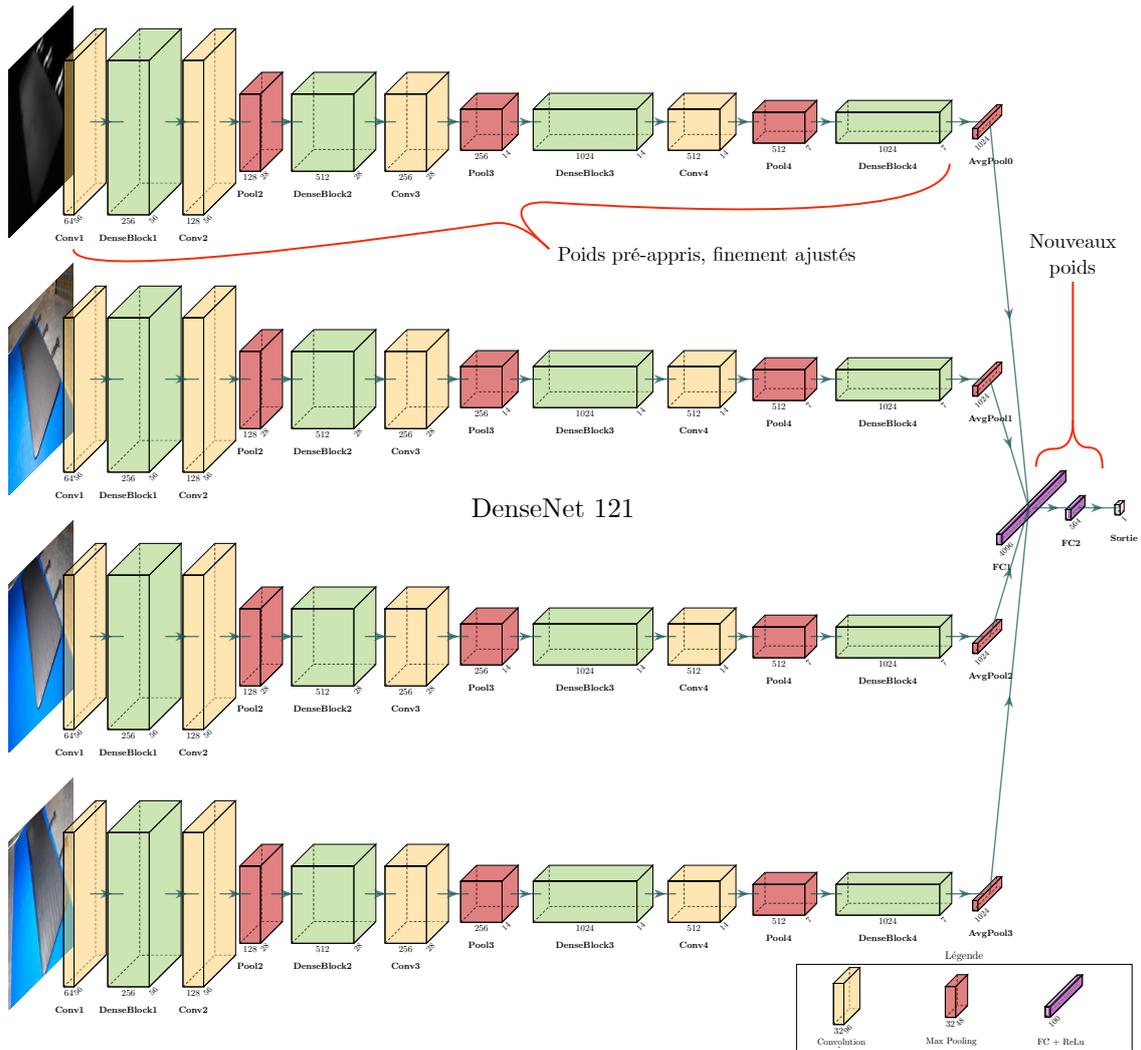
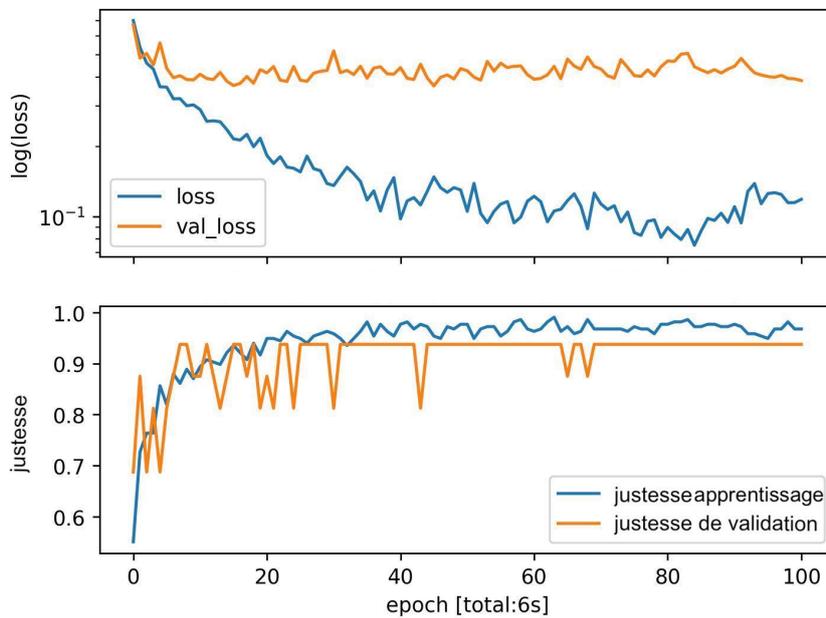
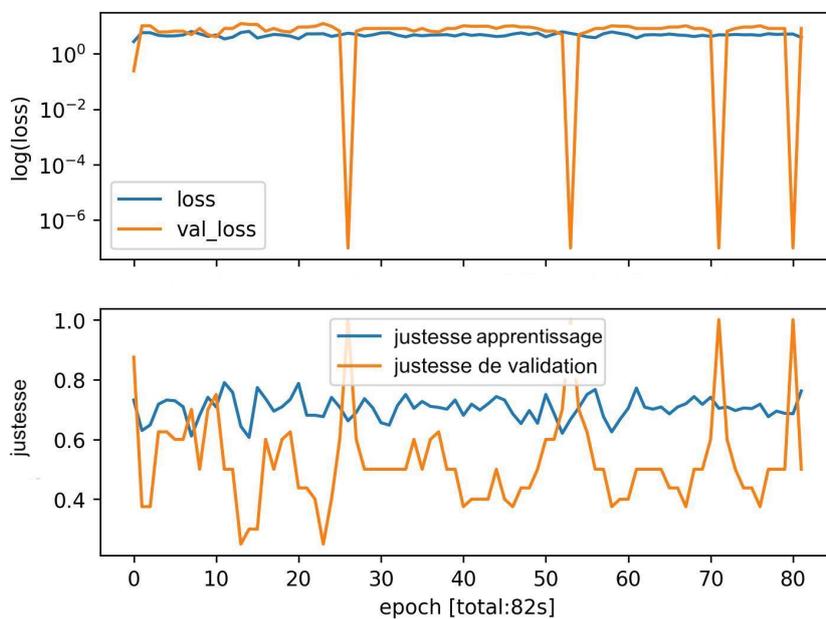


Figure 4.5 – Apprentissage par transfert de domaine à partir du réseau DenseNet121 pré-entraîné sur ImageNet.



(a) Apprentissage initial des dernières couches du réseau.



(b) Apprentissage de spécialisation de l'ensemble des poids du réseau.

Figure 4.6 – Évolution de l'erreur de prédiction et de la justesse balancée de classification, pendant l'apprentissage des poids du réseau.

4.1.2.3.3 Optimisation automatique du réseau de neurones

L'architecture du réseau *DenseNet* ne peut pas être modifiée car les poids du réseau ont été précédemment appris sur le jeu de données *ImageNet*. Nous avons choisi d'optimiser l'architecture des dernières couches du réseau de neurones, ainsi que les hyper-paramètres, par optimisation bayésienne, à l'aide de la méthode *BOHB*¹³ (*Bayesian Optimization and HyperBand*).

La durée de l'apprentissage du modèle est relativement courte, ce qui nous permet de réaliser cette optimisation des hyper-paramètres. Les performances de soixante-dix modèles différents sont évalués pendant deux heures. Les hyper-paramètres du meilleur modèle sont ensuite utilisés pour réaliser la classification. Le nombre de neurones optimal pour la couche pleinement connectée *FC2* est de 522. Une fonction d'activation *ReLU*¹⁴ est utilisée.

4.1.2.3 Interface utilisateur d'annotation en ligne de production

Notre logiciel propose une interface utilisateur pour réaliser l'annotation des pièces dans le cadre de l'apprentissage supervisé. Elle est destinée à être utilisée par un technicien-régleur ou un expert qualité. Dès qu'une pièce est produite et imagée, elle s'affiche dans l'interface en surimpression, telle que présentée dans la Figure 4.7.

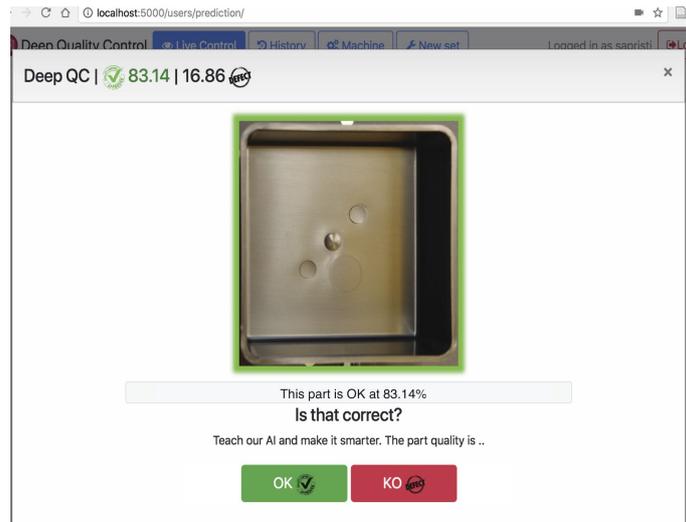
L'utilisateur voit la classification de la pièce réalisée par le modèle sous la forme d'un message et d'un code couleur (vert pour une pièce conforme, rouge pour une pièce non-conforme). La confiance de la décision est affichée en pourcentage. C'est la valeur de la probabilité de conformité qui est retournée par la dernière couche *SoftMax* du réseau. L'utilisateur peut alors accepter ou modifier l'annotation de la pièce. Lorsque qu'une annotation d'une pièce a été validée par l'utilisateur, les images sont ajoutées au jeu de données d'apprentissage.

Nous n'ajoutons pas automatiquement toutes les pièces au jeu de données d'apprentissage afin d'éviter les erreurs d'annotations et les biais. Ainsi, au début de l'utilisation de notre système, la base d'apprentissage ne contient pas de pièces annotées. L'utilisateur doit alors annoter des pièces pour que le modèle soit mis à jour. Dès qu'une vingtaine de pièces sont présentes dans le jeu de données, l'apprentissage débute. Cent secondes plus tard, le modèle peut prédire la qualité. Par la suite, l'utilisateur affine le modèle au fur et à mesure de la production.

A posteriori de la production des pièces, l'utilisateur peut également modifier la catégorie des pièces et ainsi augmenter la quantité de pièces dans le jeu de données d'apprentissage. L'interface est accessible depuis un navigateur web, sur station de travail, tablette ou smartphone. Lorsque vingt nouvelles pièces ont été ajoutées, l'apprentissage du modèle est réalisé pour améliorer la performance de classification de la conformité.

13. Nous présentons la méthode *BOHB* dans la Section 3.3.4 du chapitre précédent.

14. La fonction d'activation *ReLU* est discutée dans la Annexe F.3.



(a) Annotation de la qualité au fur et à mesure de la production.

ID	Image	Date	Name	DNN Qual	DNN Prob	Human Qual	Final Qual	SVM Qual	SVM Prob	Model dist	EDIT	DELETE	User
136		2018-11-16 15:24:26	None	KO	1.000	None	None	KO	0.218	111012.622	EDIT	DELETE	1
135		2018-11-16 15:23:18	None	KO	1.000	None	None	KO	0.218	102734.919	EDIT	DELETE	1
134		2018-11-16 15:22:14	None	KO	1.000	None	None	KO	0.218	114502.135	EDIT	DELETE	1
133		2018-11-16 15:21:10	None	KO	1.000	None	None	KO	0.218	107233.265	EDIT	DELETE	1
132		2018-11-16 15:20:05	155	KO	1.000	KO	POLLUTION	KO	0.218	114145.557	EDIT	DELETE	1

(b) Historique de la production et annotations associées.

Figure 4.7 – Interface utilisateur d'annotation de la conformité des pièces.

Synthèse : Système de contrôle par apprentissage et imagerie non-conventionnelle

Nous proposons un système de contrôle qui utilise l'apprentissage statistique afin de déterminer si la pièce est conforme ou non. Le système se compose d'un dispositif de mesure qui enregistre quatre images pour chaque pièce produite : une image thermique et trois images polarisées linéairement à des angles de 0°, 45° et 90°.

Une réseau de neurones profond analyse ces quatre images et retourne une probabilité de conformité. Le réseau de neurones utilise un apprentissage par transfert de domaine, à partir d'un réseau pré-appris sur une grande quantité de données.

Une interface utilisateur dans un navigateur web permet à l'utilisateur, technicien-régleur ou expert qualité, d'apprendre au système si les pièces sont conformes ou non. L'humain est au cœur de ce système, c'est pourquoi il est important proposer une interface agréable et ergonomique. Chaque nouvelle pièce enregistrée par le système est affichée dès sa production. L'interface affiche le degré de conformité retourné par le système et l'utilisateur peut modifier la réponse donnée si celle-ci est erronée. En début de production, l'utilisateur doit annoter cent pièces pour que le système apprenne un modèle de la qualité. Par la suite, toutes les vingt nouvelles pièces annotées, le modèle est mis à jour.

4.2 Validation expérimentale : applications industrielles

Afin de valider les performances du système de contrôle proposé, nous avons réalisé deux expérimentations. Notre démarche expérimentale consiste en la production d'un grand nombre de pièces et en la mesure de chacune d'elle par notre dispositif. Les réglages de la presse à injecter sont variés au cours de l'expérimentation afin de produire des pièces dont la qualité est considéré comme conforme et des pièces non. Pour chaque pièce, un expert humain détermine de manière binaire si la pièce est conforme ou non-conforme et renseigne cette annotation à l'aide de l'interface présenté dans la Section 4.1.2.3 précédente.

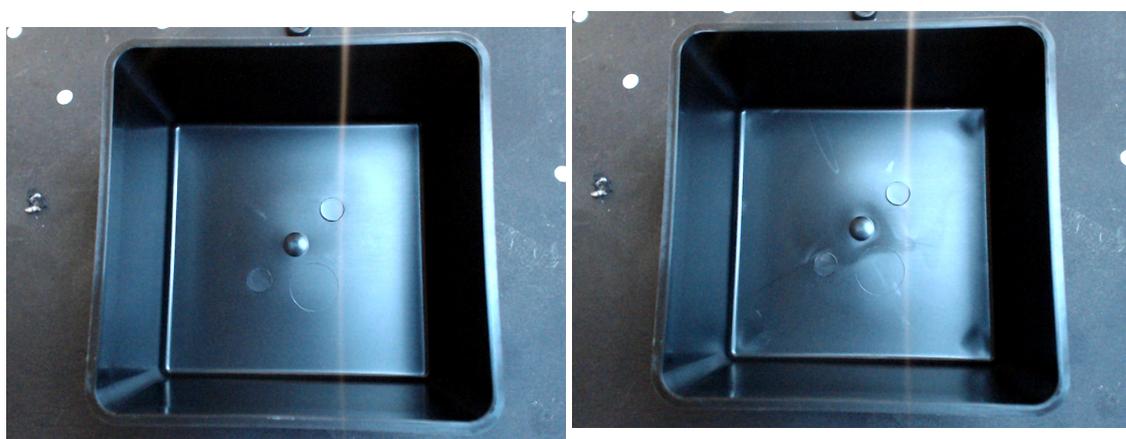
Le jeu de données a principalement été construit pendant que le technicien-régleur effectuait les réglages de la machine. L'opérateur humain explore généralement naturellement les réglages de la machine pour choisir le bon réglage pour produire des pièces conformes.

Afin de comparer les deux expérimentations, nous utilisons une validation croisée *3-folds* qui comporte 60% des pièces du jeu de données en apprentissage et 40% des pièces en validation. Cette validation est réalisée trois fois en tirant aléatoirement les pièces à chaque fois. Les performances moyennes et l'écart-type des résultats sont étudiés. Nous présenterons les résultats de chaque expérimentation dans les deux sections suivantes.

4.2.1 Essai "boîte noire" au Centre Techniques IPC

Cet essai a été réalisé en juin 2019 au Centre Technique IPC. La pièce produite est une "boîte noire" de 90×90 mm, que nous avons également étudiée dans la Section 2.1. La matière utilisée est un polypropylène automobile *ExonMobil EXXTRAL CMU201* de couleur noire. Les pièces sont produites avec une durée de cycle de quarante secondes. La mesure est effectuée dix secondes après la sortie du moule. C'est la durée du convoyage par le bras robotisé. La disposition du dispositif de mesure sur la ligne de production est présentée dans la Figure 4.3.

Le jeu de données obtenu est constitué de 240 séries de quatre images, qui correspondent à chacune des pièces produites. La Figure 4.8 présente les images de la caméra linéairement polarisée selon un angle de 0° , pour une pièce conforme et une pièce non-conforme. Lors de l'expérience, des images ont été capturées par erreur alors que la pièce n'était pas présente devant le dispositif de mesure ; ces images ont été écartées du jeu de données.



(a) Image d'une pièce conforme.

(b) Image d'une pièce non-conforme à cause d'une retassure.

Figure 4.8 – Images originales pour la caméra linéairement polarisée selon un angle de 0° .

4.2.1.1 Matrices de confusion

Le Tableau 4.1 présente les matrices de confusion obtenues pour le jeu de données d'apprentissage et pour le jeu de données de validation.

		Classes vraies	
		Conformes	Non-conformes
Classes prédites	Conformes	Vrais positifs : 65	Faux Positifs : 0
	Non-conformes	Faux négatifs : 1	Vrais Négatifs : 102

(a) Jeu de données d'apprentissage.

		Classes vraies	
		Conformes	Non-conformes
Classes prédites	Conformes	Vrais positifs : 36	Faux Positifs : 0
	Non-conformes	Faux négatifs : 0	Vrais Négatifs : 36

(b) Jeu de données de validation.

Tableau 4.1 – Matrices de confusion pour l'essai boîtes noires.

Le nombre d'erreurs de classification en apprentissage est très faible. Il est nul pour le jeu de données de validation. Le réseau permet de classifier la conformité des pièces avec succès.

La Figure 4.9 présente la courbe ROC ¹⁵ (*Receiver Operating Characteristic*) obtenue pour le jeu de données de validation. Cette courbe est calculée une fois l'apprentissage du modèle effectué. Elle permet de distinguer les vrais positifs des erreurs de classification (taux de vrais négatifs). La performance est comparée à la réponse d'un classifieur aléatoire (droite rouge en pointillée).

Cette courbe permet de choisir la valeur optimale de séparation entre les deux classes en fonction de la probabilité de conformité retournée par le réseau. Dans notre cas, une valeur milieu de 0,5 est satisfaisante. On observe également que l'écart-type obtenu par la validation croisée *3-folds* est très faible. Le système de classification de la qualité est ici très performant.

4.2.1.2 Analyse non-supervisée

Afin de poursuivre l'analyse, nous avons réalisé une Analyse en Composantes Principales (ACP) ¹⁶ à partir de la réduction *UMAP* ¹⁷ à cent scalaires de la dernière couche *FC2* du réseau (564 valeurs scalaires réduites à cent scalaires). Le code couleur représente en vert les pièces conformes, en rouge les pièces non-conformes. L'interface utilisateur permet d'afficher l'image associée à chacun des points lors du survol ou du clic. La Figure 4.10 présente le résultat obtenu à l'aide des trois composantes principales. Cette représentation est disponible dans l'interface utilisateur que nous avons développée ; le survol à la souris de chacun des points affiche l'image associée, ce qui permet de valider les performances.

On observe que les pièces conformes sont bien séparées des pièces non-conformes. De plus, une pièce non-conforme (de couleur rouge) est située à proximité d'un lot de pièces conformes : c'est une erreur d'annotation de l'humain. Enfin, on observe que l'information issue de la dernière couche du réseau permet de discrétiser différentes catégories de pièces conformes. Une étude par

15. La courbe ROC représente la performance d'un classifieur. Elle est présentée en détail dans l'Annexe E.1.5.

16. Le principe de l'Analyse en Composantes Principales est détaillé dans la Section 3.2.4.3.

17. L'algorithme de réduction de dimension non-supervisé *UMAP* est discuté dans la Section 3.2.4.6.

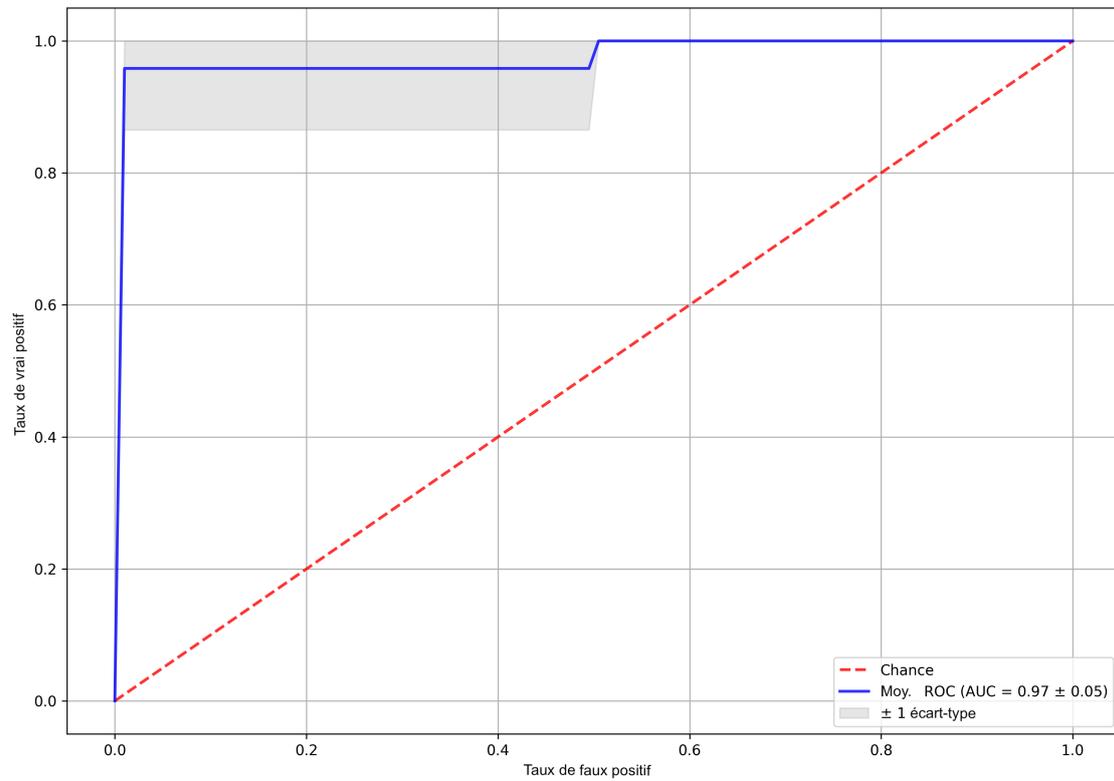


Figure 4.9 – Courbe ROC du meilleur classifieur de la qualité des pièces pour l'essai "boîtes noires".

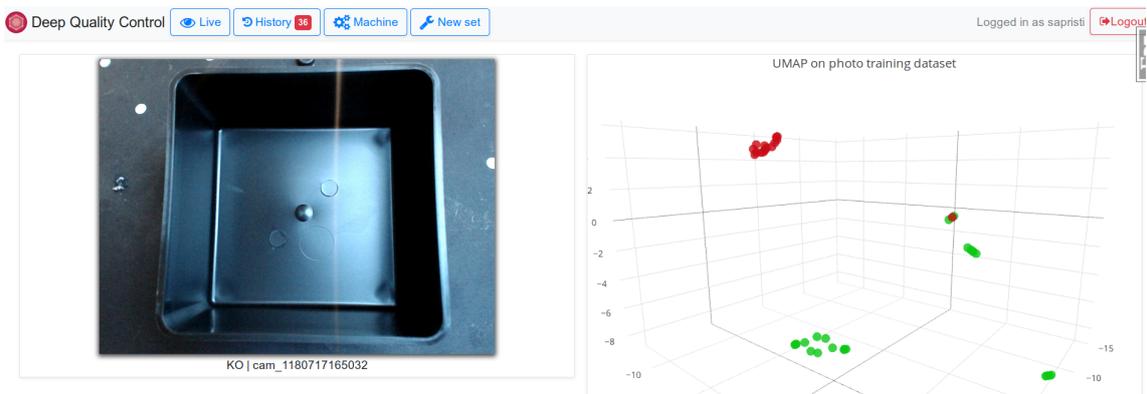


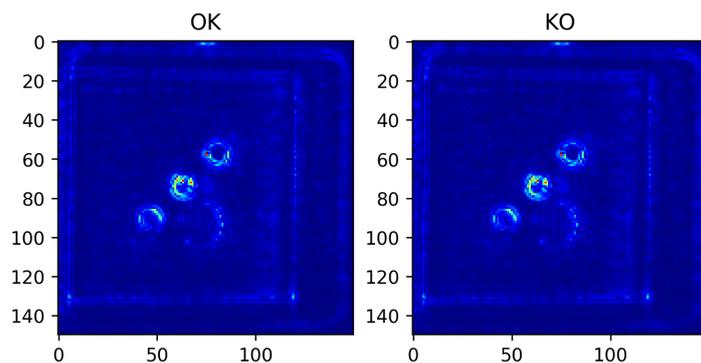
Figure 4.10 – ACP sur réduction UMAP à 100 scalaires des 564 valeurs de la dernière couche du réseau.

clustering non-supervisé (discuté dans la Section 3.2.4) permettrait d'enrichir les informations données par notre système en donnant les catégories de pièce, en plus de la classification de non-conformité binaire.

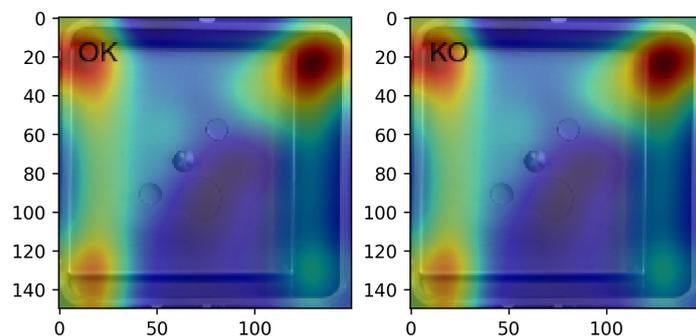
4.2.1.3 Cartes de saillance

Afin d'interpréter les résultats obtenus en classification par les réseaux de convolution profonds, il est possible de construire une carte de saillance¹⁸ des pixels de l'image qui ont été important pour réaliser la classification. Cette carte est construite en sommant les valeurs des pixels de l'image pour chaque couche d'activation du réseau profond [SVZ13; LY15]. Nous utilisons deux algorithmes pour réaliser ces cartes : (a) la rétro-propagation guidée [Spr+14] avec régularisation [Smi+17] et (b) l'algorithme *Grad-CAM* [Sel+16]. Nous avons adapté la librairie *keras-viz* à nos données [Kc17].

La Figure 4.11 présente ces cartes obtenues pour une pièce conforme et une pièce non-conforme. Nous avons réalisé la carte de saillance pour l'image dont la polarisation linéaire est de 0° par rapport à l'éclairage annulaire. Les pixels saillants de l'image, pour le réseau de neurones, sont les bords de la pièce où se situent les défauts géométriques, ainsi que les régions planes où apparaissent des défauts d'aspect. Ces cartes montrent que le réseau de neurones a appris à s'intéresser aux éléments de la pièce pour inférer la conformité.



(a) Carte de saillance par l'algorithme "guided backpropagation".



(b) Carte de saillance par l'algorithme "grad-CAM".

Figure 4.11 – Cartes de saillance obtenues pour une pièce conforme et une pièce non-conforme.

18. Les cartes de saillance sont issues de la méthode de réduction de dimensions par interpolation (le *pooling*) qui est utilisée dans les réseaux de convolutions profonds. Nous discutons de la mise en œuvre de ces cartes dans l'Annexe F.4.4.

4.2.2 Essai "plaques" confidentiel

Dans le cadre du projet de recherche collaboratif FUI SAPRISTI, nous avons réalisé un essai chez un industriel en Avril 2019. Le cadre et les résultats de cet essai sont confidentiels. Ils sont détaillés dans l'Annexe H.

4.2.3 Discussions et limites du système proposé

Les essais expérimentaux nous permettent de mettre en évidence les limites qui apparaissent sur notre système. Le premier cas d'application "boîte noire" montre des résultats très encourageants. En revanche, le second cas d'application n'est pas satisfaisant. Il montre la difficulté à réaliser un système capable de contrôler tous types de pièces. Dans cette section, nous discuterons de principales limites de notre système.

4.2.3.1 Faible nombre d'échantillons dans les essais expérimentaux

Le nombre de pièces dans les jeux de données des essais expérimentaux est très faible en comparaison des milliers d'échantillons généralement présentés dans la littérature de l'apprentissage statistique. L'augmentation artificielle du jeu de données par transformation aléatoire des images que nous utilisons ne permet pas de remplacer l'acquisition de nouvelles données réelles. Nous espérons éprouver dans l'avenir notre système sur une quantité de données plus importante. Cela permettra de justifier notre approche et d'identifier les biais potentiels.

4.2.3.2 Répétabilité du positionnement

Une difficulté importante a été identifiée lors du second essai "plaques". La pièce était déposée par le robot sur un tapis avant son contrôle. Cette opération introduit une variation du positionnement des pièces. Les traitements d'image pour compenser ces variations que nous avons réalisés ne se sont pas montrés suffisants. Cette variabilité dans le positionnement introduit un biais dans le jeu de données. En pratique, il est préférable que le positionnement des pièces soit répétable pour supprimer cette cause de biais. Le positionnement par un posage précis de la pièce ou par la répétition d'un bras robotisé est recommandé. Le bras robotisé a été utilisé avec succès dans le premier essai "boîtes noires".

4.2.3.3 Limites de la solution de capture retenue

Notre système est limité à un unique point de vue. Pour notre cas d'étude, les surfaces à évaluer des pièces sont situées dans un même plan. Dans le cas de pièces courbes, il serait intéressant d'utiliser notre méthode en multipliant le nombre de points de vues : deux caméras pour couvrir 270 degrés d'angle de champ et trois caméras pour une révolution complète. Enfin, il serait intéressant d'évaluer la dégradation de performance de la classification de la qualité en fonction de la définition du capteur. Notre prototype utilise de simples webcams grands publics, mais des solutions de caméras industrielles de meilleures résolutions existent à des coûts plus élevés.

4.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté notre proposition d'un système de contrôle de la qualité en ligne de production, à partir d'images non-conventionnelles. Le système utilise une architecture client-serveur et un réseau de neurones profonds pour extraire et fusionner l'information de plusieurs caméras. Le réseau de neurones permet d'adapter le système à chaque type de pièce, par apprentissage.

Le réseau de neurones retourne une probabilité de conformité de la pièce. La valeur de cette probabilité est utilisée à l'aide d'un seuil, pour définir si la pièce est conforme ou non. En fonction de l'application, il est possible de limiter le nombre de pièces non-conformes dans le lot final en augmentant le seuil du nombre de pièces conformes qui sont classées comme non-conformes (faux négatifs). Cette démarche augmente les rebuts mais permet de limiter le risque de pièces non-conformes dans le lot final.

Une interface utilisateur, dans un navigateur web, permet à l'utilisateur, technicien-régleur ou expert qualité, d'apprendre au système à reconnaître les pièces conformes ou non. Chaque nouvelle pièce, enregistrée par le système, est affichée dès sa prise de vue. L'interface affiche le degré de conformité retourné par le système et l'utilisateur peut modifier la réponse donnée si celle-ci est erronée. Toutes les vingt nouvelles pièces annotées, le modèle est mis à jour.

Nous avons réalisé deux essais expérimentaux afin d'évaluer les performances du système. L'essai "boîtes noires" présente de très bons résultats de classification. En revanche, l'essai "plaques" présente des résultats peu satisfaisants. Le manque de répétabilité du positionnement des pièces, lors de la mesure, a introduit un biais dans le jeu de données. Suite à cet essai, nous recommandons de mettre en place un positionnement répétable, si possible au pixel prêt, à l'aide d'un posage ou d'un bras robotisé.

La principale suite à ces travaux est la validation des performances sur un plus grand nombre d'individus. Actuellement, les résultats sont obtenus sur des productions de plusieurs centaines de pièces. L'acquisition massive de données permettrait également d'améliorer le modèle par apprentissage. De plus, la réponse des réseaux de neurones profonds gagnent en robustesse lorsque les individus du jeu de données sont variés.

4.4 Perspectives

3.4.1 Validation sur de multiples cas d'application

La mise à disposition d'un système de qualification mobile et intégré permet d'envisager la réalisation de nombreux essais sur des lignes de production. L'objectif sera de multiplier les cas d'application afin de valider les performances et d'optimiser les traitements. Il sera également intéressant d'évaluer notre système sur d'autres procédés de fabrication. En particulier, d'autres procédés qui produisent des pièces chaudes ou qui possèdent une variabilité de la thermique seront intéressants à étudier.

3.4.2 Apprentissage semi et non-supervisé

Enfin, l'intérêt des approches semi-supervisés et non-supervisés est de se passer de l'expertise humaine pour apprendre le modèle. En effet, l'expert humain peut introduire un biais dans le jeu de données. De plus, le travail d'annotation humaine présente un certain coût. La classification non-supervisée de la conformité permettrait également pour pouvoir classifier la qualité sans donnée initiale, dès la mise en route du système de qualification. Nous n'avons pas évalué cette approche qui est une perspective importante. La Section 3.2.3 discute des méthodes envisageables et présente des applications qualitatives sur nos données. En particulier, nous nous intéresserons, en suite directe de ce travail, à l'utilisation des auto-encodeurs variationnels¹⁹ pour extraire l'information des images de manière non supervisée.

19. Les auto-encodeurs variationnels sont des réseaux génératifs. Nous discutons de leurs utilisations sur nos données dans la Section 3.2.4.7.

Conclusion générale

L'industrie manufacturière cherche à produire en grande quantité des pièces à la qualité optimale. La qualité d'une pièce est l'ensemble de ses caractéristiques qui répondent à un besoin. Les besoins spécifiés dans les cahiers des charges concernent la fonction des pièces, mais aussi leur aspect. En particulier, l'aspect visuel devient, pour le client, un indicateur de la qualité fonctionnelle du produit. Contrôler la qualité d'un produit nécessite ainsi de mesurer ses caractéristiques fonctionnelles et ses caractéristiques d'aspect. Notre travail propose d'utiliser des techniques d'imagerie non-conventionnelle pour contrôler l'aspect et la géométrie.

De plus, l'automatisation des procédés de fabrication demande de pouvoir écarter les pièces non-conformes de la chaîne de production. En particulier, les assemblages automatisés de plusieurs pièces élémentaires augmentent singulièrement la sensibilité aux pièces non-conformes. En effet, la présence de produits non conformes, dans un processus automatisé, peut conduire à des arrêts de chaîne de production coûteux. Dans le cadre de l'injection-moulage des thermoplastiques, les secteurs automobile et médical sont pionniers de cette automatisation. Le taux de pièces non-conformes acceptable est particulièrement faible ; de l'ordre de quelques pièces par millions dans les lots livrés. Aujourd'hui, les niveaux de qualité inférieurs à cinq pièces non-conformes par million ne peuvent être garantis que par le contrôle à cent pourcent des pièces et l'élimination des non-conformes.

Cependant, lorsqu'il est réalisé par un opérateur humain, le coût économique du contrôle de la qualité à cent pourcent n'est pas viable pour un volume de production industriel. Le contrôle qualité ne doit pas non plus interrompre le flux de production. C'est pourquoi l'automatisation du contrôle de la qualité est obligatoire. Un des objectifs de notre travail est de réaliser le contrôle de la qualité de cent pourcent des pièces directement en ligne de production.

De plus, il est coûteux d'apporter de la valeur ajoutée par des opérations de finition à un produit qui pourrait être déclaré non conforme dès l'étape qui a causé la non-conformité. Dans le cadre de l'injection-moulage des thermoplastiques, le contrôle de la qualité des produits dès la sortie du moule permet d'éliminer ce coût de non-qualité. La gestion des produits non-conforme est également simplifiée. Si elle est contrôlée à temps, une pièce non-conforme pourrait être recyclée dès sa production. De plus, un circuit spécifique de recyclage, adapté au matériau en présence, pourrait être mis en place à la suite de chaque étape de contrôle de la qualité, tout au long de la production.

Dans une démarche de maîtrise du procédé de fabrication, le contrôle de la qualité en ligne pourrait permettre de détecter la dérive du procédé au plus tôt. Il deviendrait alors possible d'alerter ou de stopper le moyen de production, pour ne plus produire de pièces non-conformes. Cela permettrait d'économiser la matière première de plusieurs centaines, voir de plusieurs milliers de pièces. Si ces pièces poursuivent leur chemin dans des étapes de finitions, le coût de la finition est également économisé. Dans notre cadre d'étude, le procédé d'injection-moulage des thermoplastiques est généralement stable et la dérive du procédé apparaît rarement. Un opérateur humain peut généralement superviser plusieurs machines en parallèle. Il est plus courant de devoir écarter des pièces non-conformes dus à des causes exceptionnelles (défaillance du procédé), qu'à une dérive du procédé. Dans le cas d'une défaillance exceptionnelle, le contrôle en ligne permet

une réactivité immédiate pour réparer et ne pas impacter l'ensemble de la chaîne de fabrication. Dans le cas d'une dérive du procédé, le contrôle en ligne permet d'alerter, voir d'interrompre la production.

Le contrôle qualité n'ajoute pas de valeur au produit final. Aussi, le coût acceptable de l'installation d'un système de contrôle automatique est généralement faible. Seules les productions hautement spécialisées investissent dans son automatisation. Le coût du système de contrôle doit être inférieur au coût de la production de pièces non-conformes. Un objectif important de notre travail est de proposer un dispositif de contrôle de la qualité peu coûteux, afin qu'il puisse être largement adopté dans l'industrie de la plasturgie.

Enfin, la conception d'un nouveau système de mesure s'inscrit dans une démarche de validation expérimentale de l'ensemble de nos propositions. Les modèles construits par apprentissage statistique nécessitent un jeu de données composé de nombreux individus. Posséder un dispositif de mesure nous a permis d'enregistrer les données requises pour l'apprentissage de nos modèles. Le dispositif de mesure est conçu par intégration verticale : du capteur au traitement des données. Cela nous a permis de maîtriser l'ensemble de la chaîne d'acquisition et d'analyse des données, et de pouvoir l'optimiser pour répondre à notre problème. La validation du système a été réalisée sur des presses à injecter industrielles lors de deux essais expérimentaux.

Nous avons proposé un dispositif de mesure de la qualité qui utilise l'apprentissage supervisé. Le prototype a été évalué en conditions réelles sur des jeux de peu de données. Néanmoins, les résultats sont encourageants. La méthode proposée permet de résoudre les problèmes qui limitent actuellement le déploiement du contrôle à cent pour cent en injection plastique. De futures essais permettront de confronter le dispositif à des quantités de pièces produites importantes.

Actuellement, notre système s'appuie sur une phase d'apprentissage spécifique à chaque pièce, lors de la mise en production d'une pièce. Il sera intéressant de concevoir un système capable de généraliser la notion de qualité et de généraliser la classification des défauts, pour toutes pièces.

Valorisation scientifiques

Ces travaux de doctorat ont fait l'objet de communications en congrès scientifiques internationaux [NPP17b ; NPP17a ; Nag+17 ; Nag+18 ; Nag+19], ainsi que d'un colloque national [NPP17b]. Un Article de revue à Comité de Lecture a été soumis à la revue *Journal of Electronic Imaging* en Octobre 2019. Un séminaire de présentation de ces travaux a été présenté au laboratoire SYMME en Décembre 2019.

Valorisation économique

Notre système de mesure de la qualité a été lauréat du sixième concours *Out Of Labs*²⁰, organisé par la SATT²¹ [Linksum Grenoble Alpes](#). Ce prix nous permet de poursuivre la recherche et les développements, vers une application commerciale.

Le dispositif de contrôle de la qualité conçu pendant ces travaux de doctorat a fait l'objet du dépôt d'un brevet intitulé "Dispositif et Procédé de Contrôle de Pièces" [NPP19].

20. [Résultats de la sixième édition du concours Out Of Labs](#)

21. SATT : Société d'Accélération du Transfert de Technologies

Bibliographie

- [Aba+16] Martín ABADI, Paul BARHAM, Jianmin CHEN, Zhifeng CHEN, Andy DAVIS, Jeffrey DEAN, Matthieu DEVIN, Sanjay GHEMAWAT, Geoffrey IRVING, Michael ISARD, Manjunath KUDLUR, Josh LEVENBERG, Rajat MONGA, Sherry MOORE, Derek G. MURRAY, Benoit STEINER, Paul TUCKER, Vijay VASUDEVAN, Pete WARDEN, Martin WICKE, Yuan YU et Xiaoqiang ZHENG. “TensorFlow : A System for Large-Scale Machine Learning”. In : *arXiv :1605.08695 [cs]* (mai 2016). arXiv : [1605.08695 \[cs\]](https://arxiv.org/abs/1605.08695) (cf. p. 122).
- [Abu88] Deeb ABU FARA. “Control of Nozzle and Cavity Pressure during Filling and Packing in Thermoplastics Injection Molding”. Thèse de doct. Août 1988 (cf. p. 166, 169).
- [AKP85] Deeb ABU FARA, M. R. KAMAL et W. I. PATTERSON. “Evaluation of Simple Dynamic Models and Controllers for Hydraulic and Nozzle Pressure in Injection Molding”. In : *Polymer Engineering & Science* 25.11 (août 1985), p. 714-723. ISSN : 1548-2634. DOI : [10.1002/pen.760251109](https://doi.org/10.1002/pen.760251109) (cf. p. 166, 169).
- [AKP90] Deeb ABU FARA, M.R. KAMAL et W.I. PATTERSON. “Comprehensive Strategies for Sequential Closed Loop Pressure Control Throughout the Injection Molding Cycle”. In : *SPE ANTEC Papers*. T. 36. Society of Plastics Engineers, 1990, p. 239 (cf. p. 166, 169).
- [Adr07] Pierre-Antoine ADRAGNA. “Tolérancement des Systèmes Assemblés, une approche par le Tolérancement Inertiel et Modal”. Thèse de doct. Université de Savoie, déc. 2007 (cf. p. 56).
- [Aga+13] Alban AGAZZI, Vincent SOBOTKA, Ronan LE GOFF et Yvon JARNY. “Optimal Cooling Design in Injection Moulding Process – A New Approach Based on Morphological Surfaces”. In : *Applied Thermal Engineering* 52.1 (avr. 2013), p. 170-178. ISSN : 1359-4311. DOI : [10.1016/j.applthermaleng.2012.11.019](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.11.019) (cf. p. 20).
- [AHK19] Tatyana AGEYEVA, Szabolcs HORVÁTH et József Gábor KOVÁCS. “In-Mold Sensors for Injection Molding : On the Way to Industry 4.0”. In : *Sensors* 19.16 (jan. 2019), p. 3551. DOI : [10/gf78qn](https://doi.org/10/gf78qn) (cf. p. 21).
- [APP87] A. R. AGRAWAL, I. O. PANDELIDIS et M. PECHT. “Injection-Molding Process Control—A Review”. In : *Polymer Engineering & Science* 27.18 (oct. 1987), p. 1345-1357. ISSN : 1548-2634. DOI : [10.1002/pen.760271802](https://doi.org/10.1002/pen.760271802) (cf. p. 15, 166, 169).
- [ABR64] Mark Aronovich AĪZERMAN, É.M. BRAVERMAN et L. I. ROZONOÉR. “Theoretical Foundations of the Potential Function Method in Pattern Recognition Learning”. In : *Automation and Remote Control* 25.6 (fév. 1964), p. 821-837 (cf. p. 186).
- [Alb19] Bruno ALBERT. “Maîtrise de la qualité haptique des produits”. Thèse de doct. Université Grenoble Alpes, mar. 2019. HAL : [tel-02137398](https://hal.archives-ouvertes.fr/te1-02137398) (cf. p. 30, 76).
- [Alb+19] Bruno ALBERT, François de BERTRAND DE BEUVRON, Cecilia ZANNI-MERK, Jean-Luc MAIRE, Maurice PILLET, Julien CHARRIER et Christophe KNECHT. “A Smart System for Haptic Quality Control : A Knowledge-Based Approach to Formalize the Sense of Touch In”. In : *Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management. IC3K 2016. Communications in Computer and Information Science, Vol 914. Springer, Cham*. 2019, p. 173-190. DOI : [10.1007/978-3-319-99701-8_8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-99701-8_8). HAL : [ha1-01952452](https://hal.archives-ouvertes.fr/ha1-01952452) (cf. p. 30).
- [Alb+16a] Bruno ALBERT, Christophe KNECHT, François de BERTRAND DE BEUVRON, Julien CHARRIER, Maurice PILLET, Jean-Luc MAIRE et Cecilia ZANNI-MERK. “Formalisation Du Contrôle Qualité Haptique : Structuration Sémantique Des Sensations Haptiques”. In : (2016). DOI : [10.13140/RG.2.2.15316.60806](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15316.60806) (cf. p. 30).

- [Alb+16b] Bruno ALBERT, Jean-Luc MAIRE, Maurice PILLET, Cecilia ZANNI-MERK, François DE BERTRAND DE BEUVRON, Christophe KNECHT et Julien CHARRIER. “Generic and Structured Description of Tactile Sensory Perceptions”. In : *6th Kansei Engineering and Emotion Research*. Août 2016 (cf. p. 30).
- [Alb+17] Bruno ALBERT, Cecilia ZANNI-MERK, François de Bertrand DE BEUVRON, Maurice PILLET, Jean-Luc MAIRE, Christophe KNECHT et Julien CHARRIER. “A Smart System to Standardize the Specifications of Haptic Quality Control”. In : *Procedia Computer Science*. Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems : Proceedings of the 21st International Conference, KES-20176-8 September 2017, Marseille, France 112 (jan. 2017), p. 723-730. ISSN : 1877-0509. DOI : [10/gf4j4k](https://doi.org/10/gf4j4k) (cf. p. 30, 76).
- [ACB17] Martin ARJOVSKY, Soumith CHINTALA et Léon BOTTOU. “Wasserstein GAN”. In : *arXiv :1701.07875 [cs, stat]* (jan. 2017). arXiv : [1701.07875 \[cs, stat\]](https://arxiv.org/abs/1701.07875) (cf. p. 103).
- [AV07] David ARTHUR et Sergei VASSILVITSKII. “K-Means++ : The Advantages of Careful Seeding”. In : *Proceedings of the Eighteenth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*. SODA '07. Philadelphia, PA, USA : Society for Industrial and Applied Mathematics, 2007, p. 1027-1035. ISBN : 978-0-89871-624-5 (cf. p. 89).
- [AE18] Gary A. ATKINSON et Jürgen D. ERNST. “High-Sensitivity Analysis of Polarization by Surface Reflection”. In : *Machine Vision and Applications* 29.7 (oct. 2018), p. 1171-1189. ISSN : 1432-1769. DOI : [10/gf8ztt](https://doi.org/10/gf8ztt) (cf. p. 45).
- [Aut+10] AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP, CHRYSLER, FORD et General MOTORS. *Measurement Systems Analysis (MSA) Reference Manual*. 4^e éd. OCLC : 729994003. Southfield, Mich : Automotive Industry Action Group, 2010. ISBN : 978-1-60534-211-5 (cf. p. 69).
- [BR12] Lars BÅÅTH et Bengt-Göran ROSÉN. “Towards New Interferometer Technology for Surface Metrology”. In : *12th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology (EUSPEN 2012), June 4th-7th, 2012, Stockholm, Sweden*. T. 1. EUSPEN, 2012, p. 158-161 (cf. p. 24).
- [BCB14] Dzmitry BAHDANAU, Kyunghyun CHO et Yoshua BENGIO. “Neural Machine Translation by Jointly Learning to Align and Translate”. In : *arXiv :1409.0473 [cs, stat]* (sept. 2014). arXiv : [1409.0473 \[cs, stat\]](https://arxiv.org/abs/1409.0473) (cf. p. 104).
- [BC93] Pierre BALDI et Yves CHAUVIN. “Neural Networks for Fingerprint Recognition”. In : *Neural Computation* 5.3 (mai 1993), p. 402-418. ISSN : 0899-7667. DOI : [10.1162/neco.1993.5.3.402](https://doi.org/10.1162/neco.1993.5.3.402) (cf. p. 82).
- [Bal87] Dana H. BALLARD. “Modular Learning in Neural Networks”. In : *Proceedings of the Sixth National Conference on Artificial Intelligence - Volume 1*. AAAI'87. AAAI Press, 1987, p. 279-284. ISBN : 978-0-934613-42-2 (cf. p. 99).
- [BH86] Josh BARNES et Piet HUT. “A Hierarchical O(N Log N) Force-Calculation Algorithm”. In : *Nature* 324.6096 (déc. 1986), p. 446-449. ISSN : 1476-4687. DOI : [10/fvcc2m](https://doi.org/10/fvcc2m) (cf. p. 97).
- [Bau12] Nathalie BAUDET. “Maîtrise de la qualité visuelle des produits - Formalisation du processus d'expertise et proposition d'une approche robuste de contrôle visuel humain”. Thèse de doct. Université de Grenoble, déc. 2012. HAL : [te1-00807304](https://hal.archives-ouvertes.fr/te1-00807304) (cf. p. 69, 76).
- [BPM11] Nathalie BAUDET, Maurice PILLET et Jean-Luc MAIRE. “Visual Inspection of Products : A Comparison of the Methods Used to Evaluate Surface Anomalies.” In : (juin 2011). HAL : [hal-00712918](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00712918) (cf. p. 69).
- [Bea+15] Amy BEARMAN, Olga RUSSAKOVSKY, Vittorio FERRARI et Li FEI-FEI. “What’s the Point : Semantic Segmentation with Point Supervision”. In : *arXiv :1506.02106 [cs]* (juin 2015). arXiv : [1506.02106 \[cs\]](https://arxiv.org/abs/1506.02106) (cf. p. 69).
- [Bel12] Aurélien BELLET. “Supervised Metric Learning with Generalization Guarantees”. Thèse de doct. Saint-Etienne, France : Université de Saint-Etienne, déc. 2012. HAL : [te1-00770627](https://hal.archives-ouvertes.fr/te1-00770627) (cf. p. 76).
- [BSF94] Y. BENGIO, P. SIMARD et P. FRASCONI. “Learning long-term dependencies with gradient descent is difficult”. In : *IEEE Transactions on Neural Networks* 5.2 (mar. 1994), p. 157-166. ISSN : 1045-9227. DOI : [10.1109/72.279181](https://doi.org/10.1109/72.279181) (cf. p. 79).

-
- [Bér+04] Yves BÉREAUX, Maël MOGUEDET, Xaxier RAOUL, Jean-Yves CHARMEAU, Jean BALCAEN et Didier GRAEBLING. “Series Solutions for Viscous and Viscoelastic Fluids Flow in the Helical Rectangular Channel of an Extruder Screw”. In : *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 123.2–3 (nov. 2004), p. 237-257. ISSN : 0377-0257. DOI : [10.1016/j.jnnfm.2004.08.011](https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2004.08.011) (cf. p. 15).
- [Ber+11] James S. BERGSTRA, Rémi BARDENET, Yoshua BENGIO et Balázs KÉGL. “Algorithms for Hyper-Parameter Optimization”. In : *Advances in Neural Information Processing Systems 24*. Sous la dir. de J. SHAWE-TAYLOR, R. S. ZEMEL, P. L. BARTLETT, F. PEREIRA et K. Q. WEINBERGER. NIPS’11. USA : Curran Associates, Inc., 2011, p. 2546-2554. ISBN : 978-1-61839-599-3 (cf. p. 106, 108, 109).
- [BB12] James S. BERGSTRA et Yoshua BENGIO. “Random Search for Hyper-Parameter Optimization”. In : *Journal of Machine Learning Research* 13.Feb (2012), p. 281-305. ISSN : ISSN 1533-7928 (cf. p. 106).
- [BYC13] James BERGSTRA, Daniel YAMINS et David COX. “Making a Science of Model Search : Hyperparameter Optimization in Hundreds of Dimensions for Vision Architectures”. In : *International Conference on Machine Learning*. Fév. 2013, p. 115-123 (cf. p. 108).
- [Ber91] Michael L. BERINS. *SPI Plastics Engineering Handbook of the Society of the Plastics Industry*. Kluwer Academic, 1991. ISBN : 978-1-4615-7606-8 (cf. p. 172).
- [Bet76] Guy BETHOUX. “Approche unitaire des méthodes d’identification et de commande adaptative des procédés dynamiques”. Thèse 3ème cycle. Grenoble, France : Institut National Polytechnique de Grenoble, 1976 (cf. p. 170).
- [BM94] P. J. BLYSKAL et P. J. MEHERAN. “Applying Design Of Experiment Analysis Techniques to the Injection Moulding”. In : *SPE ANTEC PROCESS*. Chicago, USA : Society of Plastics Engineers, avr. 1994, p. 729-732 (cf. p. 166).
- [BGV92] Bernhard E. BOSER, Isabelle M. GUYON et Vladimir N. VAPNIK. “A Training Algorithm for Optimal Margin Classifiers”. In : *Proceedings of the Fifth Annual Workshop on Computational Learning Theory*. COLT ’92. New York, NY, USA : ACM, 1992, p. 144-152. ISBN : 978-0-89791-497-0. DOI : [10/bwgqr8](https://doi.org/10/bwgqr8) (cf. p. 186).
- [BPL10] Y-Lan BOUREAU, Jean PONCE et Yann LECUN. “A Theoretical Analysis of Feature Pooling in Visual Recognition”. In : *Proceedings of the 27th International Conference on International Conference on Machine Learning*. ICML’10. USA : Omnipress, 2010, p. 111-118. ISBN : 978-1-60558-907-7 (cf. p. 196).
- [BK88] H. BOURLARD et Y. KAMP. “Auto-Association by Multilayer Perceptrons and Singular Value Decomposition”. In : *Biological Cybernetics* 59.4 (sept. 1988), p. 291-294. ISSN : 1432-0770. DOI : [10/fm3xqd](https://doi.org/10/fm3xqd) (cf. p. 99).
- [BE02] A. Tolga BOZDANA et Ömer EYERCIOĞLU. “Development of an Expert System for the Determination of Injection Moulding Parameters of Thermoplastic Materials : EX-PIMM”. In : *Journal of Materials Processing Technology* 128.1–3 (oct. 2002), p. 113-122. ISSN : 0924-0136. DOI : [10.1016/S0924-0136\(02\)00436-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00436-3) (cf. p. 168).
- [Bra00] Gary BRADSKI. “The OpenCV Library”. In : *Dr. Dobb’s Journal of Software Tools* 25.11 (2000), p. 120-125 (cf. p. 48).
- [Bre96a] Léo BREIMAN. “Bagging Predictors”. In : *Machine Learning* 24.2 (août 1996), p. 123-140. ISSN : 0885-6125, 1573-0565. DOI : [10.1023/A:1018054314350](https://doi.org/10.1023/A:1018054314350) (cf. p. 188).
- [Bre96b] Léo BREIMAN. *Bias, Variance, and Arcing Classifiers*. Rapp. tech. 460. Berkeley, USA : University of California, 1996 (cf. p. 189).
- [Bre97] Léo BREIMAN. *Arcing the Edge*. Rapp. tech. 486. Berkeley, USA : University of California, 1997 (cf. p. 189).
- [Bre01] Léo BREIMAN. “Random Forests”. In : *Machine Learning* 45.1 (oct. 2001), p. 5-32. ISSN : 0885-6125, 1573-0565. DOI : [10.1023/A:1010933404324](https://doi.org/10.1023/A:1010933404324) (cf. p. 188).
-

- [Bre33] David BREWSTER. “Experiments on the Depolarization of Light as Exhibited by Various Mineral, Animal, and Vegetable Bodies, with a Reference of the Phenomena to the General Principles of Polarization. By David Brewster, LL. D. F. R. S. Edin. and F. S. A. In a Letter Addressed to the Right Hon. Sir Joseph Banks, Bart. K. B. P. R. S”. In : *Abstracts of the Papers Printed in the Philosophical Transactions of the Royal Society of London 2* (jan. 1833), p. 4-6. DOI : [10.1098/rspl.1815.0003](https://doi.org/10.1098/rspl.1815.0003) (cf. p. 45).
- [Bro+10] K. H. BRODERSEN, C. S. ONG, K. E. STEPHAN et J. M. BUHMANN. “The Balanced Accuracy and Its Posterior Distribution”. In : *2010 20th International Conference on Pattern Recognition*. Août 2010, p. 3121-3124. DOI : [10.1109/ICPR.2010.764](https://doi.org/10.1109/ICPR.2010.764) (cf. p. 183).
- [Bro+93] Jane BROMLEY, Isabelle GUYON, Yann LECUN, Eduard SÄCKINGER et Roopak SHAH. “Signature Verification Using a "Siamese" Time Delay Neural Network”. In : *Proceedings of the 6th International Conference on Neural Information Processing Systems*. NIPS’93. event-place : Denver, Colorado. San Francisco, CA, USA : Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1993, p. 737-744 (cf. p. 82).
- [CMS13] Ricardo J. G. B. CAMPELLO, Davoud MOULAVI et Joerg SANDER. “Density-Based Clustering Based on Hierarchical Density Estimates”. In : *Advances in Knowledge Discovery and Data Mining*. Sous la dir. de Jian PEI, Vincent S. TSENG, Longbing CAO, Hiroshi MOTODA et Guandong XU. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, 2013, p. 160-172. ISBN : 978-3-642-37456-2 (cf. p. 89).
- [Cas+19] Thomas A CASWELL, Michael DROETTBOOM, John D. HUNTER, Eric FIRING, Antony LEE, Jody KLYMAK, David STANSBY, Elliott Sales De ANDRADE, Jens Hedegaard NIELSEN, Nelle VAROQUAUX, Benjamin ROOT, Tim HOFFMANN, Phil ELSON, Ryan MAY, Darren DALE, JAE-JOON LEE, Jouni K. SEPPÄNEN, Damon MCDUGALL, Andrew STRAW, Paul HOBSON, Christoph GOHLKE, Tony S YU, Eric MA, Adrien F. VINCENT, Steven SILVESTER, Charlie MOAD, Jan KATINS, Nikita KNIAZEV, Federico ARIZA et Elan ERNEST. *Matplotlib/Matplotlib v3.1.0*. Zenodo. Mai 2019. DOI : [10.5281/zenodo.2893252](https://doi.org/10.5281/zenodo.2893252) (cf. p. 26).
- [CL11] Chih-Chung CHANG et Chih-Jen LIN. “LIBSVM : A Library for Support Vector Machines”. In : *ACM Trans. Intell. Syst. Technol.* 2.3 (mai 2011), 27 :1-27 :27. ISSN : 2157-6904. DOI : [10.1145/1961189.1961199](https://doi.org/10.1145/1961189.1961199) (cf. p. 187).
- [CSZ10] Olivier CHAPELLE, Bernhard SCHÖLKOPF et Alexander ZIEN, éd. *Semi-supervised learning*. Adaptive computation and machine learning series. OCLC : 845655904. Cambridge, Mass. [u.a.] : MIT Press, 2010. ISBN : 978-0-262-03358-9 (cf. p. 81).
- [CPS06] Kumar CHELLAPILLA, Sidd PURI et Patrice SIMARD. “High Performance Convolutional Neural Networks for Document Processing”. In : (oct. 2006). HAL : [inria-00112631](https://hal.inria.fr/inria-00112631) (cf. p. 191).
- [Che02] Xi CHEN. “A Study on Profile Setting of Injection Molding”. Thèse de doct. Hong-Kong : Hong Kong University of Science et Technology, août 2002 (cf. p. 166, 174).
- [CSW91] Cheng-Ping CHIU, Laming-Chang SHIH et Jong-Hwei WEI. “Dynamic Modeling of the Mold Filling Process in an Injection Molding Machine”. In : *Polymer Engineering & Science* 31.19 (oct. 1991), p. 1417-1425. ISSN : 1548-2634. DOI : [10.1002/pen.760311908](https://doi.org/10.1002/pen.760311908) (cf. p. 15, 166).
- [Cho16] François CHOLLET. “Xception : Deep Learning with Depthwise Separable Convolutions”. In : *arXiv :1610.02357 [cs]* (oct. 2016). arXiv : [1610.02357 \[cs\]](https://arxiv.org/abs/1610.02357) (cf. p. 193).
- [Cir+11] Dan C. CIREŞAN, Ueli MEIER, Jonathan MASCI, Luca M. GAMBARDELLA et Jürgen SCHMIDHUBER. “Flexible, High Performance Convolutional Neural Networks for Image Classification”. In : *Proceedings of the Twenty-Second International Joint Conference on Artificial Intelligence - Volume Volume Two*. IJCAI’11. event-place : Barcelona, Catalonia, Spain. AAAI Press, 2011, p. 1237-1242. ISBN : 978-1-57735-514-4. DOI : [10.5591/978-1-57735-516-8/IJCAI11-210](https://doi.org/10.5591/978-1-57735-516-8/IJCAI11-210) (cf. p. 191).
- [CUH15] Djork-Arné CLEVERT, Thomas UNTERTHINER et Sepp HOCHREITER. “Fast and Accurate Deep Network Learning by Exponential Linear Units (ELUs)”. In : *arXiv :1511.07289 [cs]* (nov. 2015). arXiv : [1511.07289 \[cs\]](https://arxiv.org/abs/1511.07289) (cf. p. 194).

-
- [Col18] Jean COLLOMB. “Optimisation du processus de dimensionnement thermomécanique de Moule Autonome à Transfert Thermique Efficace pour la transformation rapide des matériaux composites à renforts continus”. Thèse de doct. Communauté Université Grenoble Alpes, 2018, p. 214. HAL : [tel-02022616](#) (cf. p. 36).
- [CV95] Corinna CORTES et Vladimir Naumovitch VAPNIK. “Support-Vector Networks”. In : *Machine Learning* 20.3 (sept. 1995), p. 273-297. ISSN : 1573-0565. DOI : [10/cv7fn6](#) (cf. p. 186).
- [CH67] T. COVER et P. HART. “Nearest Neighbor Pattern Classification”. In : *IEEE Transactions on Information Theory* 13.1 (jan. 1967), p. 21-27. ISSN : 0018-9448. DOI : [10/dn5msp](#) (cf. p. 187).
- [Deb+00] Paul DEBEVEC, Tim HAWKINS, Chris TCHOU, Haarm-Pieter DUIKER, Westley SAROKIN et Mark SAGAR. “Acquiring the Reflectance Field of a Human Face”. In : *Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. SIGGRAPH '00. New York, NY, USA : ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 2000, p. 145-156. ISBN : 978-1-58113-208-3. DOI : [10/d329r5](#) (cf. p. 45, 46).
- [Del+00a] Didier DELAUNAY, Philippe LE BOT, René FULCHIRON, Jean-François LUYÉ et Gilles RÉGNIER. “Nature of Contact between Polymer and Mold in Injection Molding. Part I : Influence of a Non-Perfect Thermal Contact”. In : *Polymer Engineering & Science* 40.7 (juil. 2000), p. 1682-1691. ISSN : 1548-2634. DOI : [10/dshfg7](#) (cf. p. 16).
- [Del+00b] Didier DELAUNAY, Philippe LE BOT, René FULCHIRON, Jean-François LUYÉ et Gilles RÉGNIER. “Nature of Contact between Polymer and Mold in Injection Molding. Part II : Influence of Mold Deflection on Pressure History and Shrinkage”. In : *Polymer Engineering & Science* 40.7 (juil. 2000), p. 1692-1700. ISSN : 1548-2634. DOI : [10.1002/pen.11301](#) (cf. p. 16).
- [Dem82] William Edwards DEMING. *Quality, Productivity, and Competitive Position*. 04180. Cambridge, MA : Massachusetts Institute of Technology, Center for Advanced Engineering Study, 1982 (cf. p. 10).
- [DCG97] Hamdi H. DEMIRCI, John P. COULTER et Selçuk I. GÜÇERİ. “A Numerical and Experimental Investigation of Neural Network-Based Intelligent Control of Molding Processes”. In : *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 119.1 (fév. 1997), p. 88-94. ISSN : 1087-1357. DOI : [10.1115/1.2836559](#) (cf. p. 166, 171).
- [Den+09] J. DENG, W. DONG, R. SOCHER, L. LI, Kai LI et Li FEI-FEI. “ImageNet : A large-scale hierarchical image database”. In : *2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Juin 2009, p. 248-255. DOI : [10.1109/CVPR.2009.5206848](#) (cf. p. 80, 191).
- [DVA95] Olivier DENIZART, Michel VINCENT et Jean-François AGASSANT. “Thermal Stresses and Strains in Injection Moulding : Experiments and Computations”. In : *Journal of Materials Science* 30.2 (jan. 1995), p. 552-560. ISSN : 1573-4803. DOI : [10.1007/BF00354424](#) (cf. p. 45).
- [Des15a] Simon-Frédéric DESAGE. “Constraints and Opportunities for Automation of Visual Inspection with Regard to the Human Process”. Thèse de doct. Université Grenoble Alpes, nov. 2015. HAL : [tel-01254349](#) (cf. p. 30).
- [Des15b] Simon-Frédéric DESAGE. “Contraintes et opportunités pour l’automatisation de l’inspection visuelle au regard du processus humain”. Thèse de doct. Université Grenoble Alpes, nov. 2015 (cf. p. 76).
- [Dés+14] Simon-Frédéric DÉPAGE, Gilles PITARD, Maurice PILLET, Hugues FAVRELIÈRE, Fabrice FRELIN, Serge SAMPER et Gaëtan LE GOÏC. “Visual Quality Inspection and Fine Anomalies : Methods and Application”. In : *IFIP Advances in Information and Communication Technology* 435 (nov. 2014), p. 94-106. HAL : [hal-01260893](#) (cf. p. 63).
- [Des+15] Simon-Frédéric DESAGE, Gilles PITARD, Maurice PILLET, Hugues FAVRELIÈRE, Jean Luc MAIRE, Fabrice FRELIN, Serge SAMPER et Gaëtan LE GOÏC. “Syntactic Texture and Perception for a New Generic Visual Anomalies Classification.” In : *The International Conference on Quality Control by Artificial Vision 2015*. T. 9534. Le Creusot, France, juin 2015. HAL : [hal-01246517](#) (cf. p. 30).
-

- [Dev90] Pierre DEVOS. “Contribution à l’optimisation de la conduite d’une presse à injecter les polymères thermoplastiques”. Thèse de doct. Université des Sciences et Techniques de Lille - Flandres - Artois : Université des Sciences et Techniques de Lille - Flandres - Artois, juil. 1990 (cf. p. 166, 170).
- [Dir19] DIRECTION GÉNÉRALE DES ENTREPRISES. *Chiffres clés de l’industrie manufacturière, Édition 2018*. Étude économique ISSN : 2492-7090. Ivry-sur-Seine, France : Ministère de l’Économie et des Finances, 2019, p. 8 (cf. p. 19, 178).
- [Doe16] Carl DOERSCH. “Tutorial on Variational Autoencoders”. In : *arXiv :1606.05908 [cs, stat]* (juin 2016). arXiv : [1606.05908](https://arxiv.org/abs/1606.05908) [cs, stat] (cf. p. 100, 101).
- [DSH15] Tobias DOMHAN, Jost Tobias SPRINGENBERG et Frank HUTTER. “Speeding Up Automatic Hyperparameter Optimization of Deep Neural Networks by Extrapolation of Learning Curves”. In : *Proceedings of the 24th International Conference on Artificial Intelligence. IJCAI’15*. AAAI Press, 2015, p. 3460-3468. ISBN : 978-1-57735-738-4 (cf. p. 110).
- [DML11] Wei DONG, Charikar MOSES et Kai LI. “Efficient K-Nearest Neighbor Graph Construction for Generic Similarity Measures”. In : *Proceedings of the 20th International Conference on World Wide Web. WWW ’11*. New York, NY, USA : ACM, 2011, p. 577-586. ISBN : 978-1-4503-0632-4. DOI : [10/dh93jt](https://doi.org/10.1145/1953000.1953001) (cf. p. 98).
- [Dua+18] Yueqi DUAN, Wenzhao ZHENG, Xudong LIN, Jiwen LU et Jie ZHOU. “Deep Adversarial Metric Learning”. In : 2018, p. 2780-2789 (cf. p. 87).
- [DV16] Vincent DUMOULIN et Francesco VISIN. “A Guide to Convolution Arithmetic for Deep Learning”. In : *arXiv :1603.07285 [cs, stat]* (mar. 2016). arXiv : [1603.07285](https://arxiv.org/abs/1603.07285) [cs, stat] (cf. p. 79).
- [Dur17] Thibaut DURAND. “Weakly supervised learning for visual recognition”. Thèse de doct. Université Pierre et Marie Curie, sept. 2017 (cf. p. 81).
- [Ega79] Bo EGARDT. *Stability of Adaptive Controllers*. Sous la dir. de M. THOMA et A. V. BALAKRISHNAN. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 1979. ISBN : 978-0-387-09646-9 (cf. p. 170).
- [EMH18] Thomas ELSKEN, Jan Hendrik METZEN et Frank HUTTER. “Neural Architecture Search : A Survey”. In : *arXiv :1808.05377 [cs, stat]* (août 2018). arXiv : [1808.05377](https://arxiv.org/abs/1808.05377) [cs, stat] (cf. p. 112).
- [Ere+09] Gonen EREN, Olivier AUBRETON, Fabrice MERIAUDEAU, L. A. Sanchez SECADES, David FOFI, A. Teoman NASKALI, Frederic TRUCHETET et Aytul ERCIL. “Scanning from Heating : 3D Shape Estimation of Transparent Objects from Local Surface Heating”. In : *Optics Express* 17.14 (juil. 2009), p. 11457-11468. ISSN : 1094-4087. DOI : [10.1364/OE.17.011457](https://doi.org/10.1364/OE.17.011457) (cf. p. 39).
- [Est+96] Martin ESTER, Hans-Peter KRIEGEL, Jörg SANDER et Xiaowei XU. “A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters a Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise”. In : *Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. KDD’96*. AAAI Press, 1996, p. 226-231 (cf. p. 89).
- [FKH17] Stefan FALKNER, Aaron KLEIN et Frank HUTTER. “Combining Hyperband and Bayesian Optimization”. In : *NIPS 2017 Bayesian Optimization Workshop (Dec 2017)*. Long Beach, USA, déc. 2017 (cf. p. 110).
- [FKH18] Stefan FALKNER, Aaron KLEIN et Frank HUTTER. “BOHB : Robust and Efficient Hyperparameter Optimization at Scale”. In : *arXiv :1807.01774 [cs, stat]* (juil. 2018). arXiv : [1807.01774](https://arxiv.org/abs/1807.01774) [cs, stat] (cf. p. 110).
- [Fan+08] Rong-En FAN, Kai-Wei CHANG, Cho-Jui HSIEH, Xiang-Rui WANG et Chih-Jen LIN. “LIBLINEAR : A Library for Large Linear Classification”. In : *J. Mach. Learn. Res.* 9 (juin 2008), p. 1871-1874. ISSN : 1532-4435 (cf. p. 187).
- [Fav09] Hugues FAVRELIÈRE. “Modal Tolerancing : From Metrology to Specifications”. In : (oct. 2009) (cf. p. 56).

- [FMK13] Ng Chin FEI, Nik Mizamzul MEHAT et Shahrul KAMARUDDIN. “Practical Applications of Taguchi Method for Optimization of Processing Parameters for Plastic Injection Moulding : A Retrospective Review”. In : *International Scholarly Research Notices* 2013 (juin 2013), e462174. ISSN : , DOI : [10.1155/2013/462174](https://doi.org/10.1155/2013/462174) (cf. p. 16, 166).
- [Feu+15] Matthias FEURER, Aaron KLEIN, Katharina EGGENSBERGER, Jost SPRINGENBERG, Manuel BLUM et Frank HUTTER. “Efficient and Robust Automated Machine Learning”. In : *Advances in Neural Information Processing Systems* 28. Sous la dir. de C. CORTES, N. D. LAWRENCE, D. D. LEE, M. SUGIYAMA et R. GARNETT. Curran Associates, Inc., 2015, p. 2962-2970 (cf. p. 107, 108).
- [FSH15] Matthias FEURER, Jost Tobias SPRINGENBERG et Frank HUTTER. “Initializing Bayesian Hyperparameter Optimization via Meta-Learning”. In : *Twenty-Ninth AAAI Conference on Artificial Intelligence*. Fév. 2015 (cf. p. 107).
- [Fie00] Roy Thomas FIELDING. “Architectural Styles and the Design of Network-Based Software Architectures”. Thèse de doct. University of California, Irvine, USA, 2000 (cf. p. 121).
- [Fis74] Ronald Aylmer FISHER. *The Design of Experiments*. OCLC : 924773451. New York, 1974. ISBN : 978-0-02-844690-5 (cf. p. 34).
- [FH51] Evelyn FIX et Jr HODGES. *Discriminatory Analysis - Nonparametric Discrimination : Consistency Properties*. Rapp. tech. CALIFORNIA UNIV BERKELEY, fév. 1951 (cf. p. 187).
- [Fou+06] Jean-Étienne FOURNIER, Nicolas HAVARD, Marie-France LACRAMPE, Marc RYCKEBUSCH et Patricia KRAWCZAK. “Conduite Adaptative Du Procédé d’injection Des Thermoplastiques”. In : *Techniques de l’ingénieur Procédés d’injection des thermoplastiques* base documentaire : TIB151DUO.ref. article : in53 (avr. 2006) (cf. p. 19, 166, 175).
- [Fri01] Jerome H. FRIEDMAN. “Greedy Function Approximation : A Gradient Boosting Machine”. In : *The Annals of Statistics* 29.5 (oct. 2001), p. 1189-1232. ISSN : 0090-5364, 2168-8966. DOI : [10.1214/aos/1013203451](https://doi.org/10.1214/aos/1013203451) (cf. p. 189).
- [Fri02] Jerome H. FRIEDMAN. “Stochastic Gradient Boosting”. In : *Computational Statistics & Data Analysis. Nonlinear Methods and Data Mining* 38.4 (fév. 2002), p. 367-378. ISSN : 0167-9473. DOI : [10.1016/S0167-9473\(01\)00065-2](https://doi.org/10.1016/S0167-9473(01)00065-2) (cf. p. 189).
- [Fuk80] Kunihiko FUKUSHIMA. “Neocognitron : A Self-Organizing Neural Network Model for a Mechanism of Pattern Recognition Unaffected by Shift in Position”. In : *Biological Cybernetics* 36.4 (avr. 1980), p. 193-202. ISSN : 1432-0770. DOI : [10/fhrjvv](https://doi.org/10/fhrjvv) (cf. p. 189).
- [GR09] Andrzej GALESKI et Gilles RÉGNIER. “Nano- and Micromechanics of Crystalline Polymers”. In : *Nano- and Micromechanics of Polymer Blends and Composites*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, mai 2009, p. 1-58. ISBN : 978-3-446-41323-8 (cf. p. 15, 37).
- [Gal+87] Patrick GALLINARI, Yann LECUN, Sylvie THIRIA et Françoise SOULIÉ-FOGELMAN. “Mémoires associatives distribuées : Une comparaison (Distributed associative memories : A comparison)”. In : *Proceedings of COGNITIVA 87, Paris, La Villette, May 1987* (1987) (cf. p. 99).
- [GTW08] Yuehua GAO, Lih-Sheng TURNG et Xicheng WANG. “Adaptive Geometry and Process Optimization for Injection Molding Using the Kriging Surrogate Model Trained by Numerical Simulation”. In : *Advances in Polymer Technology* 27.1 (mar. 2008), p. 1-16. ISSN : 1098-2329. DOI : [10.1002/adv.20116](https://doi.org/10.1002/adv.20116) (cf. p. 15).
- [Gar+14] Sergio GARRIDO-JURADO, Rafael MUÑOZ-SALINAS, Francisco José MADRID-CUEVAS et Manuel J. MARÍN-JIMÉNEZ. “Automatic Generation and Detection of Highly Reliable Fiducial Markers under Occlusion”. In : *Pattern Recognition* 47.6 (juin 2014), p. 2280-2292. ISSN : 0031-3203. DOI : [10.1016/j.patcog.2014.01.005](https://doi.org/10.1016/j.patcog.2014.01.005) (cf. p. 48).
- [Gar+16] Sergio GARRIDO-JURADO, Rafael MUÑOZ-SALINAS, Francisco José MADRID-CUEVAS et Rafael MEDINA-CARNICER. “Generation of Fiducial Marker Dictionaries Using Mixed Integer Linear Programming”. In : *Pattern Recognition* 51 (mar. 2016), p. 481-491. ISSN : 0031-3203. DOI : [10.1016/j.patcog.2015.09.023](https://doi.org/10.1016/j.patcog.2015.09.023) (cf. p. 48).

- [Gen+18] L. GENDRE, S. BAZEILLE, L. BIGUÉ et C. CUDEL. “Interest of Polarimetric Refocused Images Calibrated in Depth for Control by Vision”. In : *Unconventional Optical Imaging*. T. 10677. International Society for Optics and Photonics, mai 2018, 106771W. DOI : [10.1117/12.2306939](https://doi.org/10.1117/12.2306939) (cf. p. 48).
- [GFB11] Luc GENDRE, Alban FOULONNEAU et Laurent BIGUE. “Full Stokes Polarimetric Imaging Using a Single Ferroelectric Liquid Crystal Device”. In : *Optical Engineering* 50.8 (2011), p. 1-9. DOI : [10/fg4bfk](https://doi.org/10/fg4bfk). HAL : [hal-00851931](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00851931) (cf. p. 47).
- [Gho+07] Abhijeet GHOSH, Shruthi ACHUTHA, Wolfgang HEIDRICH et Matthew O’TOOLE. “BRDF Acquisition with Basis Illumination”. In : *2007 IEEE 11th International Conference on Computer Vision*. Oct. 2007, p. 1-8. DOI : [10.1109/ICCV.2007.4408935](https://doi.org/10.1109/ICCV.2007.4408935) (cf. p. 63).
- [Gij+19] Pieter GIJSBERS, Erin LEDELL, Janek THOMAS, Sébastien POIRIER, Bernd BISCHL et Joaquin VANSCHOREN. “An Open Source AutoML Benchmark”. In : *arXiv :1907.00909 [cs, stat]* (juil. 2019). arXiv : [1907.00909 \[cs, stat\]](https://arxiv.org/abs/1907.00909) (cf. p. 112).
- [Gir01] Thomas GIROUD. “Mesure et calcul des contraintes résiduelles dans les pièces injectées en thermoplastiques avec et sans fibres de renfort”. Thèse de doct. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, déc. 2001 (cf. p. 23, 37, 174).
- [Goï+16] Gaëtan Le GOÏC, Maxence BIGERELLE, Serge SAMPER, Hugues FAVRELIÈRE et Maurice PILLET. “Multiscale Roughness Analysis of Engineering Surfaces : A Comparison of Methods for the Investigation of Functional Correlations”. In : *Mechanical Systems and Signal Processing* 66-67.Supplement C (jan. 2016), p. 437-457. ISSN : 0888-3270. DOI : [10.1016/j.ymsp.2015.05.029](https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2015.05.029) (cf. p. 56).
- [Goï+11] Gaëtan Le GOÏC, Hugues FAVRELIÈRE, Serge SAMPER et Fabien FORMOSA. “Multi Scale Modal Decomposition of Primary Form, Waviness and Roughness of Surfaces”. In : *Scanning* 33.5 (sept. 2011), p. 332-341. ISSN : 1932-8745. DOI : [10.1002/sca.20253](https://doi.org/10.1002/sca.20253) (cf. p. 56).
- [GPK86] V. G. GOMES, W. I. PATTERSON et M. K. KAMAL. “An Injection Molding Study. Part II : Evaluation of Alternative Control Strategies for Melt Temperature”. In : *Polymer Engineering & Science* 26.12 (juil. 1986), p. 867-876. ISSN : 1548-2634. DOI : [10.1002/pen.760261206](https://doi.org/10.1002/pen.760261206) (cf. p. 166, 170).
- [GBC16] Ian J. GOODFELLOW, Yoshua BENGIO et Aaron COURVILLE. *Deep Learning*. Adaptive Computation and Machine Learning. Cambridge, Massachusetts London, England : MIT Press, 2016. ISBN : 978-0-262-03561-3 (cf. p. 77, 195).
- [Goo+14] Ian J. GOODFELLOW, Jean POUGET-ABADIE, Mehdi MIRZA, Bing XU, David WARDEFARLEY, Sherjil OZAIR, Aaron COURVILLE et Yoshua BENGIO. “Generative Adversarial Networks”. In : *arXiv :1406.2661 [cs, stat]* (juin 2014). arXiv : [1406.2661 \[cs, stat\]](https://arxiv.org/abs/1406.2661) (cf. p. 102).
- [Gre+17] Klaus GREFF, Aaron KLEIN, Martin CHOVANEC, Frank HUTTER et Jürgen SCHMIDHUBER. “The Sacred Infrastructure for Computational Research”. In : *Proceedings of the 15th Python in Science Conference*. 2017, p. 49-56 (cf. p. 105).
- [Gul+17] Ishaan GULRAJANI, Faruk AHMED, Martin ARJOVSKY, Vincent DUMOULIN et Aaron COURVILLE. “Improved Training of Wasserstein GANs”. In : *arXiv :1704.00028 [cs, stat]* (mar. 2017). arXiv : [1704.00028 \[cs, stat\]](https://arxiv.org/abs/1704.00028) (cf. p. 103).
- [GL87] Donald GUSTAFSON et William LEBOW. “Model Predictive Control (MPC) of Injection Molding Machines”. In : *26th IEEE Conference on Decision and Control*. IEEE, déc. 1987, p. 2017-2026. DOI : [10.1109/CDC.1987.272888](https://doi.org/10.1109/CDC.1987.272888) (cf. p. 166, 170).
- [HCL06] Raia HADSELL, Sumit CHOPRA et Yann LECUN. “Dimensionality Reduction by Learning an Invariant Mapping”. In : *2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition - Volume 2 (CVPR’06)*. T. 2. New York, NY, USA : IEEE, 2006, p. 1735-1742. ISBN : 978-0-7695-2597-6. DOI : [10.1109/CVPR.2006.100](https://doi.org/10.1109/CVPR.2006.100) (cf. p. 82).
- [HW93] J. HAEUSSLER et J. WORTBERG. “Quality Assurance in Injection Molding with Neural Networks”. In : *Conference Proceedings*. T. 1. NEW ORLEANS : Society of Plastics Engineers, mai 1993, p. 123-129 (cf. p. 166, 174).
- [HK93] Pat HANRAHAN et Wolfgang KRÜGER. “Reflection from Layered Surfaces Due to Subsurface Scattering”. In : *SIGGRAPH*. 1993. DOI : [10/b4tw3j](https://doi.org/10/b4tw3j) (cf. p. 45).

-
- [HSD73] R. M. HARALICK, K. Sam SHANMUGAM et Its'hak DINSTEIN. "Textural Features for Image Classification". In : *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* SMC-3.6 (nov. 1973), p. 610-621. ISSN : 0018-9472. DOI : [10.1109/TSMC.1973.4309314](https://doi.org/10.1109/TSMC.1973.4309314) (cf. p. 55, 60).
- [He+15a] Kaiming HE, Xiangyu ZHANG, Shaoqing REN et Jian SUN. "Deep Residual Learning for Image Recognition". In : *arXiv :1512.03385 [cs]* (déc. 2015). arXiv : [1512.03385](https://arxiv.org/abs/1512.03385) (cf. p. 191, 192).
- [He+15b] Kaiming HE, Xiangyu ZHANG, Shaoqing REN et Jian SUN. "Delving Deep into Rectifiers : Surpassing Human-Level Performance on ImageNet Classification". In : *arXiv :1502.01852 [cs]* (fév. 2015). arXiv : [1502.01852 \[cs\]](https://arxiv.org/abs/1502.01852) (cf. p. 194).
- [He+16] Kaiming HE, Xiangyu ZHANG, Shaoqing REN et Jian SUN. "Identity Mappings in Deep Residual Networks". In : *arXiv :1603.05027 [cs]* (mar. 2016). arXiv : [1603.05027 \[cs\]](https://arxiv.org/abs/1603.05027) (cf. p. 192).
- [HBL17] Alexander HERMANS, Lucas BEYER et Bastian LEIBE. "In Defense of the Triplet Loss for Person Re-Identification". In : *arXiv :1703.07737 [cs]* (mar. 2017). arXiv : [1703.07737](https://arxiv.org/abs/1703.07737) (cf. p. 87).
- [HMA19] Thomas HERRMANN, Cyrille MIGNIOT et Olivier AUBRETON. "Cracks Detection on Glass Object Based on Active Thermography Approach". In : *Fourteenth International Conference on Quality Control by Artificial Vision*. T. 11172. International Society for Optics and Photonics, juil. 2019, 111721E. DOI : [10/gf8qfn](https://doi.org/10/gf8qfn) (cf. p. 39).
- [HR03] Geoffrey E HINTON et Sam T. ROWEIS. "Stochastic Neighbor Embedding". In : *Advances in Neural Information Processing Systems 15*. Sous la dir. de S. BECKER, S. THRUN et K. OBERMAYER. Vancouver, British Columbia, Canada : MIT Press, 2003, p. 857-864 (cf. p. 96).
- [Ho95] Tin Kam HO. "Random Decision Forests". In : *Proceedings of the Third International Conference on Document Analysis and Recognition (Volume 1) - Volume 1*. ICDAR '95. Washington, DC, USA : IEEE Computer Society, 1995, p. 278-. ISBN : 978-0-8186-7128-9 (cf. p. 188).
- [Ho98] Tin Kam HO. "The Random Subspace Method for Constructing Decision Forests". In : *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 20.8 (août 1998), p. 832-844. ISSN : 0162-8828. DOI : [10/bn3jyv](https://doi.org/10/bn3jyv) (cf. p. 188).
- [Hoc+01] Sepp HOCHREITER, Yoshua BENGIO, Paolo FRASCONI et Jürgen SCHMIDHUBER. *Gradient Flow in Recurrent Nets : the Difficulty of Learning Long-Term Dependencies*. 2001 (cf. p. 79).
- [Hot33] Harold HOTELLING. "Analysis of a Complex of Statistical Variables into Principal Components". In : *Journal of Educational Psychology* 24.6 (1933), p. 417-441. ISSN : 1939-2176(Electronic),0022-0663(Print). DOI : [10/fb5435](https://doi.org/10/fb5435) (cf. p. 90, 172).
- [How+17] Andrew G. HOWARD, Menglong ZHU, Bo CHEN, Dmitry KALENICHENKO, Weijun WANG, Tobias WEYAND, Marco ANDREETTO et Hartwig ADAM. "MobileNets : Efficient Convolutional Neural Networks for Mobile Vision Applications". In : *arXiv :1704.04861 [cs]* (avr. 2017). arXiv : [1704.04861 \[cs\]](https://arxiv.org/abs/1704.04861) (cf. p. 193).
- [Hua+16] Gao HUANG, Zhuang LIU, Laurens van der MAATEN et Kilian Q. WEINBERGER. "Densely Connected Convolutional Networks". In : *arXiv :1608.06993 [cs]* (août 2016). arXiv : [1608.06993](https://arxiv.org/abs/1608.06993) (cf. p. 122, 192).
- [HL00] S.-J. HUANG et T.-H. LEE. "Fuzzy Logic Controller for a Retrofitted Closed-Loop Injection Moulding Machine". In : *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I : Journal of Systems and Control Engineering* 214.1 (fév. 2000), p. 9-22. ISSN : 0959-6518, 2041-3041. DOI : [10.1243/0959651001540483](https://doi.org/10.1243/0959651001540483) (cf. p. 166, 170).
- [Hun07] John D. HUNTER. "Matplotlib : A 2D Graphics Environment". In : *Computing in Science Engineering* 9.3 (mai 2007), p. 90-95. DOI : [10/drbjhg](https://doi.org/10/drbjhg) (cf. p. 26).
- [HHL11] Frank HUTTER, Holger H. HOOS et Kevin LEYTON-BROWN. "Sequential Model-Based Optimization for General Algorithm Configuration". In : *Proceedings of the 5th International Conference on Learning and Intelligent Optimization*. LION'05. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2011, p. 507-523. ISBN : 978-3-642-25565-6. DOI : [10/fb9tjc](https://doi.org/10/fb9tjc) (cf. p. 107).
-

- [HHL14] Frank HUTTER, Holger HOOS et Kevin LEYTON-BROWN. “An Efficient Approach for Assessing Hyperparameter Importance”. In : *Proceedings of the 31st International Conference on International Conference on Machine Learning - Volume 32. ICML’14. JMLR.org*, 2014, p. I-754-I-762 (cf. p. 110).
- [IS15] Sergey IOFFE et Christian SZEGEDY. “Batch Normalization : Accelerating Deep Network Training by Reducing Internal Covariate Shift”. In : *arXiv :1502.03167 [cs]* (fév. 2015). arXiv : [1502.03167 \[cs\]](https://arxiv.org/abs/1502.03167) (cf. p. 195).
- [Iqb18] Haris IQBAL. *HarisIqbal88/PlotNeuralNet v1.0.0*. Zenodo. Déc. 2018. DOI : [10 . 5281 / zenodo . 2526396](https://doi.org/10.5281/zenodo.2526396) (cf. p. 192).
- [ISO15] ISO/TC 176. *ISO 9000 :2015 : Quality Management Systems – Fundamentals and Vocabulary*. Standard ISO 9000 :2015. Geneva, Switzerland : International Organization for Standardization / International Organization for Standardization, sept. 2015, p. 51 (cf. p. 10).
- [ISO18] ISO/TC 261. *ISO 20457 :2018 : Plastics moulded parts – Tolerances and acceptance conditions*. Standard ISO 20457 :2018(E). Geneva, Switzerland : International Organization for Standardization / International Organization for Standardization, sept. 2018, p. 28 (cf. p. 21, 172).
- [IDK98] Robert IVESTER, Kourosh DANAI et David Owen KAZMER. “Automatic Tuning of Injection Molding by the Virtual Search Method”. In : *The Journal of injection molding technology 2.3* (1998), p. 103-108. ISSN : 1533-905X (cf. p. 166, 175).
- [JT15] Kevin JAMIESON et Ameet TALWALKAR. “Non-Stochastic Best Arm Identification and Hyperparameter Optimization”. In : *arXiv :1502.07943 [cs, stat]* (fév. 2015). arXiv : [1502 . 07943 \[cs, stat\]](https://arxiv.org/abs/1502.07943) (cf. p. 109).
- [Jan92] Tzy-Cherng JAN. “Expert System for the Injection Molding of Engineering Thermoplastics”. Thèse de doct. Newark, NJ, USA : New Jersey Institute of Technology, oct. 1992 (cf. p. 168).
- [JS02] Nathalie JAPKOWICZ et Shaju STEPHEN. “The class imbalance problem : A systematic study”. In : *Intelligent Data Analysis 6.5* (jan. 2002), p. 429-449. ISSN : 1088-467X. DOI : [10 . 3233 / IDA-2002-6504](https://doi.org/10.3233/IDA-2002-6504) (cf. p. 182).
- [JSH18] Haifeng JIN, Qingquan SONG et Xia HU. “Auto-Keras : An Efficient Neural Architecture Search System”. In : *arXiv :1806.10282 [cs, stat]* (juin 2018). eprinttype : arxiv eprintclass : cs.LG, cs.AI, stat.ML eprint : [http ://arxiv.org/abs/1806.10282](http://arxiv.org/abs/1806.10282). arXiv : [1806 . 10282 \[cs, stat\]](https://arxiv.org/abs/1806.10282) (cf. p. 111).
- [Joh+15] Stephen JOHNSTON, Christopher MCCREADY, Daniel HAZEN, Darin VANDERWALKER et David Owen KAZMER. “On-Line Multivariate Optimization of Injection Molding”. In : *Polymer Engineering & Science 55.12* (déc. 2015), p. 2743-2750. ISSN : 00323888. DOI : [10 . 1002 / pen . 24163](https://doi.org/10.1002/pen.24163) (cf. p. 166, 176).
- [Jon01] Donald R. JONES. “A Taxonomy of Global Optimization Methods Based on Response Surfaces”. In : *Journal of Global Optimization 21.4* (déc. 2001), p. 345-383. ISSN : 1573-2916. DOI : [10 / c229dg](https://doi.org/10/c229dg) (cf. p. 106).
- [JSW98] Donald R. JONES, Matthias SCHONLAU et William J. WELCH. “Efficient Global Optimization of Expensive Black-Box Functions”. In : *Journal of Global Optimization 13.4* (déc. 1998), p. 455-492. ISSN : 1573-2916. DOI : [10 / fg68nc](https://doi.org/10/fg68nc) (cf. p. 107).
- [Kam+87] M. R. KAMAL, W. I. PATTERSON, N. CONLEY, Deeb ABU FARA et G. LOHFINK. “Dynamics and Control of Pressure in the Injection Molding of Thermoplastics”. In : *Polymer Engineering & Science 27.18* (oct. 1987), p. 1403-1410. ISSN : 1548-2634. DOI : [10 . 1002 / pen . 760271809](https://doi.org/10.1002/pen.760271809) (cf. p. 166, 169).
- [KPG86] M. R. KAMAL, W. I. PATTERSON et V. G. GOMES. “An Injection Molding Study. Part I : Melt and Barrel Temperature Dynamics”. In : *Polymer Engineering & Science 26.12* (juil. 1986), p. 854-866. ISSN : 1548-2634. DOI : [10 . 1002 / pen . 760261205](https://doi.org/10.1002/pen.760261205) (cf. p. 170).
- [KHS93] Seiji KAMEOKA, Nobuhiro HARAMOTO et Tadamoto SAKAI. “Development of an Expert System for Injection Molding Operations”. In : *Advances in Polymer Technology 12.4* (déc. 1993), p. 403-418. ISSN : 1098-2329. DOI : [10 . 1002 / adv . 1993 . 060120407](https://doi.org/10.1002/adv.1993.060120407) (cf. p. 168).
- [KB95] David Owen KAZMER et P BARKAN. “Dynamic Feed Control : A New Method for Injection Molding of High Quality Plastic Parts”. Thèse de doct. Citeseer, 1995 (cf. p. 166, 169, 170).

-
- [KD01] David Owen KAZMER et Kourosch DANAI. "Control of Polymer Processing". In : *The Mechanical Systems Design Handbook*. Sous la dir. d'Osita NWOKAH et Yildirim HURMUZLU. T. 24. CRC Press, déc. 2001. ISBN : 978-1-4200-3674-9 (cf. p. 173).
- [KH99] David Owen KAZMER et David HATCH. "Towards Controllability of Injection Molding". In : *Journal of Materials Processing and Manufacturing Science* 8 (oct. 1999), p. 127-140. DOI : [10.1106/DAD5-PNGG-U87B-08Y5](https://doi.org/10.1106/DAD5-PNGG-U87B-08Y5) (cf. p. 13).
- [Kaz+10] David Owen KAZMER, Suganya VELUSAMY, Sarah WESTERDALE, Stephen JOHNSTON et Robert X. GAO. "A Comparison of Seven Filling to Packing Switchover Methods for Injection Molding". In : *Polymer Engineering & Science* 50.10 (oct. 2010), p. 2031-2043. ISSN : 1548-2634. DOI : [10.1002/pen.21731](https://doi.org/10.1002/pen.21731) (cf. p. 172).
- [KWH08] David Owen KAZMER, S. WESTERDALE et D. HAZEN. "A Comparison of Statistical Process Control (SPC) and On-Line Multivariate Analyses (MVA) for Injection Molding". In : *International Polymer Processing* 23.5 (nov. 2008), p. 447-458. ISSN : 0930-777X. DOI : [10.3139/217.2192](https://doi.org/10.3139/217.2192) (cf. p. 173).
- [Kea88] Michael KEARNS. "Thoughts on Hypothesis Boosting." In : *Non publiée, Machine Learning class project* (déc. 1988) (cf. p. 189).
- [KB14] Diederik P. KINGMA et Jimmy BA. "Adam : A Method for Stochastic Optimization". In : *arXiv :1412.6980 [cs]* (déc. 2014). arXiv : [1412.6980](https://arxiv.org/abs/1412.6980) (cf. p. 79).
- [KW13] Diederik P. KINGMA et Max WELLING. "Auto-Encoding Variational Bayes". In : *arXiv :1312.6114 [cs, stat]* (déc. 2013). arXiv : [1312.6114 \[cs, stat\]](https://arxiv.org/abs/1312.6114) (cf. p. 100).
- [KW19] Diederik P. KINGMA et Max WELLING. "An Introduction to Variational Autoencoders". In : *arXiv :1906.02691 [cs, stat]* (juin 2019). arXiv : [1906.02691 \[cs, stat\]](https://arxiv.org/abs/1906.02691) (cf. p. 102).
- [Kle+16] Aaron KLEIN, Stefan FALKNER, Simon BARTELS, Philipp HENNIG et Frank HUTTER. "Fast Bayesian Optimization of Machine Learning Hyperparameters on Large Datasets". In : *arXiv :1605.07079 [cs, stat]* (mai 2016). arXiv : [1605.07079 \[cs, stat\]](https://arxiv.org/abs/1605.07079) (cf. p. 110).
- [KZS15] Gregory KOCH, Richard ZEMEL et Ruslan SALAKHUTDINOV. "Siamese Neural Networks for One-Shot Image Recognition". In : *ICML Deep Learning Workshop*. T. 2. Lille, France, juil. 2015 (cf. p. 82).
- [Koh95] Ron KOHAVI. "A Study of Cross-Validation and Bootstrap for Accuracy Estimation and Model Selection". In : *Proceedings of the 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence - Volume 2*. IJCAI'95. San Francisco, CA, USA : Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1995, p. 1137-1143. ISBN : 978-1-55860-363-9 (cf. p. 185).
- [Kc17] Raghavendra KOTIKALAPUDI et CONTRIBUTORS. *Keras-Vis*. 05109 title={keras-vis}. 2017 (cf. p. 130).
- [Kri51] Danie G. KRIGE. "A Statistical Approach to Some Mine Valuation and Allied Problems on the Witwatersrand". Master Thesis. Johannesburg, South Africa : University of the Witwatersrand, 1951 (cf. p. 107).
- [Kri09] Alex KRIZHEVSKY. *Learning Multiple Layers of Features from Tiny Images*. Technical. University of Toronto, 2009 (cf. p. 111, 114).
- [KSH12] Alex KRIZHEVSKY, Ilya SUTSKEVER et Geoffrey E. HINTON. "ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks". In : *Proceedings of the 25th International Conference on Neural Information Processing Systems - Volume 1*. NIPS'12. event-place : Lake Tahoe, Nevada. USA : Curran Associates Inc., 2012, p. 1097-1105 (cf. p. 191).
- [KH91] Anders KROGH et John A. HERTZ. "A Simple Weight Decay Can Improve Generalization". In : *Proceedings of the 4th International Conference on Neural Information Processing Systems*. NIPS'91. San Francisco, CA, USA : Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1991, p. 950-957. ISBN : 978-1-55860-222-9 (cf. p. 198).
- [KL51] S. KULLBACK et R. A. LEIBLER. "On Information and Sufficiency". In : *The Annals of Mathematical Statistics* 22.1 (mar. 1951), p. 79-86. ISSN : 0003-4851, 2168-8990. DOI : [10.1214/aoms/1177729694](https://doi.org/10.1214/aoms/1177729694) (cf. p. 78).
-

- [Kur+09] Mustafa KURT, O. SABAN KAMBER, Yusuf KAYNAK, Gurcan ATAKOK et Oguz GIRIT. “Experimental Investigation of Plastic Injection Molding : Assessment of the Effects of Cavity Pressure and Mold Temperature on the Quality of the Final Products”. In : *Materials & Design* 30.8 (sept. 2009), p. 3217-3224. ISSN : 0261-3069. DOI : [10.1016/j.matdes.2009.01.004](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.01.004) (cf. p. 20).
- [Lac18] Thomas LACOMBE. “Exploitation d’une information multiéclairages pour une approche générique de l’inspection automatique de la qualité visuelle des produits en industrie.” Thèse de doct. Annecy, France : UGA - Université Grenoble Alpes, sept. 2018. HAL : [tel-01959270](https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01959270) (cf. p. 24, 30, 55, 58, 73, 76, 77).
- [Lac+17] Thomas LACOMBE, Bruno ALBERT, Halise DERELI, Mélanie TOMCZYK, Youva NAIT-YOUCHEF, Jocelyn PHILPPA et Hughes FAVRELIÈRE. “Voir pour Toucher? Caractérisation Optique de la Sensation d’Adhérence”. In : *QUALITA 2017*. Bourges, France, août 2017. HAL : [hal-01587088](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01587088) (cf. p. 63).
- [Lac75] Franck LACZKO. “Controller for Injection Molding Machine”. US 3893792 A (Westwood, Massachusets). Juil. 1975 (cf. p. 166, 169).
- [Lan79] Ioan Doré LANDAU. *Adaptive Control : The Model Reference Approach*. New York, NY, USA : Marcel Dekker, Inc., 1979. ISBN : 978-0-8247-6548-4 (cf. p. 170).
- [Lau+01] H. C. W. LAU, A. NING, K. F. PUN et K. S. CHIN. “Neural Networks for the Dimensional Control of Molded Parts Based on a Reverse Process Model”. In : *Journal of Materials Processing Technology* 117.1–2 (nov. 2001), p. 89-96. ISSN : 0924-0136. DOI : [10.1016/S0924-0136\(01\)01086-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)01086-X) (cf. p. 166, 176).
- [Le 06] Ronan LE GOFF. “Étude et Modélisation Des Transferts Thermiques Lors de La Solidification de Pièces Injectées En Polymère Semi-Cristallin Chargé de Fibres”. Thèse de doct. Nantes, jan. 2006 (cf. p. 15).
- [Le +05] Ronan LE GOFF, Géraldine POUTOT, Didier DELAUNAY, René FULCHIRON et Emmanuelle KOSCHER. “Study and Modeling of Heat Transfer during the Solidification of Semi-Crystalline Polymers”. In : *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48.25 (déc. 2005), p. 5417-5430. ISSN : 0017-9310. DOI : [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.06.015](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.06.015) (cf. p. 15).
- [LeC+89] Yann LECUN, Bernhard E. BOSER, John S. DENKER, Donnie HENDERSON, Richard E. HOWARD, Wayne E. HUBBARD et Lawrence D. JACKEL. “Backpropagation Applied to Handwritten Zip Code Recognition”. In : *Neural Computation* 1.4 (déc. 1989), p. 541-551. ISSN : 0899-7667. DOI : [10.1162/neco.1989.1.4.541](https://doi.org/10.1162/neco.1989.1.4.541) (cf. p. 77, 78).
- [LeC+98] Yann LECUN, Léon BOTTOU, Genevieve B. ORR et Klaus-Robert MÜLLER. “Efficient BackProp”. In : *Neural Networks : Tricks of the Trade, This Book is an Outgrowth of a 1996 NIPS Workshop*. London, UK, UK : Springer-Verlag, 1998. ISBN : 978-3-540-65311-0 (cf. p. 78).
- [LM87] Yann LECUN et Maurice MILGRAM. “Modèles connexionnistes de l’apprentissage”. Thèse de doct. Paris : Université Paris 6, 1987 (cf. p. 99).
- [Leg02] Anne-Claire LEGRAND. “Thermographie Multispectrale Haute et Basse Température : Application Au Contrôle Non Destructif”. Thèse de doct. Dijon, jan. 2002 (cf. p. 39).
- [LY15] Guanbin LI et Yizhou YU. “Visual Saliency Based on Multiscale Deep Features”. In : *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2015, p. 5455-5463 (cf. p. 130).
- [Li+14] L. LI, Z. LI, K. LI, L. BLAREL et M. WENDISCH. “A Method to Calculate Stokes Parameters and Angle of Polarization of Skylight from Polarized CIMEL Sun/Sky Radiometers”. In : *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 149 (déc. 2014), p. 334-346. ISSN : 0022-4073. DOI : [10/gf8zt7](https://doi.org/10/gf8zt7) (cf. p. 50).
- [Li+16] Lisha LI, Kevin JAMIESON, Giulia DESALVO, Afshin ROSTAMIZADEH et Ameet TALWALKAR. “Hyperband : A Novel Bandit-Based Approach to Hyperparameter Optimization”. In : *arXiv :1603.06560 [cs, stat]* (mar. 2016). arXiv : [1603.06560](https://arxiv.org/abs/1603.06560) [cs, stat] (cf. p. 110).

-
- [LCY13] Min LIN, Qiang CHEN et Shuicheng YAN. “Network In Network”. In : *arXiv :1312.4400 [cs]* (déc. 2013). arXiv : [1312.4400 \[cs\]](#) (cf. p. 198).
- [Lin76] Seppo LINNAINMAA. “Taylor Expansion of the Accumulated Rounding Error”. In : *BIT Numerical Mathematics* 16.2 (juin 1976), p. 146-160. ISSN : 1572-9125. DOI : [10/cv4d63](#) (cf. p. 189).
- [LLZ16] Jingxiang LIU, Tao LIU et Jie ZHANG. “Window-Based Stepwise Sequential Phase Partition for Nonlinear Batch Process Monitoring”. In : *Industrial & Engineering Chemistry Research* 55.34 (août 2016), p. 9229-9243. ISSN : 0888-5885. DOI : [10.1021/acs.iecr.6b01257](#) (cf. p. 173).
- [Llo82] Stuart P. LLOYD. “Least Squares Quantization in PCM”. In : *IEEE Transactions on Information Theory* 28.2 (mar. 1982), p. 129-137. ISSN : 0018-9448. DOI : [10.1109/TIT.1982.1056489](#) (cf. p. 88).
- [Lu+04] Ningyun LU, Yi YANG, Furong GAO et Fuli WANG. “Stage-Based Multivariate Statistical Analysis for Injection Molding”. In : *IFAC Proceedings Volumes. 7th International Symposium on Advanced Control of Chemical Processes (ADCHEM 2003)*, Hong-Kong, 11-14 January 2004 37.1 (jan. 2004), p. 439-444. ISSN : 1474-6670. DOI : [10/gf7jxc](#) (cf. p. 166, 172).
- [Ma74] Carl Y. W. MA. “A Design Approach to a Computer-Controlled Injection-Molding Machine”. In : *Polymer Engineering & Science* 14.11 (nov. 1974), p. 768-772. ISSN : 1548-2634. DOI : [10.1002/pen.760141106](#) (cf. p. 13, 16, 17).
- [MHN13] Andrew MAAS, Awni HANNUN et Andrew NG. “Rectifier Nonlinearities Improve Neural Network Acoustic Models”. In : *Proceedings ICML* (juin 2013) (cf. p. 193).
- [Maa14] Laurens van der MAATEN. “Accelerating T-SNE Using Tree-Based Algorithms”. In : *Journal of Machine Learning Research* 15 (2014), p. 3221-3245 (cf. p. 97).
- [Mac67] James MACQUEEN. “Some Methods for Classification and Analysis of Multivariate Observations”. In : *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Volume 1 : Statistics*. The Regents of the University of California, 1967 (cf. p. 88).
- [Mah+18] Dhruv MAHAJAN, Ross GIRSHICK, Vignesh RAMANATHAN, Kaiming HE, Manohar PALURI, Yixuan LI, Ashwin BHARAMBE et Laurens VAN DER MAATEN. “Exploring the Limits of Weakly Supervised Pretraining”. In : *arXiv :1805.00932 [cs]* (mai 2018). arXiv : [1805.00932 \[cs\]](#) (cf. p. 192, 198).
- [Mah36] Prasanta Chandra MAHALANOBIS. “On the Generalised Distance in Statistics”. In : *Proceedings National Institute of Science, India*. T. 2. Avr. 1936, p. 49-55 (cf. p. 73, 77, 84).
- [Mal12] Nada Bou MALHAB. “Moulage par microinjection des polymères semi-cristallins”. Thèse de doct. Paris, France : École Nationale Supérieure d’Arts et Métiers, déc. 2012 (cf. p. 23).
- [Mar+00] Stephen R. MARSCHNER, Stephen H. WESTIN, Eric P. F. LAFORTUNE et Kenneth E. TORRANCE. “Image-Based Bidirectional Reflectance Distribution Function Measurement”. In : *Applied Optics* 39.16 (juin 2000), p. 2592-2600. ISSN : 1539-4522. DOI : [10.1364/AO.39.002592](#) (cf. p. 63).
- [Mas+99] Llew MASON, Jonathan BAXTER, Peter BARTLETT et Marcus FREAN. “Boosting Algorithms As Gradient Descent”. In : *Proceedings of the 12th International Conference on Neural Information Processing Systems. NIPS’99*. Cambridge, MA, USA : MIT Press, 1999, p. 512-518 (cf. p. 189).
- [Mat63] Georges MATHERON. “Principles of Geostatistics”. In : *Economic Geology* 58.8 (déc. 1963), p. 1246-1266. ISSN : 0361-0128. DOI : [10/fdsdjj](#) (cf. p. 106).
- [MP43] Warren S. MCCULLOCH et Walter PITTS. “A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity”. In : *The bulletin of mathematical biophysics* 5.4 (déc. 1943), p. 115-133. ISSN : 1522-9602. DOI : [10/djsbj6](#) (cf. p. 189).
- [MHM18] Leland MCINNES, John HEALY et James MELVILLE. “UMAP : Uniform Manifold Approximation and Projection for Dimension Reduction”. In : *arXiv :1802.03426 [cs, stat]* (fév. 2018). arXiv : [1802.03426 \[cs, stat\]](#) (cf. p. 97).
-

- [McI+18] Leland MCINNES, John HEALY, Nathaniel SAUL et Lukas GROSSBERGER. “UMAP : Uniform Manifold Approximation and Projection”. In : *Journal of Open Source Software* 3.29 (sept. 2018), p. 861. ISSN : 2475-9066. DOI : [10/gf6k3s](https://doi.org/10/gf6k3s) (cf. p. 97).
- [MBC79] M. D. MCKAY, R. J. BECKMAN et W. J. CONOVER. “A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code”. In : *Technometrics* 21.2 (1979), p. 239-245. ISSN : 0040-1706. DOI : [10/bp9p63](https://doi.org/10/bp9p63) (cf. p. 180).
- [Men+03] Rennan MENDOZA, Gilles RÉGNIER, Wilfrid SEILER et Jean-Lou LEBRUN. “Spatial Distribution of Molecular Orientation in Injection Molded iPP : Influence of Processing Conditions”. In : *Polymer* 44.11 (mai 2003), p. 3363-3373. ISSN : 0032-3861. DOI : [10/bdg6zh](https://doi.org/10/bdg6zh) (cf. p. 23).
- [Met78] Charles E. METZ. “Basic principles of ROC analysis”. In : *Seminars in Nuclear Medicine* 8.4 (oct. 1978), p. 283-298. ISSN : 0001-2998 (cf. p. 182).
- [MS09] Walter MICHAELI et Andreas SCHREIBER. “Online Control of the Injection Molding Process Based on Process Variables”. In : *Advances in Polymer Technology* 28.2 (juin 2009), p. 65-76. ISSN : 1098-2329. DOI : [10.1002/adv.20153](https://doi.org/10.1002/adv.20153) (cf. p. 18, 19, 166, 171).
- [Miy+18] Takeru MIYATO, Toshiki KATAOKA, Masanori KOYAMA et Yuichi YOSHIDA. “Spectral Normalization for Generative Adversarial Networks”. In : *arXiv :1802.05957 [cs, stat]* (fév. 2018). arXiv : [1802.05957 \[cs, stat\]](https://arxiv.org/abs/1802.05957) (cf. p. 103).
- [MNB09] Maël MOGUEDET, P. NAMY et Yves BÉREAUX. “Use of Comsol Multiphysics to Understand and Optimize the Filling Phase in Injection and Micro-Injection Molding Process”. In : *Popular Plastics & Packaging* 54.11 (nov. 2009), p. 29-32. ISSN : 09710078 (cf. p. 15).
- [Mos13] Lawrence MOSLEY. “A balanced approach to the multi-class imbalance problem”. In : *Graduate Theses and Dissertations* (jan. 2013). DOI : <https://doi.org/10.31274/etd-180810-3375> (cf. p. 183).
- [Mye71] Raymond H MYERS. *Response Surface Methodology*. OCLC : 655239528. Boston : Allyn and Bacon, 1971 (cf. p. 179).
- [Nag+18] Pierre NAGORNY, Thomas LACOMBE, Hugues FAVRELIÈRE, Maurice PILLET, Éric PAIREL, Ronan LE GOFF, Marlène WALI, Jérôme LOUREAUX et Patrice KIENER. “Generative Adversarial Networks for Geometric Surfaces Prediction in Injection Molding : Performance Analysis with Discrete Modal Decomposition”. In : *2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. Fév. 2018, p. 1514-1519. DOI : [10.1109/ICIT.2018.8352405](https://doi.org/10.1109/ICIT.2018.8352405) (cf. p. 3, 41, 135).
- [Nag+19] Pierre NAGORNY, Thomas LACOMBE, Thomas MULLER, Hugues FAVRELIÈRE, Éric PAIREL et Maurice PILLET. “Polarimetric Imaging for Quality Control in Injection Molding”. In : *Fourteenth International Conference on Quality Control by Artificial Vision*. T. 11172. International Society for Optics and Photonics, juil. 2019, p. 1117217. DOI : [10/gf48kh](https://doi.org/10/gf48kh) (cf. p. 3, 47, 50, 53, 111, 135).
- [NPP17a] Pierre NAGORNY, Éric PAIREL et Maurice PILLET. “Pilotage En Injection Plastique - État de l’Art”. In : *12ème Congrès International de Génie Industriel (CIGI 2017)*. Compiègne, France, mai 2017. HAL : [hal-01551840](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01551840) (cf. p. 3, 135).
- [NPP17b] Pierre NAGORNY, Éric PAIREL et Maurice PILLET. “Vers Un Pilotage de La Qualité Des Pièces Injectées”. In : *arXiv :1707.01765 [Cs]*. Juil. 2017. arXiv : [1707.01765 \[cs\]](https://arxiv.org/abs/1707.01765) (cf. p. 3, 135).
- [NPP19] Pierre NAGORNY, Éric PAIREL et Maurice PILLET. “Dispositif et Procédé de Contrôle de Pièces”. (Annecy, France). Sept. 2019 (cf. p. 118, 135).
- [Nag+17] Pierre NAGORNY, Maurice PILLET, Éric PAIREL, Ronan LE GOFF, Jérôme LOUREAUX, Marlène WALI et Patrice KIENER. “Quality Prediction in Injection Molding”. In : *2017 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Virtual Environments for Measurement Systems and Applications (CIVEMSA)*. Juin 2017, p. 141-146. DOI : [10.1109/CIVEMSA.2017.7995316](https://doi.org/10.1109/CIVEMSA.2017.7995316) (cf. p. 3, 20, 54, 60, 135).

- [NH10] Vinod NAIR et Geoffrey E. HINTON. “Rectified Linear Units Improve Restricted Boltzmann Machines”. In : *Proceedings of the 27th International Conference on International Conference on Machine Learning*. ICML’10. USA : Omnipress, 2010, p. 807-814. ISBN : 978-1-60558-907-7 (cf. p. 193).
- [NKA73] K. NAKAMURA, K. KATAYAMA et T. AMANO. “Some Aspects of Nonisothermal Crystallization of Polymers. II. Consideration of the Isokinetic Condition”. In : *Journal of Applied Polymer Science* 17.4 (1973), p. 1031-1041. ISSN : 1097-4628. DOI : [10 / c2bzlv](https://doi.org/10/c2bzlv) (cf. p. 15).
- [Nak+72] K. NAKAMURA, T. WATANABE, K. KATAYAMA et T. AMANO. “Some Aspects of Nonisothermal Crystallization of Polymers. I. Relationship between Crystallization Temperature, Crystallinity, and Cooling Conditions”. In : *Journal of Applied Polymer Science* 16.5 (1972), p. 1077-1091. ISSN : 1097-4628. DOI : [10/cjk29f](https://doi.org/10/cjk29f) (cf. p. 15).
- [Nas51] John NASH. “Non-Cooperative Games”. In : *Annals of Mathematics* 54.2 (1951), p. 286-295. ISSN : 0003-486X. DOI : [10/dzj4db](https://doi.org/10/dzj4db) (cf. p. 102).
- [Nas50] John F. NASH. “Equilibrium Points in N-Person Games”. In : *Proceedings of the National Academy of Sciences* 36.1 (jan. 1950), p. 48-49. ISSN : 0027-8424, 1091-6490. DOI : [10 / b6hm7s](https://doi.org/10/b6hm7s) (cf. p. 102).
- [NFB97] Shree K. NAYAR, Xi-Sheng FANG et Terrance BOULT. “Separation of Reflection Components Using Color and Polarization”. In : *International Journal of Computer Vision* 21.3 (fév. 1997), p. 163-186. ISSN : 1573-1405. DOI : [10/cp36j8](https://doi.org/10/cp36j8) (cf. p. 46).
- [Nor87] Association Française de NORMALISATION (AFNOR). *NF T58-000*. Standard. AFNOR, oct. 1987 (cf. p. 172).
- [Ode16] Augustus ODENA. “Semi-Supervised Learning with Generative Adversarial Networks”. In : *arXiv :1606.01583 [cs, stat]* (juin 2016). arXiv : [1606.01583 \[cs, stat\]](https://arxiv.org/abs/1606.01583) (cf. p. 103).
- [Ols+16a] Randal S. OLSON, Nathan BARTLEY, Ryan J. URBANOWICZ et Jason H. MOORE. “Evaluation of a Tree-Based Pipeline Optimization Tool for Automating Data Science”. In : *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference 2016*. GECCO ’16. New York, NY, USA : ACM, juil. 2016. ISBN : 978-1-4503-4206-3. DOI : [10.1145/2908812.2908918](https://doi.org/10.1145/2908812.2908918) (cf. p. 111).
- [Ols+16b] Randal S. OLSON, Ryan J. URBANOWICZ, Peter C. ANDREWS, Nicole A. LAVENDER, La Creis KIDD et Jason H. MOORE. “Automating Biomedical Data Science through Tree-Based Pipeline Optimization”. In : *arXiv :1601.07925 [cs]* (jan. 2016). eprinttype : arxiv eprintclass : cs.LG, cs.NE eprint : <http://arxiv.org/abs/1601.07925>. arXiv : [1601.07925 \[cs\]](https://arxiv.org/abs/1601.07925) (cf. p. 111).
- [Oqu+15] Maxime OQUAB, Leon BOTTOU, Ivan LAPTEV et Josef SIVIC. “Is Object Localization for Free ? - Weakly-Supervised Learning With Convolutional Neural Networks”. In : *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2015, p. 685-694 (cf. p. 196, 198).
- [PA88] I. O. PANDELIDIS et A. R. AGRAWAL. “Optimal Anticipatory Control of Ram Velocity in Injection Molding”. In : *Polymer Engineering & Science* 28.3 (fév. 1988), p. 147-156. ISSN : 1548-2634. DOI : [10.1002/pen.760280305](https://doi.org/10.1002/pen.760280305) (cf. p. 170).
- [Pas94] Pierre PASTRÉ. “Le rôle des schèmes et concepts dans la formation des compétences”. In : *Performances humaines et techniques* 71 (1994). 00039, p. 21-28 (cf. p. 167).
- [PS04] Pierre PASTRÉ et R. SAMURÇAY. “Le Rôle Des Concepts Pragmatiques Dans La Gestion Des Situations Problèmes : Le Cas Des Régleurs En Plasturgie”. In : *Recherches En Didactique Professionnelle*. Octarès. 2004, p. 17-49 (cf. p. 167).
- [Pea01] Karl PEARSON. “On Lines and Planes of Closest Fit to Systems of Points in Space”. In : *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 2.11 (nov. 1901), p. 559-572. ISSN : 1941-5982. DOI : [10/dd63n4](https://doi.org/10/dd63n4) (cf. p. 90).

- [Ped+11] Fabian PEDREGOSA, Gaël VAROQUAUX, Alexandre GRAMFORT, Vincent MICHEL, Bertrand THIRION, Olivier GRISEL, Mathieu BLONDEL, Peter PRETTENHOFER, Ron WEISS, Vincent DUBOURG, Jake VANDERPLAS, Alexandre PASSOS, David COURNAPEAU, Matthieu BRUCHER, Matthieu PERROT et Édouard DUCHESNAY. “Scikit-learn : Machine Learning in Python”. In : *Journal of Machine Learning Research* 12 (nov. 2011). ISSN : 1532-4435 (cf. p. 107, 185, 187).
- [PC95] Joseph PEZZANITI Larry et Russell A CHIPMAN. “Mueller matrix imaging polarimetry”. In : *Optical Engineering* 34.6 (juin 1995), p. 1558-1568. ISSN : 0091-3286 (cf. p. 63).
- [PMB03] Maurice PILLET, Jean Luc MAIRE et Vincent BRONET. “Maîtrise Statistique Des Procédés (MSP) - Cas Particulier de l’injection Plastique”. In : oct. 2003 (cf. p. 18, 166, 172, 173).
- [Pit16] Gilles PITARD. “Métrologie et modélisation de l’aspect pour l’inspection qualité des surfaces”. Thèse de doct. Université Grenoble Alpes, mai 2016. HAL : [te1-01357821](https://hal.archives-ouvertes.fr/te1-01357821) (cf. p. 30, 58, 76).
- [PB46] Robin Lewis PLACKETT et John Peter BURMAN. “The Design of Optimum Multifactorial Experiments”. In : *Biometrika* 33.4 (juin 1946), p. 305. ISSN : 00063444. DOI : [10.2307/2332195](https://doi.org/10.2307/2332195) (cf. p. 36, 179, 181).
- [Qué+19] Yvain QUÉAU, Florian LEPORCQ, Alexis LECHERVY et Ayman ALFALOU. “Learning to Classify Materials Using Mueller Imaging Polarimetry”. In : *Fourteenth International Conference on Quality Control by Artificial Vision (QCAV)*. Mulhouse, France, mai 2019. DOI : [10/gf8twj](https://doi.org/10/gf8twj). HAL : [ha1-02088951](https://hal.archives-ouvertes.fr/ha1-02088951) (cf. p. 64).
- [RMC15] Alec RADFORD, Luke METZ et Soumith CHINTALA. “Unsupervised Representation Learning with Deep Convolutional Generative Adversarial Networks”. In : *arXiv :1511.06434 [cs]* (nov. 2015). arXiv : [1511.06434 \[cs\]](https://arxiv.org/abs/1511.06434) (cf. p. 103).
- [RWC16] Sanjeev Jagannatha RAO, Yufei WANG et Garrison W. COTTRELL. “A Deep Siamese Neural Network Learns the Human-Perceived Similarity Structure of Facial Expressions Without Explicit Categories”. In : *CogSci*. 2016 (cf. p. 82).
- [RS94] Gilles RÉGNIER et Bruno SOULIER. “Experimental Designs for an Experimental Modelling of Material or Structural Tests”. In : *Probabilities and Materials : Tests, Models and Applications*. T. 269. NATO Science Series E. Springer Netherlands, 1994, p. 197-208. HAL : [ha1-01634460](https://hal.archives-ouvertes.fr/ha1-01634460) (cf. p. 16).
- [RT93] Gilles RÉGNIER et Jean-Pierre TROTIGNON. “Local Orthotropic Shrinkage Determination in Injected Moulded Polymer Plates”. In : *Polymer Testing* 12.5 (jan. 1993), p. 383-392. ISSN : 0142-9418. DOI : [10/c4mr3b](https://doi.org/10/c4mr3b) (cf. p. 16).
- [RMW14] Danilo Jimenez REZENDE, Shakir MOHAMED et Daan WIERSTRA. “Stochastic Backpropagation and Approximate Inference in Deep Generative Models”. In : *arXiv :1401.4082 [cs, stat]* (jan. 2014). arXiv : [1401.4082 \[cs, stat\]](https://arxiv.org/abs/1401.4082) (cf. p. 100).
- [Ric+09] Jean-François RICHARD, Pierre PASTRÉ, Pierre PARAGE, Emmanuel SANDER, Michel FUTTERSACK et Jean-Marc LABAT. “Analyse des stratégies de correction de défauts en plasturgie à l’aide d’un modèle de résolution de problème à base de contraintes”. In : *Le travail humain* 72.3 (sept. 2009), p. 267-292. ISSN : 1243-1370 (cf. p. 167).
- [Rio+15] Cécile RIOU, Bruno COLICCHIO, Jean-Philippe LAUFFENBURGER, Olivier HAEBERLE et Christophe CUDEL. “Calibration and Disparity Maps for a Depth Camera Based on a Four-Lens Device”. In : *Journal of Electronic Imaging* 24 (2015), p. 1-11. DOI : [10.1117/1.JEI.24.6.061108](https://doi.org/10.1117/1.JEI.24.6.061108). HAL : [ha1-01510301](https://hal.archives-ouvertes.fr/ha1-01510301) (cf. p. 47).
- [RMM18] Francisco J. ROMERO-RAMIREZ, Rafael MUÑOZ-SALINAS et Rafael MEDINA-CARNICER. “Speeded up Detection of Squared Fiducial Markers”. In : *Image and Vision Computing* 76 (août 2018), p. 38-47. ISSN : 0262-8856. DOI : [10.1016/j.imavis.2018.05.004](https://doi.org/10.1016/j.imavis.2018.05.004) (cf. p. 48).
- [RFB15] Olaf RONNEBERGER, Philipp FISCHER et Thomas BROX. “U-Net : Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation”. In : *arXiv :1505.04597 [cs]* Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI) (mai 2015). arXiv : [1505.04597 \[cs\]](https://arxiv.org/abs/1505.04597) (cf. p. 41).

-
- [Ros58] Frank ROSENBLATT. “The Perceptron : A Probabilistic Model for Information Storage and Organization in the Brain”. In : *Psychological Review* 65.6 (1958), p. 386-408. ISSN : 1939-1471(Electronic),0033-295X(Print). DOI : [10/fg6wr5](https://doi.org/10.1037/0033-295X.65.6.386) (cf. p. 189).
- [RHW85] David E. RUMELHART, Geoffrey E. HINTON et Ronald J. WILLIAMS. *Learning Internal Representations by Error Propagation*. Rapp. tech. Sept. 1985 (cf. p. 78, 189).
- [Sad16] Peter SADOWSKI. *Notes on backpropagation*. Rapp. tech. Irvine, CA 92697 : University of California, 2016, p. 1-4 (cf. p. 79).
- [Sal+16] Tim SALIMANS, Ian J. GOODFELLOW, Wojciech ZAREMBA, Vicki CHEUNG, Alec RADFORD et Xi CHEN. “Improved Techniques for Training GANs”. In : *arXiv :1606.03498 [cs]* (juin 2016). arXiv : [1606.03498 \[cs\]](https://arxiv.org/abs/1606.03498) (cf. p. 103).
- [SF07] Serge SAMPER et Fabien FORMOSA. “Form Defects Tolerancing by Natural Modes Analysis”. In : *Journal of Computing and Information Science in Engineering* 7.1 (mar. 2007), p. 44-51. ISSN : 1530-9827. DOI : [10.1115/1.2424247](https://doi.org/10.1115/1.2424247) (cf. p. 56).
- [San+18] Mark SANDLER, Andrew HOWARD, Menglong ZHU, Andrey ZHMOGINOV et Liang-Chieh CHEN. “MobileNetV2 : Inverted Residuals and Linear Bottlenecks”. In : *arXiv :1801.04381 [cs]* (jan. 2018). eprinttype : arxiv eprintclass : cs.CV eprint : <http://arxiv.org/abs/1801.04381>. arXiv : [1801.04381 \[cs\]](https://arxiv.org/abs/1801.04381) (cf. p. 193).
- [San83] Bernard SANSCHAGRIN. “Process Control of Injection Molding”. In : *Polymer Engineering & Science* 23.8 (juin 1983), p. 431-438. ISSN : 1548-2634. DOI : [10.1002/pen.760230804](https://doi.org/10.1002/pen.760230804) (cf. p. 166, 170).
- [Sch90] Robert E. SCHAPIRE. “The Strength of Weak Learnability”. In : *Mach. Learn.* 5.2 (juil. 1990), p. 197-227. ISSN : 0885-6125. DOI : [10.1023/A:1022648800760](https://doi.org/10.1023/A:1022648800760) (cf. p. 189).
- [SMB10] Dominik SCHERER, Andreas MÜLLER et Sven BEHNKE. “Evaluation of Pooling Operations in Convolutional Architectures for Object Recognition”. In : *Artificial Neural Networks – ICANN 2010*. Sous la dir. de Konstantinos DIAMANTARAS, Wlodek DUCH et Lazaros S. ILIADIS. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, 2010, p. 92-101. ISBN : 978-3-642-15825-4 (cf. p. 196).
- [Sch19] Jürgen SCHMIDHUBER. “Unsupervised Minimax : Adversarial Curiosity, Generative Adversarial Networks, and Predictability Minimization”. In : *arXiv :1906.04493 [cs]* (juin 2019). arXiv : [1906.04493 \[cs\]](https://arxiv.org/abs/1906.04493) (cf. p. 102, 103).
- [SM00] Olivier SCHNERR-HÄSELBARTH et Walter MICHAELI. “Automation of Online Quality Control in Injection Moulding”. In : *Macromolecular Materials and Engineering* 284-285.1 (déc. 2000), p. 81-85. ISSN : 1439-2054. DOI : [10.1002/1439-2054\(20001201\)284:1<81::AID-MAME81>3.0.CO;2-Q](https://doi.org/10.1002/1439-2054(20001201)284:1<81::AID-MAME81>3.0.CO;2-Q) (cf. p. 17, 19, 166).
- [Sch+01] Bernhard SCHÖLKOPF, John C. PLATT, John C. SHAWE-TAYLOR, Alex J. SMOLA et Robert C. WILLIAMSON. “Estimating the Support of a High-Dimensional Distribution”. In : *Neural Comput.* 13.7 (juil. 2001), p. 1443-1471. ISSN : 0899-7667. DOI : [10.1162/089976601750264965](https://doi.org/10.1162/089976601750264965) (cf. p. 74).
- [SSM97] Bernhard SCHÖLKOPF, Alexander SMOLA et Klaus-Robert MÜLLER. “Kernel Principal Component Analysis”. In : *Artificial Neural Networks – ICANN’97*. Sous la dir. de Wulfram GERSTNER, Alain GERMOND, Martin HASLER et Jean-Daniel NICOD. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, 1997, p. 583-588. ISBN : 978-3-540-69620-9 (cf. p. 93).
- [SSM98] Bernhard SCHÖLKOPF, Alexander SMOLA et Klaus-Robert MÜLLER. “Nonlinear Component Analysis as a Kernel Eigenvalue Problem”. In : *Neural Computation* 10.5 (juil. 1998), p. 1299-1319. ISSN : 0899-7667. DOI : [10/dpn6x6](https://doi.org/10.1162/08997669801750264965) (cf. p. 93).
- [Sch+99] Bernhard SCHÖLKOPF, Robert WILLIAMSON, Alex SMOLA, John SHAWE-TAYLOR et John PLATT. “Support Vector Method for Novelty Detection”. In : *Proceedings of the 12th International Conference on Neural Information Processing Systems. NIPS’99*. Cambridge, MA, USA : MIT Press, 1999, p. 582-588 (cf. p. 74).
-

- [SKP15] Florian SCHROFF, Dmitry KALENICHENKO et James PHILBIN. “FaceNet : A Unified Embedding for Face Recognition and Clustering”. In : *2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (juin 2015), p. 815-823. DOI : [10.1109/CVPR.2015.7298682](https://doi.org/10.1109/CVPR.2015.7298682). arXiv : [1503.03832](https://arxiv.org/abs/1503.03832) (cf. p. 84-86).
- [Sch+02] Heinrich SCHWENKE, Ulrich NEUSCHAEFER-RUBE, Tilo PFEIFER et Horst KUNZMANN. “Optical Methods for Dimensional Metrology in Production Engineering”. In : *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 51.2 (jan. 2002), p. 685-699. ISSN : 0007-8506. DOI : [10.1016/S0007-8506\(07\)61707-7](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61707-7) (cf. p. 22).
- [Sel+16] Ramprasaath R. SELVARAJU, Michael COGSWELL, Abhishek DAS, Ramakrishna VEDANTAM, Devi PARIKH et Dhruv BATRA. “Grad-CAM : Visual Explanations from Deep Networks via Gradient-Based Localization”. In : *arXiv :1610.02391 [cs]* (oct. 2016). arXiv : [1610.02391 \[cs\]](https://arxiv.org/abs/1610.02391) (cf. p. 130).
- [Sha48] Claude Elwood SHANNON. “A Mathematical Theory of Communication”. In : *The Bell System Technical Journal* 27.3 (juil. 1948), p. 379-423. ISSN : 0005-8580. DOI : [10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x](https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x) (cf. p. 78).
- [SS97] K. SHELESH-NEZHAD et E. STORES. “An Intelligent System for Plastic Injection Molding Process Design”. In : *Journal of Materials Processing Technology* 63.1 (jan. 1997), p. 458-462. ISSN : 0924-0136. DOI : [10.1016/S0924-0136\(96\)02664-7](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(96)02664-7) (cf. p. 168).
- [She+97] Gal SHERBELIS, Emlyn GARVEY, Colchester ROAD et David Owen KAZMER. “The Methods and Benefits of Establishing a Process Window”. In : *Submitted for the 1997 Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers*. Avr. 1997 (cf. p. 171, 172).
- [She30] Walter Andrew SHEWHART. “Economic Quality Control of Manufactured Product”. In : *Bell System Technical Journal* 9.2 (avr. 1930), p. 364-389. ISSN : 1538-7305. DOI : [10.1002/j.1538-7305.1930.tb00373.x](https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1930.tb00373.x) (cf. p. 171, 172).
- [She31] Walter Andrew SHEWHART. *Economic Control of Quality of Manufactured Product*. New York, NY, USA : Van Nostrand, jan. 1931. ISBN : 978-0-87389-076-2 (cf. p. 172).
- [Shi+16] Hailin SHI, Yang YANG, Xiangyu ZHU, Shengcai LIAO, Zhen LEI, Weishi ZHENG et Stan Z. LI. “Embedding Deep Metric for Person Re-identification A Study Against Large Variations”. In : *arXiv :1611.00137 [cs]* (nov. 2016). arXiv : [1611.00137](https://arxiv.org/abs/1611.00137) (cf. p. 86).
- [SVZ13] Karen SIMONYAN, Andrea VEDALDI et Andrew ZISSERMAN. “Deep Inside Convolutional Networks : Visualising Image Classification Models and Saliency Maps”. In : *arXiv :1312.6034 [cs]* (déc. 2013). arXiv : [1312.6034 \[cs\]](https://arxiv.org/abs/1312.6034) (cf. p. 130).
- [SZ14] Karen SIMONYAN et Andrew ZISSERMAN. “Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition”. In : *arXiv :1409.1556 [cs]* (sept. 2014). arXiv : [1409.1556](https://arxiv.org/abs/1409.1556) (cf. p. 191).
- [Smi+17] Daniel SMILKOV, Nikhil THORAT, Been KIM, Fernanda VIÉGAS et Martin WATTENBERG. “SmoothGrad : Removing Noise by Adding Noise”. In : *arXiv :1706.03825 [cs, stat]* (juin 2017). arXiv : [1706.03825 \[cs, stat\]](https://arxiv.org/abs/1706.03825) (cf. p. 130).
- [Sob67] Ilya Meyerovich SOBOL’. “On the Distribution of Points in a Cube and the Approximate Evaluation of Integrals”. In : *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics* 7.4 (jan. 1967), p. 86-112. ISSN : 00415553. DOI : [10/crdj6j](https://doi.org/10/crdj6j) (cf. p. 107, 180).
- [Soh16] Kihyuk SOHN. “Improved Deep Metric Learning with Multi-class N-pair Loss Objective”. In : *Proceedings of the 30th International Conference on Neural Information Processing Systems. NIPS’16*. event-place : Barcelona, Spain. USA : Curran Associates Inc., 2016, p. 1857-1865. ISBN : 978-1-5108-3881-9 (cf. p. 87).
- [Son+15] Hyun Oh SONG, Yu XIANG, Stefanie JEGELKA et Silvio SAVARESE. “Deep Metric Learning via Lifted Structured Feature Embedding”. In : *arXiv :1511.06452 [cs]* (nov. 2015). arXiv : [1511.06452](https://arxiv.org/abs/1511.06452) (cf. p. 87).
- [Spr+14] Jost Tobias SPRINGENBERG, Alexey DOSOVITSKIY, Thomas BROX et Martin RIEDMILLER. “Striving for Simplicity : The All Convolutional Net”. In : *arXiv :1412.6806 [cs]* (déc. 2014). arXiv : [1412.6806 \[cs\]](https://arxiv.org/abs/1412.6806) (cf. p. 130).

-
- [Sri+14] Nitish SRIVASTAVA, Geoffrey HINTON, Alex KRIZHEVSKY, Ilya SUTSKEVER et Ruslan SALAKHUTDINOV. "Dropout : A Simple Way to Prevent Neural Networks from Overfitting". In : *Journal of Machine Learning Research* 15 (2014), p. 1929-1958 (cf. p. 195).
- [SGS15a] Rupesh Kumar SRIVASTAVA, Klaus GREFF et Jürgen SCHMIDHUBER. "Highway Networks". In : *arXiv :1505.00387 [cs]* (mai 2015). arXiv : [1505.00387 \[cs\]](https://arxiv.org/abs/1505.00387) (cf. p. 192).
- [SGS15b] Rupesh Kumar SRIVASTAVA, Klaus GREFF et Jürgen SCHMIDHUBER. "Training Very Deep Networks". In : *arXiv :1507.06228 [cs]* (juil. 2015). arXiv : [1507.06228 \[cs\]](https://arxiv.org/abs/1507.06228) (cf. p. 192).
- [Sto51] George Gabriel STOKES. "On the Composition and Resolution of Streams of Polarized Light from Different Sources". In : *Transactions of the Cambridge Philosophical Society* 9 (1851), p. 399 (cf. p. 49, 50).
- [Suh90] Nam P. SUH. *The Principles of Design*. Oxford University Press, 1990. ISBN : 978-0-19-504345-7 (cf. p. 14).
- [Sze+14] Christian SZEGEDY, Wei LIU, Yangqing JIA, Pierre SERMANET, Scott REED, Dragomir ANGUELOV, Dumitru ERHAN, Vincent VANHOUCKE et Andrew RABINOVICH. "Going Deeper with Convolutions". In : *arXiv :1409.4842 [cs]* (sept. 2014). arXiv : [1409.4842](https://arxiv.org/abs/1409.4842) (cf. p. 85).
- [Tik43] Andrey Nikolayevich TIKHONOV. "On the stability of inverse problems". In : *Doklady Akademii Nauk SSSR* 39.5 (1943), p. 195-198 (cf. p. 198).
- [TA77] Andrey Nikolayevich TIKHONOV et V. ARSENIN. *Solutions of Ill-Posed Problems*. Scripta Series in Mathematics. Washington : New York : Winston ; distributed solely by Halsted Press, 1977. ISBN : 978-0-470-99124-4 (cf. p. 198).
- [Tim37] Stephen TIMOSHENKO. *Vibration Problems In Engineering*. 2nd. Stanford University Palo Alto, CA, USA : D. Van Nostrand Company Inc., New-York, 1937 (cf. p. 56).
- [TS67] K. E. TORRANCE et E. M. SPARROW. "Theory for Off-Specular Reflection From Roughened Surfaces*". In : *JOSA* 57.9 (sept. 1967), p. 1105-1114. DOI : [10/dw6f9n](https://doi.org/10.1063/josa.1967.57.9) (cf. p. 63).
- [Tso97] Hoi-Pang TSOI. "A Fuzzy Logic Controller (FLC) for Ram Velocity in Injection Molding". Thèse de doct. 1997 (cf. p. 166, 170).
- [TG97] Hoi-Pang TSOI et Furong GAO. "A Real-Time Fuzzy Logic Controller for Ram Velocity in Injection Molding". In : *4th International Conference on Manufacturing Technology*. Hong-Kong, déc. 1997 (cf. p. 166).
- [Tyo+06] J. Scott TYO, Dennis L. GOLDSTEIN, David B. CHENAULT et Joseph A. SHAW. "Review of Passive Imaging Polarimetry for Remote Sensing Applications". In : *Applied Optics* 45.22 (août 2006), p. 5453-5469. ISSN : 2155-3165. DOI : [10/bx8tpw](https://doi.org/10.1063/1.2288888) (cf. p. 46).
- [vH08] Laurens VAN DER MAATEN et Geoffrey HINTON. "Visualizing Data Using T-SNE". In : *Journal of Machine Learning Research* 9.Nov (2008), p. 2579-2605. ISSN : ISSN 1533-7928 (cf. p. 93).
- [vW06] Nees Jan VAN ECK et Ludo WALTMAN. "VOS : A New Method for Visualizing Similarities between Objects". In : *ERIM report series research in management Erasmus Research Institute of Management* (avr. 2006). ISSN : 1566-5283 (cf. p. 12).
- [van+10] Nees Jan VAN ECK, Ludo WALTMAN, Rommert DEKKER et Jan VAN DEN BERG. "A Comparison of Two Techniques for Bibliometric Mapping : Multidimensional Scaling and VOS". In : *Journal of the American Society for Information Science and Technology* 61.12 (déc. 2010), p. 2405-2416. ISSN : 1532-2890. DOI : [10.1002/asi.21421](https://doi.org/10.1002/asi.21421) (cf. p. 12).
- [Vap92] Vladimir Naumovitch VAPNIK. "Principles of Risk Minimization for Learning Theory". In : *Advances in Neural Information Processing Systems 4*. Sous la dir. de J. E. MOODY, S. J. HANSON et R. P. LIPPMANN. Morgan-Kaufmann, 1992, p. 831-838 (cf. p. 78, 192).
- [VL63] Vladimir Naumovitch VAPNIK et Alexander Yakovlevich LERNER. "Patterns recognition using Generalized Portraits method". In : *Automation and Remote Control* 24.6 (1963), p. 774-780 (cf. p. 186).
-

- [VGS97] Vladimir VAPNIK, Steven E. GOLOWICH et Alex J. SMOLA. “Support Vector Method for Function Approximation, Regression Estimation and Signal Processing”. In : *Advances in Neural Information Processing Systems 9*. Sous la dir. de M. C. MOZER, M. I. JORDAN et T. PETSCHKE. MIT Press, 1997, p. 281-287 (cf. p. 186).
- [Vas+17] Ashish VASWANI, Noam SHAZEER, Niki PARMAR, Jakob USZKOREIT, Llion JONES, Aidan N. GOMEZ, Lukasz KAISER et Illia POLOSUKHIN. “Attention Is All You Need”. In : *arXiv :1706.03762 [cs]* (juin 2017). arXiv : [1706.03762 \[cs\]](https://arxiv.org/abs/1706.03762) (cf. p. 104).
- [von07] Ulrike VON LUXBURG. “A Tutorial on Spectral Clustering”. In : *arXiv :0711.0189 [cs]* (nov. 2007). arXiv : [0711.0189 \[cs\]](https://arxiv.org/abs/0711.0189) (cf. p. 89, 90).
- [Wan+17] Jian WANG, Feng ZHOU, Shilei WEN, Xiao LIU et Yuanqing LIN. “Deep Metric Learning with Angular Loss”. In : *arXiv :1708.01682 [cs]* (août 2017). arXiv : [1708.01682](https://arxiv.org/abs/1708.01682) (cf. p. 87).
- [Wan+14] Jiang WANG, Yang SONG, Thomas LEUNG, Chuck ROSENBERG, Jinbin WANG, James PHILBIN, Bo CHEN et Ying WU. “Learning Fine-grained Image Similarity with Deep Ranking”. In : *arXiv :1404.4661 [cs]* (avr. 2014). arXiv : [1404.4661](https://arxiv.org/abs/1404.4661) (cf. p. 84-86).
- [Wan+04] Zhou WANG, A. C. BOVIK, H. R. SHEIKH et E. P. SIMONCELLI. “Image Quality Assessment : From Error Visibility to Structural Similarity”. In : *IEEE Transactions on Image Processing* 13.4 (avr. 2004), p. 600-612. ISSN : 1057-7149. DOI : [10.1109/TIP.2003.819861](https://doi.org/10.1109/TIP.2003.819861) (cf. p. 42).
- [WBS06] Kilian Q WEINBERGER, John BLITZER et Lawrence K. SAUL. “Distance Metric Learning for Large Margin Nearest Neighbor Classification”. In : *Advances in Neural Information Processing Systems 18*. Sous la dir. d’Y. WEISS, B. SCHÖLKOPF et J. C. PLATT. Vancouver, Canada : MIT Press, 2006, p. 1473-1480 (cf. p. 84).
- [Wil+05] Bennett WILBURN, Neel JOSHI, Vaibhav VAISH, Eino-Ville TALVALA, Emilio ANTUNEZ, Adam BARTH, Andrew ADAMS, Mark HOROWITZ et Marc LEVOY. “High Performance Imaging Using Large Camera Arrays”. In : *ACM SIGGRAPH 2005 Papers*. SIGGRAPH ’05. New York, NY, USA : ACM, 2005, p. 765-776. DOI : [10/b7wkxc](https://doi.org/10/b7wkxc) (cf. p. 48).
- [WA95] Lawrence B WOLFF et Andreas G ANDREOU. “Polarization Camera Sensors”. In : *Image and Vision Computing* 13.6 (août 1995), p. 497-510. ISSN : 0262-8856. DOI : [10.1016/0262-8856\(95\)94383-B](https://doi.org/10.1016/0262-8856(95)94383-B) (cf. p. 47).
- [WC97] Suzanne L. B. WOLL et Douglas J. COOPER. “Pattern-Based Closed-Loop Quality Control for the Injection Molding Process”. In : *Polymer Engineering & Science* 37.5 (mai 1997), p. 801-812. ISSN : 1548-2634. DOI : [10.1002/pen.11723](https://doi.org/10.1002/pen.11723) (cf. p. 166, 171).
- [WCS96] Suzanne L. B. WOLL, Douglas J. COOPER et Blair V. SOUDER. “Online Pattern-Based Part Quality Monitoring of the Injection Molding Process”. In : *Polymer Engineering & Science* 36.11 (mai 1996), p. 1477-1488. ISSN : 1548-2634. DOI : [10.1002/pen.10542](https://doi.org/10.1002/pen.10542) (cf. p. 166, 174).
- [Wu+17] Chao-Yuan WU, R. MANMATHA, Alexander J. SMOLA et Philipp KRÄHENBÜHL. “Sampling Matters in Deep Embedding Learning”. In : *arXiv :1706.07567 [cs]* (juin 2017). arXiv : [1706.07567](https://arxiv.org/abs/1706.07567) (cf. p. 85).
- [Xie+16] Saining XIE, Ross GIRSHICK, Piotr DOLLÁR, Zhuowen TU et Kaiming HE. “Aggregated Residual Transformations for Deep Neural Networks”. In : *arXiv :1611.05431 [cs]* (nov. 2016). arXiv : [1611.05431 \[cs\]](https://arxiv.org/abs/1611.05431) (cf. p. 192).
- [Xu+15] Kelvin XU, Jimmy BA, Ryan KIROS, Kyunghyun CHO, Aaron COURVILLE, Ruslan SALAKHUTDINOV, Richard ZEMEL et Yoshua BENGIO. “Show, Attend and Tell : Neural Image Caption Generation with Visual Attention”. In : *arXiv :1502.03044 [cs.LG]* (fév. 2015). arXiv : [1502.03044 \[cs.LG\]](https://arxiv.org/abs/1502.03044) (cf. p. 104).
- [Yam+16] Tomohiro YAMAZAKI, Yasushi MARUYAMA, Yusuke UESAKA, Motoaki NAKAMURA, Yoshihisa MATOBA, Takashi TERADA, Kenta KOMORI, Yoshiyuki OHBA, Shinichi ARAKAWA, Yasutaka HIRASAWA, Yuhi KONDO, Jun MURAYAMA, Kentaro AKIYAMA, Yusuke OIKE, Shuzo SATO et Takayuki EZAKI. “Four-Directional Pixel-Wise Polarization CMOS Image Sensor Using Air-Gap Wire Grid on 2.5-Mm Back-Illuminated Pixels”. In : *2016 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)* (2016), p. 8-8. DOI : [10/gf8zsc](https://doi.org/10/gf8zsc) (cf. p. 47).

-
- [YDK00] Dongzhe YANG, Kourosh DANAI et David Owen KAZMER. “A Knowledge-Based Tuning Method for Injection Molding Machines”. In : *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 123.4 (déc. 2000), p. 682-691. ISSN : 1087-1357. DOI : [10.1115/1.1382596](https://doi.org/10.1115/1.1382596) (cf. p. 166, 176).
- [Yan04] Yi YANG. “Injection Molding Control : From Process to Quality”. Thèse de doct. Hong Kong University of Science et Technology, jan. 2004 (cf. p. 166, 175).
- [YRC07] Yuan YAO, Lorenzo ROSASCO et Andrea CAPONNETTO. “On Early Stopping in Gradient Descent Learning”. In : *Constructive Approximation* 26.2 (août 2007), p. 289-315. ISSN : 1432-0940. DOI : [10/d3qqdj](https://doi.org/10/d3qqdj) (cf. p. 196).
- [Yu+18] Baosheng YU, Tongliang LIU, Mingming GONG, Changxing DING et Dacheng TAO. “Correcting the Triplet Selection Bias for Triplet Loss”. In : 2018, p. 71-87 (cf. p. 87).
- [ZF13] Matthew D. ZEILER et Rob FERGUS. “Visualizing and Understanding Convolutional Networks”. In : *arXiv :1311.2901 [cs]* (nov. 2013). arXiv : [1311.2901 \[cs\]](https://arxiv.org/abs/1311.2901) (cf. p. 85, 191).
- [Zha+18] Han ZHANG, Ian J. GOODFELLOW, Dimitris METAXAS et Augustus ODENA. “Self-Attention Generative Adversarial Networks”. In : *arXiv :1805.08318 [cs, stat]* (mai 2018). arXiv : [1805.08318 \[cs, stat\]](https://arxiv.org/abs/1805.08318) (cf. p. 104).
- [ZDN16] Hang ZHANG, Kristin DANA et Ko NISHINO. “Friction from Reflectance : Deep Reflectance Codes for Predicting Physical Surface Properties from One-Shot In-Field Reflectance”. In : *arXiv :1603.07998 [cs]* (mar. 2016). arXiv : [1603.07998 \[cs\]](https://arxiv.org/abs/1603.07998) (cf. p. 63).
- [Zha+16] Yun ZHANG, Ting MAO, Zhigao HUANG, Huang GAO et Dequn LI. “A Statistical Quality Monitoring Method for Plastic Injection Molding Using Machine Built-in Sensors”. In : *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 85.9-12 (août 2016), p. 2483-2494. ISSN : 0268-3768, 1433-3015. DOI : [10.1007/s00170-015-8013-2](https://doi.org/10.1007/s00170-015-8013-2) (cf. p. 166, 173).
- [Zhe+19] Wenzhao ZHENG, Zhaodong CHEN, Jiwen LU et Jie ZHOU. “Hardness-Aware Deep Metric Learning”. In : *arXiv :1903.05503 [cs]* (mar. 2019). arXiv : [1903.05503](https://arxiv.org/abs/1903.05503) (cf. p. 87).
- [Zho+15] Bolei ZHOU, Aditya KHOSLA, Agata LAPEDRIZA, Aude OLIVA et Antonio TORRALBA. “Learning Deep Features for Discriminative Localization”. In : *arXiv :1512.04150 [cs]* (déc. 2015). arXiv : [1512.04150 \[cs\]](https://arxiv.org/abs/1512.04150) (cf. p. 198).
- [Zhu+17] Jun-Yan ZHU, Taesung PARK, Phillip ISOLA et Alexei A. EFROS. “Unpaired Image-to-Image Translation Using Cycle-Consistent Adversarial Networks”. In : *arXiv :1703.10593 [cs]* (mar. 2017). arXiv : [1703.10593 \[cs\]](https://arxiv.org/abs/1703.10593) (cf. p. 41).
- [Zis72] Michel ZISMAN. *Topologie algébrique élémentaire : Maîtrise de mathématiques*. Paris, France : Armand Colin, 1972 (cf. p. 97).
- [ZL16] Barret ZOPH et Quoc V. LE. “Neural Architecture Search with Reinforcement Learning”. In : *arXiv :1611.01578 [cs]* (nov. 2016). arXiv : [1611.01578 \[cs\]](https://arxiv.org/abs/1611.01578) (cf. p. 111).
- [Zop+17] Barret ZOPH, Vijay VASUDEVAN, Jonathon SHLENS et Quoc V. LE. “Learning Transferable Architectures for Scalable Image Recognition”. In : *arXiv :1707.07012 [cs, stat]* (juil. 2017). eprinttype : arxiv eprintclass : cs.CV, cs.LG, stat.ML eprint : <http://arxiv.org/abs/1707.07012>. arXiv : [1707.07012 \[cs, stat\]](https://arxiv.org/abs/1707.07012) (cf. p. 111).
-

Table des figures

1.1	Une presse à injecter.	6
1.2	Schéma-bloc du procédé d'injection-moulage.	7
1.3	Profil de position de la vis et de pression d'injection pendant un cycle d'injection-moulage.	9
1.4	Défaut de retassure mesurée par microscope confocal, <i>AltiMet 520⁰</i>	11
1.5	Cartographie bibliographique de la maîtrise du procédé d'injection-moulage.	12
1.6	Vue systémique du procédé d'injection-moulage.	13
1.7	Représentation <i>Zig Zag</i> du procédé d'injection-moulage des thermoplastiques.	14
1.8	Résultats de mesure de la pression et la température dans l'outillage pendant tout le cycle.	21
1.9	Résultats du modèle LSTM sur le jeu de données de test.	22
1.10	Intégration de la mesure dans le cycle d'injection-moulage.	22
1.11	Mesure de la géométrie d'un objet par triangulation laser.	24
1.12	Mesure de la géométrie d'un objet par triangulation laser en cycle industriel.	25
1.13	Nuage de points de la pièce obtenue en cycle industriel avec le HandyScan.	26
1.14	Écart géométrique entre la pièce mesurée et la géométrie de référence de l'outillage.	26
1.15	Intégration du contrôle de la qualité	27
2.1	Mesure d'une dimension géométrique de la boîte noire à l'aide d'un comparateur.	35
2.2	Modèle linéaire entre les caractéristiques des pièces chaudes et des pièces froides.	37
2.3	Photographie de l'aspect des pièces.	38
2.4	Mesure thermique et mesure géométrique d'une pièce thermo-moulée.	40
2.5	Architecture du réseau antagoniste génératif <i>U-Net</i> , utilisée par le modèle <i>pix2pix</i>	41
2.6	Présentation d'un échantillon du jeu de données, en fausse couleur.	42
2.7	Comparaison entre les images générées par le modèle à partir de l'image thermique et les images "géométriques" originales.	43
2.8	Différentes composantes de réflexion d'un polymère semi-cristallin.	45
2.9	Acquisition des composantes de réflexions spéculaire et diffuse.	46
2.10	Notre polarimètre et le procédé de calibration par homographie.	47
2.11	Détection et association de marqueurs <i>ChAruco</i> entre deux caméras.	48
2.12	Images de la même pièce par les 3 caméras, sous 3 angles de polarisation différents.	49
2.13	Reconstruction des paramètres de Stokes partiels, du Degré et de l'Angle de Polarisation, à partir des images de 3 caméras.	51
2.14	Illustration de différentes méthodes de pré-traitements des images issues des trois caméras polarisées.	54
2.15	Représentation des 100 premiers modes de notre base <i>B</i>	57
2.16	Filtrage de la photographie d'une pièce par le mode n°24 de la base <i>B</i>	58
2.17	Reconstruction d'une image après description modale	59
2.18	Importance des descripteurs par Forêt d'arbres décisionnels.	59
2.19	Mesure par caméra thermique de l'évolution sur 2 secondes de la température d'une pièce.	62

3.1	Diagramme du processus de construction d'un algorithme de contrôle de la qualité par apprentissage.	67
3.2	Annotation hors-ligne par les experts humains.	71
3.3	Architecture d'un réseau siamois.	83
3.4	Trois différents types d'images Négatives possibles pour un couple d'images (Référence, Positive)	86
3.5	Principe de l'apprentissage d'un réseau de triplets.	86
3.6	Projection par <i>t-SNE</i> à partir des valeurs de la dernière couche d'un réseau de triplet.	87
3.7	Projection par <i>UMAP</i> à partir de la valeur des pixels des images.	90
3.8	Compression par <i>ACP</i>	91
3.9	Qualité de la compression par <i>ACP</i> en fonction du nombre de composantes.	92
3.10	Projection par <i>ACP</i> à partir de la valeur des pixels des images.	92
3.11	Optimisation des paramètres d'une <i>ACP</i> à noyaux. Métrique : Norme ℓ_2	94
3.12	Compression par <i>ACP</i> à noyau.	94
3.13	Qualité de la compression par <i>ACP</i> à noyau en fonction du nombre de composantes.	95
3.14	Projection par <i>t-SNE</i> à partir de la valeur des pixels des images.	96
3.15	Représentation par <i>UMAP</i> à partir de la valeur des pixels des images.	98
3.16	Architecture d'un auto-encodeur.	99
3.17	Reconstruction d'une image par un auto-encodeur.	100
3.18	Projection par <i>t-SNE</i> à partir des valeurs de l'espace latent z d'un <i>VAE</i>	101
3.19	Graphe d'un auto-encodeur variationnel, inspiré de [Doe16].	101
3.20	Génération d'images à partir de la distribution modélisant l'espace latent d'un auto-encodeur variationnel.	101
3.21	Génération d'images à partir de la distribution modélisant l'espace latent du générateur d'un <i>GAN</i>	104
3.22	Optimisation d'une fonction à deux variables avec neuf essais.	106
3.23	Optimisation d'un modèle appris de manière supervisée, à l'aide de la librairie <i>auto-sklearn</i> [Feu+15].	108
3.24	Évaluation partielle de f en fonction de b	109
3.25	f ANOVA des hyper-paramètres suite à l'optimisation avec <i>BOHB</i>	111
3.26	Taxonomie de l'apprentissage statistique.	115
4.1	Rendu réaliste du dispositif de mesure proposé.	118
4.2	Intégration des capteurs.	119
4.3	Photographie de la mesure d'une pièce par notre système	120
4.4	Architecture logicielle du système proposé.	121
4.5	Apprentissage par transfert de domaine à partir du réseau <i>DenseNet121</i> pré-entraîné sur <i>ImageNet</i>	123
4.6	Évolution de l'erreur de prédiction et de la justesse balancée de classification, pendant l'apprentissage des poids du réseau.	124
4.7	Interface utilisateur d'annotation de la conformité des pièces.	126
4.8	Images originales pour la caméra linéairement polarisée selon un angle de 0°	127
4.9	Courbe ROC du meilleur classifieur de la qualité des pièces pour l'essai "boîtes noires".	129
4.10	<i>ACP</i> sur réduction <i>UMAP</i> à 100 scalaires des 564 valeurs de la dernière couche du réseau.	129
4.11	Cartes de saillance obtenues pour une pièce conforme et une pièce non-conforme.	130
A.1	Représentation <i>Zig Zag</i> du procédé d'injection-moulage des thermoplastiques.	165
C.1	Figure issue du rapport annuel de la DIRECTION GÉNÉRALE DES ENTREPRISES : <i>Chiffres clés de l'industrie manufacturière, Édition 2018</i> [Dir19]	178

D.1	Essais prévus pour des plans d'expériences à trois niveaux pour trois variables. . .	180
E.1	Courbe ROC du meilleur classifieur de la qualité des pièces.	184
E.2	Stratified 4-Folds	185
E.3	SVM avec <i>kernel trick</i> ϕ	187
F.1	Architecture d'un bloc DenseNet.	193
F.2	Fonctions d'activation.	194
F.3	Comparaison <i>max pooling</i> c et <i>average pooling</i> d pour 4 filtres de convolutions b	197
F.4	Augmentation d'une image par translations et rotations.	199
G.1	Images générées par le modèle <i>pix2pix</i> à partir de l'image thermique.	200
H.1	Images capturées lors de l'essai "plaque".	202
H.2	Courbe ROC du meilleur classifieur de la qualité des pièces pour l'essai "plaques".	204

Liste des tableaux

1.1	Paramètres réglables sur une presse à injecter classique.	9
1.2	Principaux défauts d'aspects en injection-moulage des thermoplastiques.	10
1.3	Contraintes industrielles et cahier des charges pour la contrôle en ligne de la qualité.	28
1.4	Degré d'invasivité de la mesure sur un procédé de production.	29
2.1	Sélection des variables pour l'étude.	36
2.2	Performance du modèle pix2pix : similarité entre images générées et images originales.	43
2.3	Comparaison des scores de justesse de classification de la non-conformité.	52
3.1	Méthodes de construction du jeu de données d'apprentissage.	68
3.2	Durées d'annotations moyenne d'une image pour un humain.	70
3.3	Hyper-paramètres critiques pour l'apprentissage de réseaux de neurones profonds.	80
3.4	Architecture des réseaux de convolutions étudiés.	80
3.5	Complexité de l'apprentissage des méthodes étudiées en fonction du nombre d'individus du jeu de données N	113
4.1	Matrices de confusion pour l'essai boîtes noires.	128
A.1	Récapitulatif de l'étude bibliographique.	166
B.1	Moyens de mesure des caractéristiques d'une pièce.	177
D.1	Plan de criblage <i>L12</i> utilisé.	181
E.1	Matrice de confusion.	183
E.2	Répartition du jeu de données : apprentissage, validation et test.	186
F.1	Fonctions d'activation.	194
F.2	Illustration d'une couche de <i>max pooling</i>	196
H.1	Matrices de confusion pour l'essai "plaques".	203

A

Maîtrise du procédé d'injection-moulage des thermoplastiques

Cette annexe propose une étude bibliographique de la maîtrise du procédé d'injection-moulage des thermoplastiques, de 1975 à 2015.

Cette annexe est complémentaire de la Section 1.3.3 "Maîtrise du procédé d'injection-moulage des thermoplastiques" du Chapitre 1. L'objectif de la maîtrise d'un procédé est de maîtriser la qualité du produit : c'est à dire de limiter la dispersion des caractéristiques des pièces. Il s'agit en priorité d'effectuer des mesures pertinentes sur l'état du procédé, puis de les analyser afin de détecter les dérives. Une dernière étape est l'ajustement automatique des paramètres du procédé.

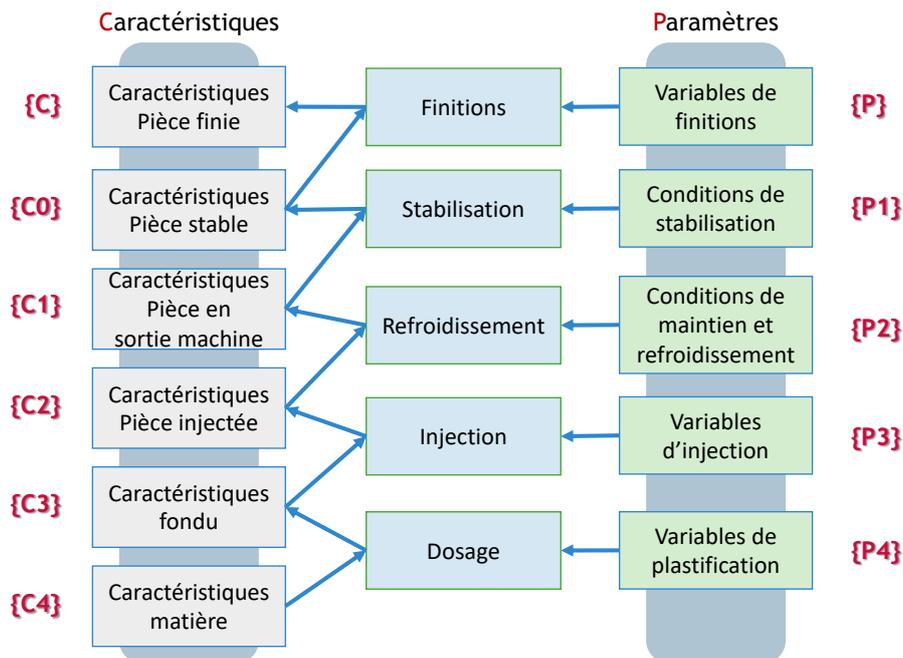


Figure A.1 – Représentation Zig Zag du procédé d'injection-moulage des thermoplastiques.

Année	Auteurs [Publication]	Méthode utilisée	Objectif	Caractéristiques de la pièce stable		Paramètres de stabilisation		Caractéristiques de la pièce chaude		Param. de maintien-refroidissement		Caractéristiques de la pièce injectée		Paramètres d'injection		Caractéristiques de la matière fondue		Paramètres de plastification		Caractéristiques de la matière initiale	
				C ₀	P ₁	C ₁	P ₂	C ₂	P ₃	C ₃	P ₄	C ₄									
1975	LACZKO [Lac75]	Automatique	Régulation																		
1983	SANSCHAGRIN [San83]	Automatique	Régulation																		
1985	ABU FARA, KAMAL et PATTERSON [AKP85]	Automatique	Régulation																		
1986	GOMES, PATTERSON et KAMAL [GPK86]	Automatique	Régulation																		
1987	AGRAWAL, PANDELIDIS et PECHT [APP87]	Automatique	Régulation																		
1987	KAMAL et al. [Kam+87]	Automatique	Régulation																		
1987	GUSTAFSON et LEBOW [GL87]	Automatique	Régulation																		
1988	ABU FARA [Abu88]	Automatique	Régulation																		
1990	ABU FARA, KAMAL et PATTERSON [AKP90]	Automatique	Régulation																		
1990	DEVOS [Dev90]	Automatique	Régulation																		
1991	CHIU, SHIH et WEI [CSW91]	Automatique	Régulation																		
1991	Srinivasan et al.	Automatique	Régulation																		
1993	HAEUSSLER et WORTBERG [HW93]	Réseau de Neurones	Surveillance																		
1994	BLYSKAL et MEHERAN [BM94]	Plan d'expériences	Pilotage																		
1994	Gao et al.	Automatique	Régulation																		
1995	KAZMER et BARKAN [KB95]	Automatique	Régulation																		
1996	Thomas et al.	Automatique	Régulation																		
1996	WOLL, COOPER et SOUDER [WCS96]	Réseau de Neurones	Surveillance																		
1997	DEMIRCI, COULTER et GÜÇERI [DCG97]	Réseau de Neurones	Régulation																		
1997	WOLL et COOPER [WC97]	Réseau de Neurones	Régulation																		
1997	[Tso97] TSOI	Automatique	Régulation																		
1998	Ryckebusch et al.	Automatique	Régulation																		
1998	IVESTER, DANAI et KAZMER [IDK98]	Plan d'expériences	Surveillance																		
1999	TSOI et GAO [TG97]	Automatique	Régulation																		
2000	HUANG et LEE [HL00]	Automatique	Régulation																		
2000	SCHNERR-HÄSELBARTH et MICHAELI [SM00]	Réseau de Neurones	Surveillance																		
2000	YANG, DANAI et KAZMER [YDK00]	Plan d'expériences	Surveillance																		
2001	LAU et al. [Lau+01]	Réseau de Neurones	Surveillance																		
2002	CHEN [Che02]	Automatique	Régulation																		
2003	PILLET, MAIRE et BRONET [PMB03]	MSP	Surveillance																		
2004	LU et al. [Lu+04]	Plan d'expériences	Surveillance																		
2004	YANG [Yan04]	Automatique	Surveillance																		
2006	FOURNIER et al. [Fou+06]	Automatique	Pilotage																		
2009	MICHAELI et SCHREIBER [MS09]	Réseau de Neurones	Régulation																		
2013	FEI, MEHAT et KAMARUDDIN [FMK13]	Plan d'expériences	Surveillance																		
2014	Zhao et al.	MSP	Surveillance																		
2015	JOHNSTON et al. [Joh+15]	Pilotage	Surveillance																		
2016	ZHANG et al. [Zha+16]	MSP	Surveillance																		
2017	Zhou et al.	MSP & Auto.	Pilotage																		

Tableau A.1 – Récapitulatif de l'étude bibliographique.

Cette annexe propose une étude bibliographique des techniques de maîtrise du procédé d'injection-moulage. Le Tableau A.1 récapitule cette revue de la littérature.

La maîtrise d'un procédé de production peut être discrétisée en différentes étapes :

1. réglage initial d'un point de fonctionnement (paramètres P_{2-4}) : connaissance humaine et système expert,
2. régulation du point de fonctionnement C_{2-3} : automatique et contrôle adaptatif,
3. détection des dérives du procédé C_{1-3} ,
4. ajustement des paramètres P_{2-4} afin de modifier les caractéristiques C_{0-1} .

Nous indiquerons à quelle phase de notre représentation *Zig-Zag*, voir la Figure A.1, s'intéresse les différents travaux étudiés dans notre revue.

A.1 Réglage initial du point de fonctionnement

La pratique industrielle du procédé d'injection-moulage fait appelle au savoir-faire du technicien pour régler le point de fonctionnement initial. Les valeurs des caractéristiques du produit sont fonction d'un point de fonctionnement du procédé. De plus, le procédé d'injection-moulage n'est pas bijectif : il existe plusieurs points de fonctionnement différents pour des caractéristiques de produit identiques. L'approche classique de réglage employée par le technicien régleur est l'essai-erreur. Aussi, lors du démarrage du procédé, les premiers cycles de la production sont dédiés au réglage initial. Des échantillons sont pris quelques secondes après leurs sorties du moule et leurs qualités est rapidement évaluée par observation visuelle. Dans un premier temps, il s'agit de contrôler l'absence de manque de matière (trous dans la pièce), puis les déformations géométriques importantes et enfin les traces de brûlures et givrages. L'opérateur utilise ensuite ses connaissances pour améliorer les réglages et respecter le cahier des charges : cotations géométriques précises, défauts d'aspect, caractéristiques mécaniques. Sur les pièces les plus techniques, des mesures géométriques sont effectuées à l'aide d'un moyen de mesure manuel, comme un pied à coulisse ou un comparateur.

En 2009, RICHARD et al. analysèrent les stratégies employées par des techniciens-régleurs plasturgistes [Ric+09]. Les observations furent recueillies sur un intervalle de dix années par PASTRÉ et SAMURÇAY [Pas94; PS04] auprès de 13 régulateurs d'une entreprise de fabrication de produits, dont la qualité de finition est élevée [Pas94; PS04]. Leurs niveaux de compétences et leurs parcours professionnels sont variés. Certains ont une formation technique, mais la majorité a appris par la pratique, sans formation initiale. 6 paramètres du procédé sont ajustables de manière binaire : augmenter ou diminuer la valeur de réglage ; la température de la matière fondue (P_4 Figure A.1), la durée d'injection P_3 , la contre-pression P_{2-3} , la pression de commutation P_3 , le niveau de pression qui déclenche le passage de la phase d'injection à celle de maintien P_{2-3} , la pression de maintien P_2 , la durée de maintien P_2 , la durée de refroidissement P_2 . Un septième paramètre concerne le changement de la buse. Les auteurs identifient les deux sources d'informations qui sont utilisés par les régulateurs : l'observation de la courbe de la pression d'injection pendant le cycle d'injection et la présence d'un défaut sur la pièce. L'étude est une simulation visant à évaluer la méthode de résolution de problèmes des régulateurs, aussi elle se limite aux seuls défauts de manque de matière, retrait, retassure ou brûlure. Le profil de la courbe de la pression d'injection est utilisée par les techniciens-régulateurs pour déduire les caractéristiques des phases d'injection, de maintien et de refroidissement ($C_2 - 3$). L'étude évalue la réaction des techniciens-régulateurs à 17 situations différentes : lorsque les défauts sont visibles sur la pièce, ou lorsque la présence du défaut est déductible à partir de la courbe. Certains techniciens-régulateurs réalisent le réglage des paramètres sans étudier la courbe. Deux techniciens-régulateurs sur le panel de

huit obtiennent des résultats plus élevées que les autres car ils étudient systématiquement la courbe de pression d'injection ; de plus l'étude montre qu'ils ont une stratégie de réglage répétable. Les six techniciens-régleurs restant n'étudient pas ou analysent mal la courbe ; l'étude montre qu'ils n'ont pas de stratégie de réglage. Les résultats de cette étude montrèrent que la cause principale des différences de réaction entre régleurs est liée à la difficulté de lecture de cette courbe. En revanche, les causes de chacun des défauts sont connues de l'ensemble des régleurs formés ou non. Nous tirons de cette étude quatre informations à propos de la méthode de détermination du point de fonctionnement :

- les techniciens-régleurs ont appris par la pratique les relations entre les défauts et leurs causes,
- les techniciens-régleurs observent la pièce pour déterminer la présence de défauts,
- l'analyse du profil de la pression d'injection permet de mieux régler.

Néanmoins, il existe de nombreuses autres caractéristiques qui peuvent être analysées, en particulier l'évolution de la température et la pression dans le moule. De plus, le panel (8) de cette est faible, ainsi que le nombre de situations évaluées (17). Suite à cette étude, nous remarquons que des systèmes d'assistance au réglage sont aujourd'hui déployés dans l'industrie. Ils proposent de calculer des indicateurs de l'état du procédé, ce qui permet d'éviter les difficultés de lecture de la courbe de pression, mais également des nombreuses autres caractéristiques du procédé qui sont difficile à interpréter.

A.1.1 Apport des systèmes experts

Dans la littérature, des systèmes experts ont été utilisés pour choisir des paramètres initiaux, afin de produire des pièces plus rapidement, lors d'une mise en place d'une production. Un système expert s'appuie sur une base de connaissances : un ensemble de relations causales pondérées, qui a été construit à partir des connaissances humaines et des connaissances théoriques du procédé. La base de connaissance représente souvent des règles empiriques. Un moteur d'inférence applique des règles logiques à partir des connaissances et en déduit de nouvelles connaissances, ce qui permet de répondre afin de choisir des paramètres.

Les performances de ces systèmes sont parfois validées par des simulations numériques [Jan92]. En 1993, KAMEOKA, HARAMOTO et SAKAI vérifièrent que le système expert est capable de proposer des réglages identiques à ceux d'un technicien-régleur de niveau moyen [KHS93]. Des systèmes hybrides peuvent être constitués de règles empiriques et de cas d'applications spécifiques [SS97]. Ces systèmes simulent une démarche de réglage humaine basée sur la connaissance de relations linéaires simples entre les paramètres du procédé. BOZDANA et EYERCIOĞLU proposèrent une base de connaissances de 623 presses à injecter et 27 matériaux différents [BE02]. Ce système expert permet de sélectionner le couple machine-matériau le plus approprié, pour une pièce donnée.

A.2 Régulation du point de fonctionnement

Diminuer la dispersion d'un procédé de production permet de limiter les rebuts. Pour cela, il est nécessaire de maîtriser le procédé. Il est possible d'asservir les paramètres réglables pour garantir que le procédé reste sur le point de fonctionnement défini. Cependant, asservir un procédé non linéaire aux multiples commandes et sorties est compliqué. La littérature de la théorie du contrôle automatique propose de nombreux travaux appliqués aux productions industrielles. Les recherches aboutissent souvent à des solutions commerciales. Dans ce domaine d'étude, nous

notons le dynamisme du secteur de la chimie de synthèse. La régulation du procédé s'appuie sur l'analyse de la transformation de la matière, qui change d'état au court du cycle. Les contraintes qui lui sont appliquées pendant le cycle conditionnent son état final. Le produit final correspond à la pièce sortie de la machine, après une durée de stabilisation, durant laquelle des modifications géométriques peuvent se produire (par exemple des déformations liées aux contraintes internes qui se relâchent). Les premiers développements ont porté sur la régulation de paramètre unique.

A.2.1 Utilisation de l'automatique

Dès 1975, un asservissement a été breveté par LACZKO, sous la forme d'une consigne sur la viscosité de la matière [Lac75]. La pression mesurée dans l'outillage permet de réguler la pression hydraulique qui est appliquée pendant le cycle d'injection, afin de garantir une consigne sur la viscosité de la matière. Cette asservissement est hydraulique et ne nécessite pas de micro-contrôleur.

Dans la littérature, la caractéristique la plus étudiée est la masse de la pièce (C_0 Figure A.1). Le paramètre du procédé qui est le plus étudié pour la régulation est la pression dans l'outillage [AKP85 ; Kam+87] (P_3 Figure A.1). Sur ce sujet, ABU FARA a évalué l'utilisation des régulateurs Proportionnel Intégrateur et Proportionnel Intégrateur Dérivateur [Abu88]. Dans son travail de doctorat, le système hydraulique du vérin d'injection de la presse a été modifié pour inclure deux servovalves, afin de piloter la pression d'injection. Cela permet d'asservir la pression qui est mesurée directement dans le moule à une consigne. Les valeurs des correcteurs Proportionnel, Intégrateur et Dérivateur ont été choisies à partir de simulations. Les expérimentations montrent que la valeur de la pression dans l'outillage a un comportement non linéaire. La régulation a été effectuée à l'aide d'un gain échelonné sur la servovalve, selon la valeur de la pression. Ce procédé de régulation provoque néanmoins des oscillations de pression à la fin de la phase d'injection, car la commande de la valve est binaire.

En 1987, AGRAWAL, PANDELIDIS et PECHT [APP87] a réalisé un état de l'art du contrôle du procédé d'injection-moulage, dans lequel ils indiquent que les régulateurs Proportionnel Intégrateur (PI) et Proportionnel Intégrateur Dérivateur (PID) sont difficilement utilisables. En effet, les auteurs estiment que le procédé d'injection-moulage n'atteint jamais un régime permanent; les paramètres du procédé doivent régulièrement être ajusté afin de compenser les dérives, c'est pourquoi les coefficients des régulateurs PI et PID devraient être ajustés régulièrement. Ils concluent sur l'intérêt des contrôleurs autorégulateurs, contrôleurs optimaux et contrôleurs prédictifs. Cependant, ces contrôleurs ne réagissent qu'à une unique variable du procédé; alors que le procédé d'injection-moulage à des interactions multivariées. Nous remarquons que les contrôleurs uni-variés entraînent un risque pour la robustesse de la régulation, car ils ne prennent pas en compte les interactions entre les paramètres. Le risque est de dérégler le procédé. Le contrôleur uni-varié peut appliquer une correction idéale pour une variable, mais cette correction sera erronée pour les autres variables, d'où l'effet opposée qui dérèglera le procédé. Enfin, AGRAWAL, PANDELIDIS et PECHT défend l'idée que les caractéristiques de la matière fondue doivent être mesurées en direct, plutôt que de mesurer des variables de la machines; cela permet de limiter les erreurs dû aux mesures indirectes. Nous qualifions ces méthodes de mesure "invasives" pour le procédé. Elles nécessitent une intégration compliquée au sein de l'outillage. Nous discutons dans le Chapitre 2 des différentes méthodes de mesures des variables du procédé et de la notion d'invasivité.

Par la suite, ABU FARA, KAMAL et PATTERSON ont développé une méthode de régulation de la pression dans le moule qui est capable de rejeter des perturbations externes, tel que la variation des propriétés du polymère et de la matière fondu (P_1 et P_2 Figure A.1) [AKP90]. L'étude ne s'intéresse qu'à la régulation de la pression dans le moule. Les auteurs ont proposé comme perspective l'utilisation du contrôle multivarié et du contrôle adaptatif.

En 1995, KAZMER et BARKAN a proposé le système *Dynamic Feed Control* afin d'équilibrer

le débit d'injection de la matière pour les moules multi-empreintes (P_3 Figure A.1) [KB95]. Plusieurs valves permettent de réguler la pression dans chacune des empreintes, pendant l'injection. Les résultats obtenus ont montré une réduction de 75% de la variabilité de la masse des pièces produites. La capacité long terme (Ppk) du procédé est augmentée de 0,52 à 1,67. Ce système demande un développement spécifique de l'outillage du moule. Il est néanmoins très utilisé aujourd'hui dans l'industrie.

Des travaux se sont intéressés à la régulation de la température de la matière fondue (P_4 Figure A.1), par KAMAL, PATTERSON et GOMES [KPG86; GPK86], puis par GUSTAFSON et LEBOW [GL87]. La vitesse d'avance de la vis lors de l'injection (P_3 Figure A.1) a également été régulée par PANDELIDIS et AGRAWAL [PA88]. Une boucle de régulation Linéaire Quadratique (commande LQ) a été conçue et ses paramètres identifiés. Les résultats expérimentaux ont montré de meilleures performances qu'avec une régulation PID. Le temps de réponse aux perturbations est notamment plus court.

A.2.2 Apport du contrôle adaptatif

Le contrôle adaptatif¹ est expérimenté en injection-moulage dès 1983 par SANSCHAGRIN [San83]. Dix paramètres sont régulés (P_4 , P_3 , P_2 Figure A.1) et trois caractéristiques sont mesurées : masse de la pièce (C_0), pression maximale dans la cavité (C_2), écartement maximal du moule (C_2). L'algorithme d'identification utilise la méthode des moindres carrés généralisés². La température du fourreau (P_4 Figure A.1) n'a pas été prise en compte dans cette étude. L'auteur justifie cette absence car une modification de la consigne de la température du fourreau est effective après un retard de dix cycles d'injection, à cause de l'inertie thermique de l'outillage. Trois séries d'essais sont réalisées. Chaque série d'essais ne s'intéresse qu'à quatre paramètres sur les dix possibles. Nous remarquons que cette démarche peut créer des corrélations statistiques biaisées. Aussi, il aurait été préférable de réaliser l'analyse de l'ensemble des facteurs lors d'un même essai. L'essai est réalisé pour des pièces à paroi fine (1 millimètre) et des pièces à paroi épaisse (4 millimètres). Les variations obtenues montrent qu'il est plus difficile d'obtenir une répétabilité de la masse sur les pièces épaisses. Le paramètre le plus influent sur les pièces est la pression de maintien. À la suite des essais, les trois paramètres les plus influents ont été retenus pour implémenter une régulation en boucle fermée. Suite à la régulation de ces trois paramètres, la masse des pièces varie de 0,4% à 3,6% et de 0,3 à 0,1% sans la régulation ; soit une diminution de la variation proche d'un facteur dix.

Dans ses travaux de doctorat, DEVOS réalise une étude exhaustive des paramètres du procédé qui influent sur la qualité géométrique des pièces [Dev90]. Il utilise un correcteur PID pour réguler la pression du vérin d'injection, à partir de la pression mesurée à l'intérieur de l'outillage. Avec ce système, la variabilité géométrique et la variabilité massique sont diminuées de moitié. L'étude conclut que la pression maximale dans l'outillage (C_2 Figure A.1) est une mesure qui peut être choisie comme variable de contrôle du passage de la phase d'injection, à la phase de maintien : c'est le point de "commutation".

Dans ses travaux de doctorat, TSOI compare différents contrôleurs pour réguler la vitesse de l'avance de la vis, à partir du mesurage de la pression dans l'outillage [Tso97]. Il propose l'utilisation de contrôleurs à logique floue, afin de suivre un profil de vitesse. La logique floue permet de modéliser sous forme continue des relations empiriques, définies à la manière des systèmes experts. HUANG et LEE [HL00] contrôlent la vitesse d'avance de la vis afin de réguler la pression qui est mesurée dans la buse, pendant les phases d'injection et de maintien (C_3 et C_2 Figure A.1). Il n'y a pas d'évaluation numérique des performances. Les expériences sont

1. Le contrôle adaptatif est développé dès 1979 par LANDAU ; EGARDT [Lan79; Ega79]

2. L'algorithme des moindres carrés généralisés qui est utilisé dans le travail de SANSCHAGRIN a été initialement implémenté en 1976 par BETHOUX pour l'étude de la fabrication de papiers et de la distillation [Bet76]

compilées dans des graphiques de réponses à une commande de pression définie. Les graphiques montrent la réponse satisfaisante du contrôleur à la suite d'un changement d'outillage et à la suite d'un changement de température du fourreau.

La régulation du procédé d'injection-moulage est une thématique d'étude riche. L'utilisation d'une grande variété de contrôleurs uni-varié ou bi-varié a été proposée. Cependant, la régulation de l'ensemble des variables du procédé n'a jamais été proposée. Nous posons l'hypothèse que la cause est dû à la complexité de la modélisation du système complet.

A.2.3 Apport de la modélisation par réseaux de neurones

Plusieurs travaux proposent de modéliser une partie du procédé d'injection-moulage par un réseau de neurones afin de réguler certains paramètres du procédé. Nous détaillerons la théorie des réseaux de neurones dans le Chapitre 3 §E.2.6.

DEMIRCI, COULTER et GÜÇERI régule la vitesse d'avancée du front de la matière fondue à partir des mesures de la pression d'injection (P_3 Figure A.1) [DCG97]. WOLL et COOPER [WC97] propose de réguler deux variables du procédé : la pression d'injection et la température du fourreau (P_3 , P_2 Figure A.1), afin d'obtenir un profil d'évolution de la pression dans le moule déterminé. Un réseau de 36 neurones d'entrées, 3 neurones intermédiaires et 2 neurones de sorties est retenu. Le modèle prend en entrée un échantillon de 36 valeurs discrètes du profil de pression et calcule en sortie deux dimensions de la pièce qui sera produite. Le réseau de neurones modélise cette relation à partir d'un jeu de données de 81 profils de pression. Ces profils ne sont pas obtenus par expérimentation, mais ils sont simulés par un modèle théorique simplifié du procédé. Le réseau de neurones approxime la simulation. Les dimensions des échantillons obtenues expérimentalement avec cette régulation sont mesurées à l'aide un pied à coulisse digital, plusieurs jours après la production. L'utilisation du réseau permet de régler et réguler le procédé afin d'obtenir la valeur souhaitée sur une longueur. Les auteurs concluent sur la nécessité d'utiliser un modèle multivarié non linéaire pour modéliser le procédé d'injection. Les réseaux de neurones sont particulièrement adaptés à cette tâche.

MICHAELI et SCHREIBER régulent la pression dans l'outillage (C_2) [MS09]. La pression d'injection est régulée (P_3) afin de suivre le diagramme Pression-Volume-Température, de transformation du matériau pendant l'ensemble du cycle. Un modèle par réseau de neurones dispose d'une base d'apprentissage de 15 cycles d'injection-moulage avec différentes configurations de réglages. La température de la matière dans le moule est mesurée par capteur infrarouge (C_2 Figure A.1). Avec la mise en place de cette régulation, les résultats expérimentaux montrent qu'une augmentation de 20°C de la température de la matière fondue ne cause qu'une augmentation de 0,07% de la masse de la pièce ; ce qui est négligeable. En comparaison, la même augmentation, sans la régulation, entraîne une diminution de 1.27% qui n'était pas acceptable.

A.3 Détection de situations hors-contrôles

Les variations des caractéristiques observées sur des produits peuvent avoir différentes origines. Selon la terminologie de SHEWHART définit dans "Economic Quality Control of Manufactured Product" [She30], l'origine des variations se classent en deux catégories : les causes communes et les causes spéciales. Les causes communes proviennent de nombreuses sources de perturbations aléatoires. Elles sont inhérentes au procédé. Elles entraînent une dispersion selon une loi Normale des caractéristiques des pièces produites. En revanche, les causes spéciales entraînent des écarts de caractéristiques qui dépassent la dispersion aléatoire. Les causes spéciales doivent être détectées, puis leurs origines devront être identifiées. Dès 1997, SHERBELIS et al. proposent

de définir une fenêtre acceptable dans laquelle les caractéristiques du procédé doivent se situer [She+97]. Cela permet de prendre en compte la variabilité naturelle du procédé.

En 1991, la *Society of the Plastics Industry* [Ber91] définit la tolérance dimensionnelle acceptable, en injection-moulage, dans un intervalle de 0,2% à 0,4% des dimensions attendues. En 2010, KAZMER et al. étudie différents procédés de régulation [Kaz+10]. Il observe, quel que soit la méthode utilisée, une dispersion des dimensions inférieure à 0,3%. Il conclut que les tolérances précédemment proposées peuvent être dépassée avec des machines modernes et des stratégies de régulations avancées. Les tolérances générales attendues en injection-moulage sont définies par l'Association Française de NORmalisation (AFNOR) [Nor87]. La récente norme ISO20457 ([ISO18]) reprend en grande partie cette norme établie par l'AFNOR. Elle spécifie également la méthode de calcul à employer pour le défaut géométrique de retrait après le refroidissement (ce défaut est aussi appelé diminution des dimensions, rétractation ou *shrinkage*). La norme définit également les causes externes possibles à la variation des dimensions (météorologie, contraintes mécaniques extérieures), ainsi que les causes liées au procédé (mauvais calcul du retrait, déformation de l'outillage, usure de l'outillage). Les conditions sont également spécifiées : mesures à réaliser entre 16 et 72 heures après la production, une fois que les pièces ont été stockées à $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et $50\% \pm 10\%$ d'hygrométrie. La normalisation des tolérances permet de connaître l'amplitude à surveiller. Dans le cadre de notre travail, nous travaillons en particulier sur le contrôle d'un défaut d'aspect dont la cause est géométrique : le défaut de retassure. L'ordre de grandeur de ce défaut est de l'ordre de la dizaine de micromètres, pour des pièces qui peuvent atteindre plusieurs mètres. Ainsi, la tolérance requise pour limiter ces défauts est trois ordres de grandeur plus grande que les tolérances requises dans les normes. Dans le Chapitre 2 nous présenterons la méthode que nous avons retenu pour la mesure de ce type de défaut.

A.3.1 Analyse en Composante Principale

Une presse instrumentée moderne fournit une quantité d'informations conséquente sur ses paramètres propres, de même que sur l'état de la matière. Ces données sont produites pour chaque cycle. L'Analyse en Composantes Principales §3.2.4.3 (ACP) permet de réduire la dimension des données. Cette méthode est employée par plusieurs travaux en injection-moulage des thermoplastiques. LU et al. [Lu+04] réalisent une ACP sur des résultats de mesure pendant soixante cycles d'injection, pour seize variables du procédé (C_0, C_1, C_2 Figure A.1). Le regroupement des composantes principales fait apparaître quatre phases distinctes, dont deux phases transitoires. Cette division correspond bien aux phases du procédé définies dans l'industrie : injection, maintien, refroidissement, plastification. Une analyse détaillée, phase par phase, montre que la température du fourreau n'est pas corrélée avec les autres variables du procédé. Enfin, des variables qui ne sont pas importantes sont identifiées. Trois défaillances sont alors introduits en production : une variation de la composition de la matière, une défaillance du capteur de régulation de la température du fourreau et une défaillance de la valve anti-retour de la buse d'injection. Ces trois défaillances sont communes en injection-moulage. Les trois défaillances sont détectées en temps réel, par un test T^2 de HOTELLING [Hot33] sur les composantes de l'ACP.

A.3.2 Maîtrise Statistique des Procédés

Les travaux fondateurs de la Maîtrise Statistique des Procédés (MSP, *Statistical Process Control*) sont réalisés dès 1930 [She30 ; She31]. En 2003, PILLET, MAIRE et BRONET proposent des principes pour adapter la MSP au procédé d'injection-moulage [PMB03]. Le choix des variables à contrôler peut se faire sur les paramètres du procédé et sur les caractéristiques du produit. Il est recommandé de choisir peu de caractéristiques. Celles-ci doivent être les plus représentatives possibles des défauts à surveiller. Enfin, il est recommandé de choisir des caractéristiques faciles à mesurer. Le procédé d'injection-moulage est capable de produire une pièce toutes les 30 secondes, soit 120 pièces par heures. Ce risque est généralement défini à

plus ou moins trois fois l'écart-type de la distribution de la grandeur surveillée. Dans le cas de l'injection, cela correspondrait à une fausse alarme toutes les 2,5 heures, soit 0,27% de pièces hors-contrôles. Cette fréquence est trop élevée, c'est pourquoi les auteurs recommandent d'ajuster le risque à 4,5 fois l'écart-type, soit 0,00068% de pièces hors-contrôles, soit une pièce toutes les 992 heures de production. Cette démarche diminue drastiquement l'intervalle de tolérance acceptable pour le procédé. En cas de détection de situation hors-contrôle, il est recommandé d'écarter les pièces concernées. En cas de répétition de cette situation hors-contrôle sur plusieurs pièces, il est recommandé d'arrêter la machine et de faire intervenir le technicien-régleur.

En 2008, KAZMER, WESTERDALE et HAZEN étudie l'utilisation de la démarche MSP [KWH08]. Il évalue séparément la mise sous contrôle statistique des variables de la machine (P_1 , P_2 , P_3 Figure A.1) et la mise sous contrôle statistique des grandeurs mesurées dans l'outillage (C_1 et C_2). Les paramètres du procédé sont perturbés suivant un plan d'expériences §2.1.1. Néanmoins, les recommandations de PILLET, MAIRE et BRONET [PMB03] ne sont pas prises en comptes : la mise sous contrôle n'est pas réalisé sur les variables les plus pertinentes.

En 2016, LIU, LIU et ZHANG évaluent un algorithme à fenêtre mobile, afin d'identifier les différentes phases du procédé avant d'appliquer le contrôle MSP [LLZ16]. ZHANG et al. [Zha+16] propose de limiter la surveillance aux seuls paramètres du procédé (P_2 Figure A.1), afin d'éviter d'instrumenter l'outillage. Il se contraint à utiliser les valeurs du système de régulation de la presse à injecter : la pression hydraulique et la position de la vis dans le fourreau. L'objectif est de prédire les variations de la masse des pièces (C_3). La méthode proposée atteint 91,48% de prédiction de variations de la masse des pièces. Cette méthode obtient de meilleures performances que l'ACP.

A.4 Pilotage des caractéristiques de la pièce produite

Le pilotage d'un procédé demande dans un premier temps de détecter les situations hors-contrôles. Dans le cas où le procédé n'est pas dans sa configuration cible, on mesure l'écart entre la situation hors-contrôle et la situation cible. Puis on ajuste un ou plusieurs paramètres réglables du procédé, afin de se rapprocher de la situation cible. Plusieurs stratégies de pilotage ont été proposées dans la littérature. Certaines utilise une modélisation physique simplifié du procédé, d'autres s'appuient sur une base de connaissance préétablie ou utilisent une analyse statistique. Ces systèmes reposent sur l'instrumentation de la presse et de l'outillage pour mesurer les conditions appliquées au polymère. L'évaluation des performances de ces stratégies passe par la mesure de dispersions des caractéristiques des produits. Dans une démarche pragmatique, le pilotage des caractéristiques du produit peut également se réaliser en mesurant directement les caractéristiques des produits (C_1 et C_0 Figure A.1). Dans le cadre de nos travaux, nous mesurerons la qualité des pièces juste après la sortie de l'outillage (C_1). Notre démarche de mesure est présentée dans le Chapitre 2.

En 2001, KAZMER et DANAI synthétisent les avancées réalisées dans le cadre du pilotage du procédé [KD01]. Ils définissent deux contraintes principales au développement du pilotage :

- la méconnaissance des relations entre les paramètres d'entrées et les caractéristiques finales du produit (P_i et C_i Figure A.1),
- le manque de possibilité d'ajustement des réglages du procédé.

Ils argumentent que l'amélioration d'une caractéristique du produit se fera souvent au détriment d'une autre caractéristique, ou bien par l'augmentation des coûts de produit. Cette contrainte de coût est courante pour les productions industrielles à faible marge.

L'ajustement statistique des procédés (*Statistical Process Adjustment*) est un domaine situé à l'intersection de la régulation automatique et de la Maîtrise Statistique des Procédés. Ce domaine

d'étude étudie les relations entre les paramètres du procédé et les caractéristiques du produit, par une approche statistique. Un exemple de relations entre les paramètres du procédé d'injection-moulage, qui conditionnent les caractéristiques de la pièce produite, concerne la vitesse d'avance (P_3 Figure A.1). Celle-ci est liée à la viscosité de la matière (C_3) et elle définit le débit d'injection (P_3).

Il y a également une influence des paramètres du procédés sur la structure interne de la pièce. Les travaux de doctorat de GIROUD étudie l'influence des paramètres du procédé (P_3) sur les contraintes internes (C_1) [Gir01]. Le profil de pression appliqué à la pièce pendant la phase d'injection conditionne les contraintes internes résiduelles. Ces contraintes seront figées dans la pièce par la modification de la forme et de l'orientation des chaînes de polymères. La relaxation de ces contraintes peut provoquer des déformations géométriques. C'est une des causes principales du retrait, qui apparait plusieurs heures après la production.

A.4.1 Ajustement du procédé à partir de caractéristiques prédites

Il est difficile de mesurer les pièces en sortie de machine. Les causes sont une durée de mesurage trop longue qui est supérieure au temps de cycle, un coût trop élevé ou simplement une mesure non faisable. Excepté pour le dimensionnel, la notion de qualité dans les cahiers des charges est rarement normalisée. Elle nécessite l'interprétation humaine, qui est difficile à programmer dans un ordinateur et également à transmettre entre humains. Le transfert de la notion de qualité de l'expert humain vers le système de contrôle est un des objectifs de notre travail que nous présentons dans le Chapitre 3.2). C'est pourquoi de nombreux systèmes de la littérature ont choisi de prédire les caractéristiques des pièces produites (C_1 Figure A.1) à partir de variables du procédé (P_i). La prédiction obtenue est ensuite utilisée à des fins d'ajustement des paramètres du procédé pour optimiser les caractéristiques du produit.

En 1993, HAEUSSLER et WORTBERG [HW93] utilisent un réseau de neurones pour prédire la masse et la longueur des pièces (C_1 Figure A.1), à partir de paramètres du procédé (P_3, P_2). Le réseau prédit la masse des pièces avec 20% d'erreur et la longueur avec 11,6% d'erreur. Ces résultats sont comparés avec une régression polynomiale d'ordre 3, 25% d'erreur pour la masse et 21% d'erreur pour la longueur. Le réseau de neurones est plus performant que la régression polynomiale d'ordre 3 car c'est une composée de fonctions non-linéaires. Enfin, les auteurs remarquent que le modèle prédictif doit être enrichi au fur et à mesure des cycles, à partir des nouvelles mesures. Le modèle ne doit pas se limiter à modéliser un jeu de données statique. Nous reprenons cette idée dans nos travaux, en proposant un modèle de la notion de qualité qui est enrichi au fur et à mesure de la production §3.2.

En 1996, WOLL, COOPER et SOUDER proposent d'utiliser un réseau de neurones pour prédire la masse des pièces, à partir des profils de pression mesurées dans l'outillage et dans la buse [WCS96]. À partir de la prédiction de la masse, la pièce est acceptée ou rebutée si la masse prédite est trop éloignée de la masse cible. L'écart acceptable à la cible est définie selon la démarche MSP §A.3.2. Le réseau de neurones est appris comme un modèle inverse du procédé. Les profils de pression sont les variables d'entrées (C_2, C_1 Figure A.1) et les variables de sorties sont les consignes de pression de maintien ou de température du fourreau (P_2, P_1). Les paramètres sont ajustés cycle après cycle en comparant le profil de pression courant, avec le profil cible. Le réseau est entraîné sur un jeu de données issues de simulations, afin d'éviter de réaliser une longue campagne d'essais. L'essai est réalisé pour un unique matériau et la caractéristique cible de la pièce est sa longueur. À contrario de cette étude, dans nos travaux, nous avons choisi de mesurer des données réelles sur des machines industrielles. En effet, notre étude de la littérature montre que les simulations du procédé d'injection-moulage sont limitées.

Dans sa thèse, CHEN proposent une méthodologie pour établir le profil de vitesse d'injection optimal (P_3 Figure 1.7) [Che02]. Il modélise également la température du fondu par un second réseau de neurones (P_2). Disposant d'un modèle représentatif, il calcule le profil de température

et la pression à imposer pour la phase de plastification, afin d'obtenir une température définie pour la matière qui sort de la buse (C_3).

En 2004, dans ces travaux de doctorat, YANG introduit l'utilisation du contrôle prédictif pour ajuster la vitesse d'avance de la vis lors de l'injection [Yan04]. Le contrôleur s'appuie sur l'automatique pour la régulation des procédés industriels (aussi appelée *Global Process Control* ou *Engineering Process Control*) qui consiste à utiliser des régulateurs Proportionnels Intégrateur Dérivateurs pour ajuster les paramètres afin d'obtenir des caractéristiques cibles du produit. La masse de chaque pièce est prédite à partir des mesures sur le procédé (C_2, C_1 Figure A.1). À partir de la prédiction, la vitesse d'injection (P_3) est ajustée cycle après cycle. Ce travail montre la limite que pose l'utilisation des servovalves pour ajuster les paramètres du procédé. Les servovalves ont un temps de réponse lent, de l'ordre de la seconde. Ainsi, il est nécessaire d'anticiper la valeur de la consigne. Ce travail montre qu'il est possible d'ajuster les conditions de maintien et de refroidissement afin de compenser la variation de masse prédite. L'auteur conclut sur la possibilité de piloter d'autres caractéristiques des produits, en utilisant la même démarche : les géométries et l'aspect des pièces pourraient être ajustés, sous réserve de pouvoir prédire les caractéristiques.

A.4.2 Ajustement à partir des caractéristiques mesurées sur le produit

La section précédente étudiait la prédiction des caractéristiques des produits. Il est également possible de mesurer les caractéristiques du produit. Dans l'ensemble de la littérature, les caractéristiques mesurées sur les pièces sont limitées à la masse et à quelques cotations géométriques. L'aspect des pièces n'a jamais été mesuré en cycle. La masse est la caractéristique la plus mesurée, car la pesée peut facilement être réalisée pendant le cycle d'injection-moulage. Il suffit de disposer d'un bras robotique préhenseur et d'une balance instrumentée. Les mesures complémentaires de la qualité des produits sont effectuées après de la production d'un lot, mais non pendant le cycle d'injection. Il serait intéressant de réaliser une caractérisation complète de la pièce produite, pendant le temps de cycle, afin de pouvoir optimiser les caractéristiques des pièces suivantes, à partir de ces mesures. La limite à cette démarche est la durée des mesures, qui doit être inférieure au temps de cycle.

En 1998, FOURNIER et al. a proposé un ajustement des paramètres du procédé à partir de la mesure de la masse du produit [Fou+06]. Le matériau qui a été utilisé est le Poly(Téréphtalate de Butylène). C'est un semi-cristallin sensible aux phénomènes de retrait. Le système de l'étude utilise un modèle physique simplifié du procédé pour réguler les paramètres en boucle fermée. Deux perturbations ont été appliquées pendant le cycle : un changement de la matière et un changement de la température dans le fourreau. Afin de limiter les contraintes internes du matériau, les pièces sont passées par un recuit. Les mesures des retraits volumiques et de résiliences (chocs Charpy) ont montré une dispersion de masse réduite de 24% avec l'utilisation du correcteur sur la masse. La dispersion du retrait volumique, mesurée deux jours après la production des pièces, est réduite de moitié. Cependant, une cotation géométrique augmente ; elle correspond à l'épaisseur de la pièce. Après recuit, le retrait volumique est diminué de 12% par rapport à un procédé non régulé. La résilience après recuit est quant à elle augmentée de 23%. Ces résultats obtenus sont encourageants.

Une piste de travail importante serait de considérer les caractéristiques des produits finaux (C_0 Figure A.1) pour ajuster le procédé. Cela nécessitera nécessairement l'utilisation d'un modèle prédictif, car la pièce finale sera obtenue plusieurs heures après son moulage, après son refroidissement.

La même année, IVESTER, DANAI et KAZMER ont proposé une méthode d'ajustement à partir de la mesure des caractéristiques [IDK98]. Les paramètres du procédé sont ajustés par descente de gradient au fur et à mesure de la production (cette méthode est détaillée dans le Chapitre 3 E.2.6). L'étude indique que la caractérisation de la qualité des pièces est réalisée par un opérateur humain. Dans le cadre de nos travaux, nous chercherons à automatiser cette caractérisation.

Cette méthode est néanmoins dépendante des points de fonctionnement initiaux, qui sont choisis aléatoirement. C'est pourquoi, YANG, DANAI et KAZMER propose l'ajustement des paramètres du procédé par optimisation d'un modèle qui lie les paramètres avec les caractéristiques du produit, préalablement établi [YDK00]. Un modèle initial multivarié est définie à partir de la connaissance théorique du procédé. Par la suite, les caractéristiques prédites par le modèle sont comparées aux mesures réelles, et les coefficients du modèle sont ajustés pour diminuer l'écart de la prédiction. Une comparaison expérimentale est réalisée entre le système proposé et un point de fonctionnement optimisé à partir de la réalisation d'un plan d'expériences Central Composite (§D). 7 caractéristiques qualités sont mesurées sur le produit. 5 paramètres sont pilotés sur la machine. Le protocole expérimental est détaillé : les 20 premières pièces de chaque essai ne sont pas prises en compte, en attendant la stabilisation du procédé. Par la suite, 5 pièces sont mesurées 15 à 25 minutes³ après leur sortie du moule pour que leurs caractéristiques géométriques soient également stabilisées. Les résultats de l'étude montrent que le plan Central Composite n'inclue qu'un petit espace de la plage de réglage du procédé. Il est alors difficile de trouver un point de fonctionnement optimal à partir du modèle issu du plan d'expérience. L'étude aurait pu positionner les bornes du plan d'expériences aux limites du procédé. Le système d'apprentissage proposé dans l'étude est capable de trouver un point de fonctionnement satisfaisant en 10 essais, tandis que le plan Central Composite demande 45 essais. L'introduction d'un modèle initial issue de la connaissance théorique du procédé permet de diminuer le nombre d'essais à réaliser pour trouver une solution optimale.

En 2001, LAU et al. propose de réaliser un modèle inverse du procédé, à multiples entrées et multiples sorties, par apprentissage d'un réseau de neurones [Lau+01]. L'objectif est que le réseau suggère des ajustements des paramètres du procédé pour obtenir une pièce cible aux dimensions spécifiées. Les caractéristiques dimensionnelles portent sur trois longueurs et l'épaisseur de la pièce. L'apprentissage du réseau est réalisé sur les mesures récoltés sur 100 pièces, en faisant varier sept paramètres du procédé : la température du fourreau centrale et la température de l'arrière du fourreau, la vitesse de fermeture de l'outillage, la vitesse d'avance de la vis, la force de fermeture, la durée d'injection, la durée de refroidissement, la vitesse d'avance de la vis lors de l'injection et la pression d'injection. Les valeurs des dimensions attendues sont appliquées en entrée du modèle. Ce dernier indique en sortie les valeurs du point de fonctionnement permettant de produire une pièce avec ces dimensions. La démarche du système est alors d'obtenir l'écart entre les paramètres pour les caractéristiques actuelles et pour les caractéristiques cibles, puis d'ajuster les paramètres en soustrayant ces écarts, afin de compenser les variations des caractéristiques pièces. En connaissant le réglage utilisé pour produire les pièces, l'étude propose de régler les paramètres dans des proportions inverses afin de compenser les variations de pièces. Cette démarche suppose que les paramètres sont indépendants, ce qui n'est pas le cas pour le procédé d'injection-moulage.

Récemment, en 2015, [Joh+15] réalise une étude à l'aide d'un plan d'expériences à quinze essais pour douze facteurs, pendant 30 minutes de production par essais, totalisant 942 cycles d'injection-moulage, soit 60 pièces par essais. Pour chaque cycle, une boucle d'optimisation évalue et minimise l'écart à une dimension géométrique cible par un ajustement des paramètres du procédés (P_1, P_2, P_3 Figure A.1). Un objectif de réduction du temps de cycle est ajouté grâce à une pénalité temporelle dans la fonction à minimiser. Un double objectif est atteint : le temps de cycle est réduit et la variabilité des dimensions des pièces est réduite. Les auteurs mettent en valeur l'intérêt de leur méthode qui permet de réduire le nombre d'essais à réaliser pour régler le procédé d'un facteur dix, par rapport à un réglage manuel.

3. Nous remarquons que l'amplitude temporelle de 10 minutes est grande. En effet, si les pièces sont conservées dans le même atelier de production, alors nous pouvons estimer que leur vitesse de refroidissement est identique. Aussi pour une même durée de refroidissement, les caractéristiques seront identiques. Or cette durée de refroidissement varie ici beaucoup. Nous recommandons de mesurer les pièces quelques secondes après la sortie du moule, en maîtrisant le délai de mesure, afin d'éviter d'introduire une erreur.

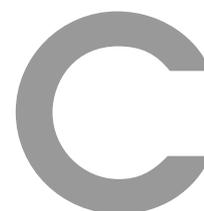
B

Étude technico-économique du mesurage des caractéristiques du produit

Ce tableau permet de mettre en valeur les moyens compatibles avec les contraintes industrielles. Les contraintes majeures sont la durée de la mesure et le coût de la mesure.

Caractéristique	Moyen de mesure	Résolution	Durée	Coût horaire	Coût initial	Coût / pièce
Dimensions géométriques						
1 dimension	Pied à coulisse + opérateur	20 µm	20 s	15 €/h	200 €	12,50 c€/p
1 dimension	Comparateur instrumenté	5 µm	10 s	0,20 €/h	5 000 €	0,16 c€/p
1 dimension	Comparateur laser	1 µm	5 s	0,40 €/h	10 000 €	0,33 c€/p
Profil	Profilomètre laser	1 µm	30 s	0,80 €/h	20 000 €	0,67 c€/p
Profil	Microscopie confocale	0,5 µm	60 s	4 €/h	100 000 €	3,33 c€/p
Surface	Photogrammétrie	50 µm	30 s	0,80 €/h	20 000 €	0,67 c€/p
Surface	Lumière structurée	30 µm	30 s	4 €/h	100 000 €	3,33 c€/p
Surface	Microscopie confocale	0,5 µm	600 s	40 €/h	100 000 €	3,33 c€/p
Volume	Profilomètre/tomographie	10 µm	60 s	2 €/h	50 000 €	0,16 c€/p
Volume	Scanner volumique	100 µm	30 s	2 €/h	50 000 €	0,16 c€/p
Dimensions et densité						
Densité plane projetée	Radiographie	10 µm	20 s	12 €/h	300 000 €	9,99 c€/p
Densité volumique	Tomographie rayons X	10 µm	120 s	40 €/h	1 000 000 €	33,33 c€/p
Champ de températures						
Champ °C	Thermographie	1000 µm	1 s	0,40 €/h	10 000 €	0,33 c€/p
Évolution du champ	Thermographie dynamique	1000 µm	120 s	1,20 €/h	30 000 €	1,00 c€/p
Aspect visuel						
Image couleur	Caméra couleur	200 µm	1 s	0,04 €/h	1 000 €	0,03 c€/p
Réflectance	Dôme de réflectance	50 µm	10 s	0,40 €/h	10 000 €	0,33 c€/p
Propriétés du matériau						
Champ de contraintes	Photoélasticité/polarimétrie	200 µm	1 s	0,10 €/h	3 000 €	0,10 c€/p
Résilience	Essai Charpi	/	60 s	15 €/h	10 000 €	12,50 c€/p
Dureté	Indentation	/	120 s	30 €/h	10 000 €	22,50 c€/p
Élasticité/Plasticité	Traction/Compression	/	120 s	30 €/h	20 000 €	22,50 c€/p
Composition chimique	Spectromètre (UV-VIS-NIR)	/	10 s	0,40 €/h	10 000 €	0,33 c€/p
Structure cristalline	Diffraction X/polarimétrie	/	120 s	30 €/h	20 000 €	22,50 c€/p

Tableau B.1 – Moyens de mesure des caractéristiques d'une pièce.



Économie du secteur de la plasturgie française

Le Tableau C.1 présente la répartition économique industrielle française par secteurs d'activité. Elle indique une marge moyenne de 27% pour le secteur de la plasturgie française, en 2016 [Dir19]. Le chiffre d'affaire moyen par entreprise est de 1,3 millions d'euros en 2016.

Secteurs d'activité*	Nombre d'entreprises	Chiffre d'affaires HT (en Md€)	Valeur ajoutée - y compris produits et autres charges (en Md€)
Industries agroalimentaires	59 765	181	41
Réparation, installation et produits manufacturés divers	56 356	53	20
Bois, papier et imprimerie	28 542	39	11
Métallurgie et produits métalliques	22 007	81	25
Textile, habillement, cuir et chaussures	19 950	21	6
Plastique, caoutchouc et produits minéraux non métalliques	13 529	60	18
Machines et équipements	4 238	48	14
Industrie chimique	3 042	67	18
Produits informatiques, électroniques et optiques	2 814	32	12
Équipements électriques	2 299	29	8
Industrie automobile	1 925	118	19
Matériels de transport hors automobile	895	110	19
Industrie pharmaceutique	644	37	12
Cokéfaction et raffinage	37	34	5
Industrie manufacturière	216 045	908	229

* nomenclature NAF, niveau A38, sauf matériels de transport (A88).

Champ : ensemble des entreprises marchandes, y compris auto-entrepreneurs.

Source : Insee, É sane 2016.

Figure C.1 – Figure issue du rapport annuel de la DIRECTION GÉNÉRALE DES ENTREPRISES : Chiffres clés de l'industrie manufacturière, Édition 2018 [Dir19]



Plan d'expériences

Cette annexe propose une présentation des principales méthodes de construction de plan d'expériences.

Cette annexe est complémentaire de la Section 2.1.1. Nous ne discuterons pas des critères d'optimalité des plans que nous présentons. Nous invitons le lecteur à se référer à cet ouvrage pour étudier cette notion importante pour la construction de plans utilisables. La Figure D.1 représente l'espace de la valeur de trois variables comme un cube. Les valeurs des trois niveaux des variables, obtenues pour différents plans d'expériences, sont représentées par les cercles.

Plan factoriel

Le *plan factoriel* propose une recherche exhaustive de l'effet de la variation de chacune des variables. Lorsque la variation des variables est réalisée sur deux niveaux distincts, il permet de construire un modèle linéaire. Il permet également de rendre compte des interactions entre les variables. Lorsque la variation des variables est réalisée sur trois niveaux distincts, il permet de construire un modèle quadratique. Des modèles d'ordre supérieur peuvent être réalisés mais l'augmentation du k nombre d'essais à réaliser suit alors une loi factorielle 2^k .

Plan central-composite

Le *plan central-composite* (plan de *Box-Wilson*) permet de construire des modèles d'ordre 3. Il a été proposé dès 1950. Il s'appuie sur un *plan factoriel* à deux niveaux. Ce modèle est complété en réalisant des essais pour les valeurs médianes des variables (appelés *essais au centre*). Enfin, on réalise des essais où chaque variable est ajustée indépendamment des autres (*essais axiaux*). Un coefficient α définit la valeur de la variation de la variable par rapport à l'essai au centre. Pour un nombre n de variables à étudier, on choisit généralement $\alpha = \sqrt{n}$. D'autres méthodes de choix de α sont possibles et nous invitons le lecteur à consulter un ouvrage de référence sur la théorie des plans de surfaces de réponses tel que *Response Surface Methodology* [Mye71]. Le *plan central-composite* réduit le nombre d'essais à réaliser en comparaison du *plan factoriel*. Le plan de *Box-Behnken* propose de réduire le nombre d'essais en n'utilisant pas un plan factoriel comme plan de référence. Les plans de PLACKETT et BURMAN [PB46] proposent de réduire le nombre d'essais pour une étude à deux niveaux, dans le cas où le nombre d'essais est un multiple

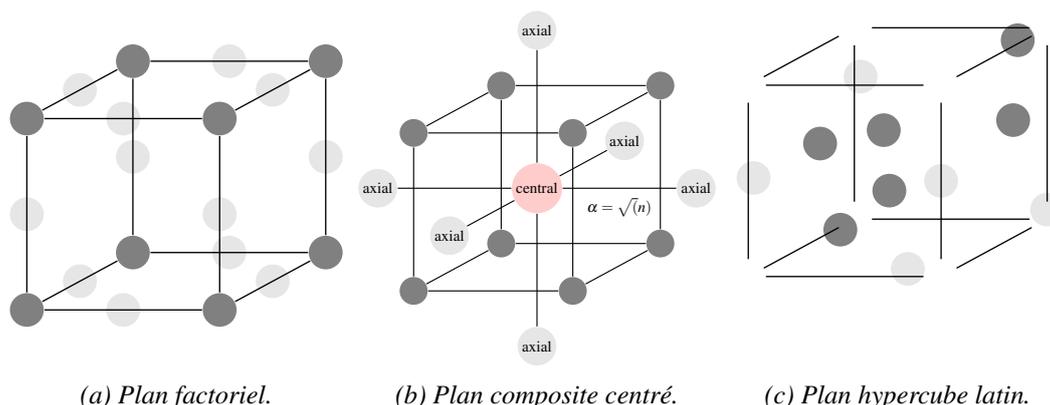


Figure D.1 – Essais prévus pour des plans d'expériences à trois niveaux pour trois variables.

de 4 ($N = 12, N = 20, N = 24 \dots$). Ces plans sont idéaux pour réaliser une étude de nombreuses variables en peu d'essais et construire un modèle linéaire.

Nous utiliserons dans notre étude expérimentale un plan L12 de criblage afin de faire varier le procédé avec peu d'essais. L'objectif sera de produire des pièces dont les caractéristiques sont les plus variées possibles.

Plan hypercube latin

L'objectif de ce plan est de couvrir la plage de valeurs des variables de manière quasi-aléatoire. La méthode de construction de ce plan a été proposée par MCKAY, BECKMAN et CONOVER [MBC79].

Soit une grille à deux dimensions qui représente les valeurs de deux variables que l'on étudie. On positionne sur cette grille des essais. Cette grille est un *carré latin* si elle ne contient qu'un unique essai par colonnes et par lignes. Un *hypercube latin* est la généralisation de ce principe pour une grille à d dimensions. Cette méthode garantit un positionnement quasi-aléatoire des essais dans l'espace de dimensions d . À la différence des plans factoriels §D ou composite centré §D, le nombre d'essais doit être connu pour construire le plan. Cette méthode garantit que les essais soient réalisés sur l'ensemble de la variabilité du phénomène à modéliser ; à la différence d'un tirage aléatoire de la valeur des variables où il n'y a pas cette garantie. Les plans d'hypercubes latins sont les plus utilisés dans la littérature de l'optimisation d'hyper-paramètres.

Il est également possible d'utiliser une séquence quasi-aléatoire pour réaliser le choix des essais. La séquence de SOBOL' [Sob67] est la plus utilisée dans la littérature. Lorsque le nombre de variables est inférieur à 100, elle permet une répartition plus intéressante que les hypercubes latins.

Plan d'expérience L12 de criblage

Nous avons conduit deux expérimentations par plans d'expériences sur des machines industrielles. Dans un premier temps, un plan d'expérience de criblage *L12* a été utilisé : 11 variables sur 2 niveaux [PB46]. L'Annexe D discute de l'intérêt des plans de criblage. Nous avons ajouté deux essais au centre pour étudier la répétabilité du procédé et deux essais de validation. La réalisation pratique de ce plan d'expériences a demandé 4 journées de 8 heures.

	T-four	T-therm	P-main	v-ouve	C-com	v-inj	C-ouv	t-reta	v-rot	P-ferm	C-dos
Essai01	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Essai02	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1
Essai03	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1
Essai04	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1
Centré1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Essai05	-1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1
Essai06	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1
Essai07	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1
Essai08	1	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1
Centré2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Essai09	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	1	-1
Essai10	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	1
Essai11	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1
Essai12	1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1
Centré3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Test1	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1
Test2	-1	-1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1

Tableau D.1 – Plan de criblage *L12* utilisé.



Apprentissage statistique

Cette annexe propose une synthèse de la théorie de l'apprentissage statistique et une présentation des principaux algorithmes traditionnels.

Cette annexe est complémentaire de la Section 3.2. Nous présentons la problématique de la performance d'un classifieur, puis les principaux algorithmes d'apprentissage statistique traditionnels. Dans ce travail de doctorat, nous nous sommes intéressés en particulier aux méthodes de *Deep Learning*, voir la Section 3.2.

E.1 Métrique de performances d'un classifieur

Pour exprimer la performance d'un classifieur, de nombreuses métriques ont été proposées dans la littérature. Une métrique rend compte de l'écart entre la réponse donnée par un classifieur et la vérité. La métrique la plus couramment employée est la justesse définie par METZ [Met78], Équation E.1. Cette métrique est adaptée au cas où de multiples classes j sont présentes dans le problème. Nous rapporterons ici toutes les métriques sur le nombre d'échantillons total.

$$\text{justesse}(y, \hat{y}) = \frac{1}{n_{\text{échantillons}}} \sum_{i=0}^{n_{\text{échantillons}}-1} 1(\hat{y}_i = y_i) \quad (\text{E.1})$$

Le procédé d'injection-moulage des thermoplastiques est stable. Lorsqu'un point de fonctionnement satisfaisant pour obtenir une pièce de bonne qualité est obtenu. La dérive du procédé au cours du temps est de l'ordre de la journée. Ainsi, peu de pièces mauvaises sont produites. C'est pourquoi une population traditionnelle de pièce moulées comportera peu d'individus de mauvaise qualité et une majorité d'individus de bonne qualité. Ainsi, le choix de la métrique d'évaluation des performances doit tenir compte de la répartition non égalitaire des classes dans l'échantillon. La justesse ne prend pas en compte les répartitions inégales des classes dans la population, c'est pourquoi ce n'est pas une métrique adaptée à notre problème [JS02].

E.1.1 Justesse équilibrée

La justesse équilibrée, Équation E.2, est une métrique qui tient compte de ce problème en intégrant une matrice de poids \mathbf{W} qui compense les déséquilibres inter-classes [Bro+10; Mos13]. Dans le cas où la répartition des classes est équilibrée, la justesse équilibrée est égale à la justesse.

$$\text{justesse}_{\text{éq}}(y, \hat{y}, \mathbf{W}) = \frac{1}{\sum \hat{w}_i} \sum_i 1(\hat{y}_i = y_i) \hat{w}_i \quad (\text{E.2})$$

avec $\hat{w}_i = \frac{w_i}{\sum_j 1(y_j = y_i) >_j}$

E.1.2 Matrice de confusion

Dans notre cas industriel, il est crucial de limiter le nombre de faux positifs, c'est à dire le nombre de pièces mauvaises détectées comme bonnes. A contrario, les faux négatifs correspondent aux pièces bonnes détectées comme mauvaises. Sur des pièces moulées en plastique dont le coût de revient est faible, les faux négatifs ne sont pas aussi critiques que les faux positifs pour notre problématique industrielle car la relation client entre en jeu. En effet, les taux de pièces mauvaises acceptés dans les lots par le client sont, pour les plus drastiques des cahiers des charges, de 5 pièces défectueuses par millions. Dans ce cas, il vaudra mieux jeter des pièces bonnes que prendre le risque d'envoyer un lot contenant des pièces mauvaises. Si le coût de revient des pièces est élevé, alors faux positifs et faux négatifs sont à limiter : c'est le zéro défaut. Si la dimension écologique est prise en compte, on cherchera également à atteindre le zéro défaut : jeter des pièces bonnes est une hérésie écologique, qui plus est : produire des pièces mauvaises.

La littérature présente les nombres de faux positifs et faux négatifs sous la forme d'un Tableau E.1, la matrice de confusion.

	Classes vraies	
Classes prédites	Vrais positifs (VP)	Faux Positifs (FP)
	Faux négatifs (FN)	Vrais Négatifs (VN)

Tableau E.1 – Matrice de confusion.

E.1.3 Précision et rappel

La précision et le rappel sont définis à partir de ces valeurs, Équations E.3. Elles renseignent sur la pertinence des résultats.

$$\begin{aligned} \text{précision} &= \frac{|y \cap \hat{y}|}{|\hat{y}|} = \frac{\text{VP}}{\text{VP} + \text{FP}} \\ \text{rappel} &= \frac{|y \cap \hat{y}|}{|y|} = \frac{\text{VP}}{\text{VP} + \text{FN}} \end{aligned} \quad (\text{E.3})$$

E.1.4 F-mesure

La moyenne harmonique de la précision et du rappel est appelé F-mesure. Le facteur β permet

d'ajuster le rapport entre précision et rappel. Lorsque $\beta = 1$, précision et rappel sont également pondérés, on parle alors de F1-mesure.

$$F_{\beta} = (1 + \beta^2) \frac{\text{précision} \cdot \text{rappel}}{\beta^2 \text{précision} + \text{rappel}} \quad (\text{E.4})$$

$$F_1 = 2 \frac{\text{précision} \cdot \text{rappel}}{\text{précision} + \text{rappel}}$$

L'ensemble de ces métriques est généralisable par moyennage, dans le cas où plus de deux classes existent dans la population :

- micro-moyenne : les métriques sont calculées d'après les Équations combinatoires E.3.
- macro-moyenne : les métriques sont calculées pour chaque classes, puis moyennées par l'ensemble des classes.

E.1.5 Courbe ROC

La courbe ROC (*Receiver Operating Characteristic*) représente la caractéristique de performance d'un classifieur. Elle a été proposée en 1940 pour distinguer les vrais positifs du bruit de fond sur les relevés radars. La courbe compare sensibilité (taux de vrais positifs) et spécificité (taux de vrais négatifs) d'un classifieur. La performance est comparée à la réponse d'un classifieur aléatoire. Cette courbe peut servir à choisir la valeur optimale de séparation entre deux classes. Dans notre cas, une valeur milieu, non biaisée est satisfaisante. La courbe E.1 est issue du meilleur classifieur de la qualité obtenue. L'écart-type est calculé par validation croisée, §E.1.6.

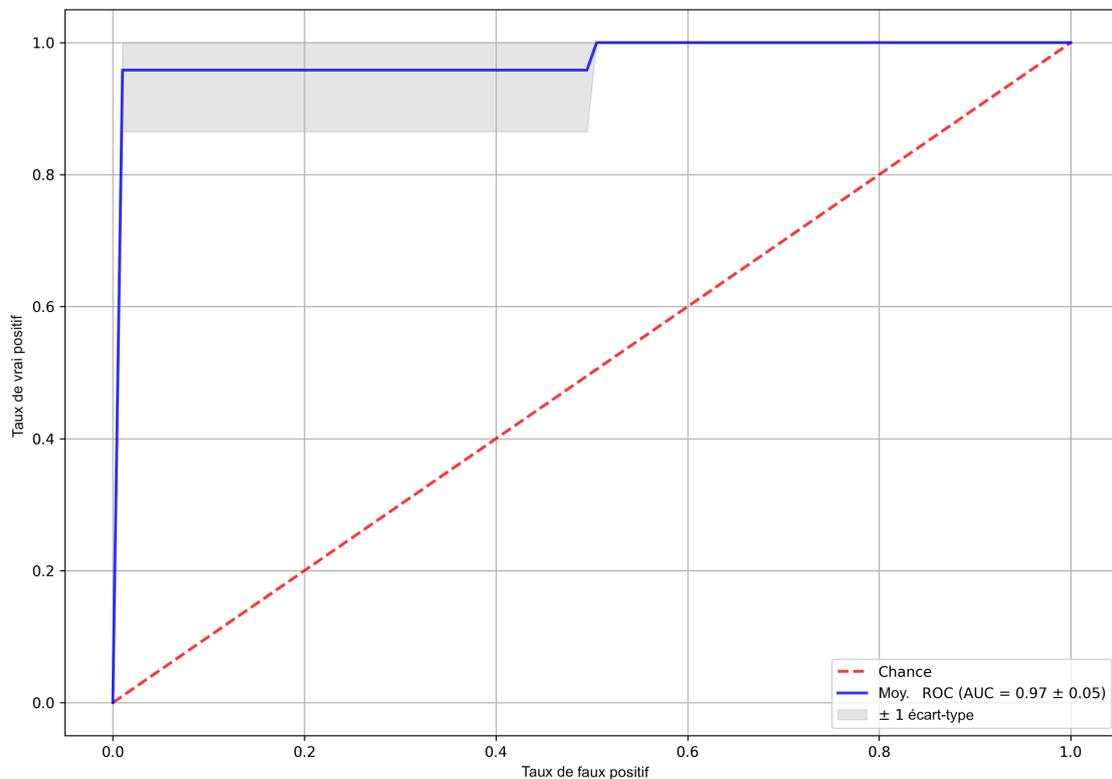


Figure E.1 – Courbe ROC du meilleur classifieur de la qualité des pièces.

E.1.6 Validation croisée pour la comparaison des performances de classifieurs

Pour comparer les performances de classifieurs, nous comparons la valeur des métriques définies précédemment. Les classifieurs sont appris sur un jeu de données d'apprentissage et la performance est mesurée sur un jeu de données de test, qui n'a pas été utilisé lors de l'apprentissage. On réserve traditionnellement 20 pour-cent du jeu de données pour le test. Une limite de cette méthode est le biais potentiel des deux portions. Dans le cas de grands jeux de données (> 2000 par classes), le biais est naturellement limité par la variabilité des données. Dans le cas de jeu de données de plus petites dimensions, il est nécessaire de limiter ce biais. On utilise des méthodes de validations croisées. Il s'agit d'entraîner de multiples modèles sur des portions différentes des données, puis d'observer la moyenne et l'écart-type des performances. Nous présenterons ici la méthode des K -partitions stratifiées par classes (*Stratified K -Folds*), utilisée dans nos travaux. D'autres méthodes existent mais nous retenons cette dernière par sa robustesse au jeu de données où les classes ne sont pas égales. Cette méthode est également extensible aux problèmes à classes multiples. La stratification consiste à associer dans chaque partition une proportion d'échantillons de chaque classe équivalente. KOHAVI conclue ainsi sur l'intérêt de la stratification, en matière de réduction du biais des modèles [Koh95]. Le nombre de partition k est choisi en fonction du nombre d'échantillons disponible. Dans nos problèmes où les jeux de données sont inférieurs à mille échantillons, nous fixons $k = 3$. Dans nos travaux, nous utiliserons l'implémentation de la librairie *Scikit-Learn* [Ped+11]. La Figure E.2 représente l'effet de cette méthode sur un jeu de données.

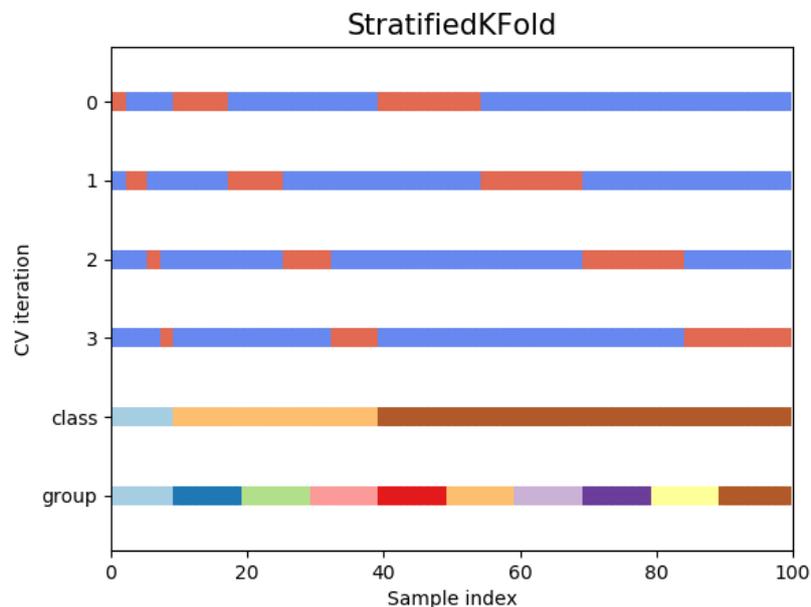


Figure E.2 – Stratified 4-Folds. Figure extraite de la doc *SciKit-Learn*, License BSD 3-clauses.

Lorsque l'on souhaite réaliser un optimisation du classifieur en lui-même (hyper-paramètres), une partition de données de validation est introduite. Chaque classifieur sera entraîné sur le jeu d'apprentissage, puis validé sur le jeu de validation. Enfin, le meilleur classifieur obtenu sera évalué sur le jeu de test, qui n'aura jamais été utilisé ni pendant l'apprentissage, ni pendant l'optimisation. Dans ce cas, le jeu de données est découpé en trois portions présentées dans le Tableau E.2. Nous emploierons cette répartition dans l'ensemble de nos travaux.

Apprentissage	Validation	Test
60%	20%	20%
Apprentissage du modèle	Validation du modèle	Validation du meilleur modèle

Tableau E.2 – Répartition du jeu de données : apprentissage, validation et test.

E.2 Apprentissage statistique traditionnel

Nous présenterons dans cette section les méthodes de classification les plus utilisées dans la littérature. Dans ce travail, nous discuterons de l'intérêt de ces différents classifieurs sur notre application industrielle. La méthode des k-plus-proches voisins est la plus utilisée sur des problèmes de vision par ordinateur. Nous distinguons les classifieurs dits "traditionnels", des classifieurs *Deep Learning* qui utilisent des réseaux de neurones profonds : leur spécificité est de synthétiser dans un seul modèle la méthode d'extraction de l'information et la classification. Ces derniers seront présentés et discutés dans la Section 3.2.1.1.

E.2.1 Machine à vecteurs de support

Soit les couples d'échantillons et leurs annotations de classe binaire associées (\mathbf{x}_i, y_i) . VAPNIK et LERNER [VL63] proposent une solution au problème de classification binaire dans un espace à grandes dimensions, permettant de prédire l'annotation y_i à partir des données \mathbf{x}_i . Une machine à vecteurs de support (*Support Vector Machine*) cherche à trouver l'hyperplan qui sépare au mieux les deux classes (Figure E.3). $\vec{\mathbf{w}}$ est orthogonal à l'hyperplan. L'hyperplan est choisi tel que la distance b entre le plan et les échantillons de $\mathbf{x}_i \in \mathbf{X}$ les plus proches de ce dernier, soit maximale : c'est la recherche de la marge maximale $\frac{b}{\|\vec{\mathbf{w}}\|}$. L'hyperplan obtenu est alors défini par ses vecteurs supports \mathbf{x}_i . CORTES et VAPNIK proposent l'utilisation d'une fonction de marge dite *soft* basée sur le coût de *hinge* [CV95; VGS97]. Ils introduisent un terme de régularisation C . Trouver le classifieur optimal revient alors à la résolution du problème d'optimisation de l'Équation E.5.

$$f_{SVM}(\mathbf{x}_i, y_i) = \arg \min \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \max(0, 1 - y_i (\vec{\mathbf{w}} \cdot \vec{\mathbf{x}}_i - b)) \right] + C \|\vec{\mathbf{w}}\|^2 \quad (\text{E.5})$$

avec $\mathcal{L}_{Hinge}(\mathbf{x}_i - b, y_i) = \max(0, 1 - y_i \cdot (\mathbf{x}_i - b))$

Lorsque les échantillons ne sont pas linéairement séparables, BOSER, GUYON et VAPNIK [BGV92] proposent d'effectuer une transformation φ de l'espace des données, afin de trouver un espace où les échantillons sont linéairement séparables. La transformation φ a pour noyau une forme choisie (c'est le *kernel trick*, proposé par AIZERMAN, BRAVERMAN et ROZONOÉR [ABR64]). Soit \mathbf{c} et φ tel que $\vec{\mathbf{w}} = \sum_{i=1}^n c_i \cdot y_i \cdot \varphi(\vec{\mathbf{x}}_i)$, on a le noyau $K(X, X') = \varphi(X) \cdot \varphi(X')$. Cette démarche de transformation vectorielle est utilisée dans de nombreux autres algorithmes. Les noyaux non linéaires les plus employés sont les noyaux polynomiaux et les noyaux gaussiens de bases radiales (*Radial Basis Function*), Équations E.6. En utilisant le *kernel trick*, un classifieur SVM est alors formalisé par l'Équation E.7.

$$K_{polyn\omicron}mial(X, X') = (X \cdot X' + c)^d, \text{ avec } d \text{ le degré et } c \text{ une constante.}$$

$$K_{RFB}(X, X') = \exp\left(-\frac{\|X - X'\|^2}{2\sigma^2}\right) = \exp\left(-\gamma \|X - X'\|^2\right), \text{ avec } \gamma > 0 \quad (\text{E.6})$$

$$f_{SVM, RBF}(X_i, y_i) = \arg \min \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \max(0, 1 - y_i (\bar{\mathbf{w}} \cdot \boldsymbol{\varphi}(\bar{\mathbf{x}}_i) - b)) \right] + C \|\bar{\mathbf{w}} \cdot \boldsymbol{\varphi}\|^2 \quad (\text{E.7})$$

Le choix des hyper-paramètres C et γ est critique pour obtenir de bonnes performances en matière de justesse et de durée de calcul. C influence la largeur de la marge entre les deux classes. Ce facteur régularise le classifieur et permet sa généralisation à de nouveaux échantillons. C est un facteur qui équilibre la nécessité de trouver l'hyperplan le plus simple possible, et le droit aux erreurs de classifications. Une petite valeur de C encouragera une marge large, ce qui produira un hyperplan simple, mais acceptera des erreurs de classifications. Enfin, γ pondère l'influence d'un unique échantillon sur l'hyperplan.

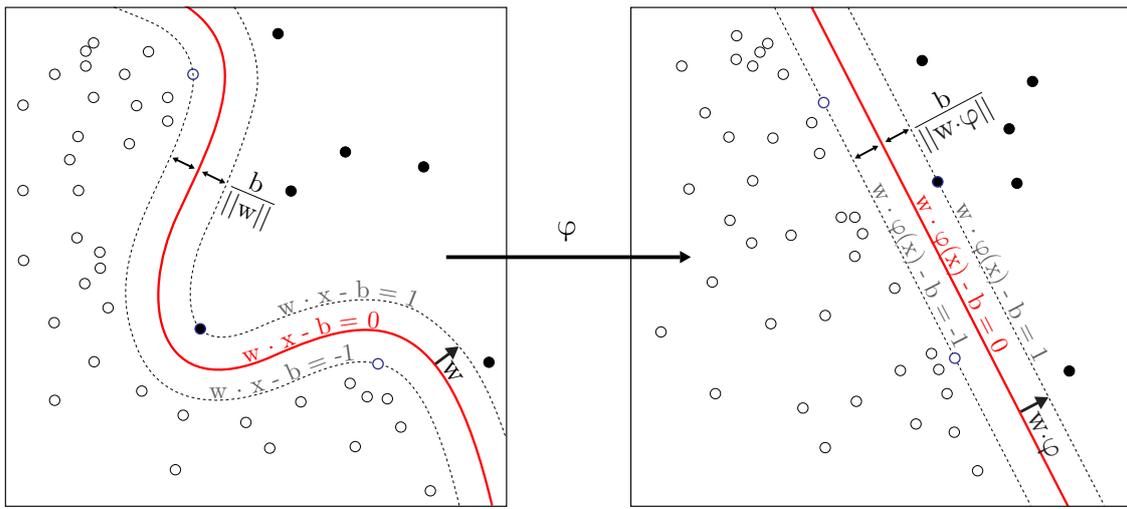


Figure E.3 – SVM avec kernel trick φ .

Figure originale de [Alisneaky](#) © 0, [Wikimedia Commons](#).

La librairie *LIBSVM* [CL11] permet de résoudre le problème avec différents noyaux non linéaires, dans un ordre de grandeur de $O(N^2)$ à $O(N^3)$. Aussi, elle n'est plus utilisable lorsque le nombre d'échantillon dépasse dix mille. Dans nos travaux, nous utilisons la librairie *LIBLINEAR* de FAN et al. [Fan+08], au travers de l'interface de la librairie *SciKit-Learn* de PEDREGOSA et al. [Ped+11]. La complexité de l'apprentissage, avec des noyaux linéaires, est de l'ordre de $O(N)$, avec N le nombre d'échantillons ce qui rend cette méthode intégrable sur des systèmes embarqués modernes aux vues des puissances de calculs aujourd'hui disponibles. L'apprentissage d'un modèle peut être effectué pendant le cycle de production et le système de calcul peut être intégré directement au cœur de l'atelier de production, au plus près du procédé d'injection-moulage.

E.2.2 K-plus-proches voisins

La méthode des k-plus-proches voisins a été proposée par FIX et HODGES [FH51] et développée par COVER et HART [CH67]. Cette méthode est à l'origine de méthodes d'apprentissages non supervisés, par exemple celles basées sur les variétés et l'analyse spectrale. Cette méthode ne cherche pas à construire de modèle générique au problème de classification. Elle enregistre les positions des échantillons du jeu d'apprentissage dans l'espace des données. La classification d'un nouvel échantillon est la classe majoritaire sur l'ensemble des échantillons parmi les k plus proches voisins. Le nombre de voisins k peut être prédéfini ou bien varier à partir de la densité de points (la métrique de distance entre points est souvent la norme Euclidienne ℓ_2). Cette méthode est particulièrement efficace lorsque la séparation entre les échantillons est irrégulière.

E.2.3 Bagging

Le *bagging* (*Bootstrap aggregating*) est une méthode d'association ensembliste de modèles simples afin d'obtenir un méta-modèle aux performances supérieures. Il est défini par BREIMAN [Bre96a]. La technique permet de limiter le sur-apprentissage. Pour un jeu de données \mathbf{X} de taille n , on génère b lots $\mathbf{X}_b \in \mathbf{X}$ contenant $\sim 10 < m < n$ échantillons tirés aléatoirement selon une distribution uniforme. Les échantillons, uniques dans X , peuvent être répétés dans \mathbf{X}_b . Pour chaque lot b , un modèle de l'algorithme choisi est entraîné. La prédiction du méta-modèle final est la moyenne (ou le vote pondéré) de tous les modèles f_b , Équation E.8. Cette méthode d'agrégation de modèles est efficace pour limiter le sur-apprentissage. La méthode est employée dans les *Random Forests* et elle est souvent combinée avec le *boosting* E.2.5. La méthode de référence pour calculer le nombre optimal b de fonctions est la sélection du meilleur score par validation croisée E.1.6.

Une métrique intéressante se base sur la performance individuelle de chaque modèle f_b vis à vis de son jeu de données partiel \mathbf{X}_b . BREIMAN [Bre96a] définit l'erreur *Out-of-Bag* comme la moyenne, de l'erreur de prédiction pour chaque échantillon $\mathbf{x}_{i,b}$, des modèles f_b avec $\mathbf{x}_b \notin \mathbf{X}_b$ qui n'ont pas été entraînés avec les échantillons x_i . Cette erreur est similaire à une erreur de prédiction qui serait calculée sur des échantillons de validation. Elle permet ainsi de se passer de jeu de données de validation. Elle est utilisé par les *Random Forests* E.2.4 pour mesurer l'influence des variables sur la prédiction.

$$f_{boosted} = \frac{1}{b} \sum_{b=1}^b f_b(x_b) \quad (\text{E.8})$$

E.2.4 Forêt d'arbres décisionnels

L'arbre décisionnel est une méthode de classification adaptée au grands jeux de données. Un arbre se compose de branches avec entre chacune d'elle un nœud. Chaque nœud répond à une condition sur une variable d'entrée. Ainsi, le modèle obtenu peut être facilement interprété par l'humain. Le modèle obtenu est cependant peu robuste aux perturbations des variables d'entrée. La complexité du modèle est souvent égale au nombre de variables d'entrée ce qui est une cause de sur-apprentissage. Son utilisation pour des échantillons d'entrée qui comporte une dimension supérieure à dix mille est difficile (par exemple les pixels d'une image). C'est pourquoi HO [Ho95; Ho98] propose un modèle comportant de multiples arbres de décisions (une forêt), chacun entraînés sur une unique partie des variables des échantillons. La prédiction du modèle est donnée par la moyenne des prédictions de l'ensemble des arbres. BREIMAN [Bre01] fait évoluer la méthode : les arbres sont choisis pour ne pas être corrélés entre eux et leurs sorties sont agrégées par *bagging* E.2.3.

Une utilité indirecte de la notion stochastique des forêts d'arbres décisionnels est la possibilité de mesurer l'influence des variables sur le modèle. Lors de l'entraînement, l'erreur *Out-of-Bag* E.2.3 (équivalente à une erreur de prédiction sur un échantillon de validation) est moyennée pour l'ensemble des arbres. C'est l'erreur *Out-of-Bag* de référence, pour chacune des variables j , $e_{ref,j}$. À chaque itération, on permute aléatoirement la position des variables v dans le jeu de données et on calcule à nouveau l'erreur *Out-of-Bag*. Les permutations sont réalisées un grand nombre de fois ($p > 1000$). On obtient l'importance de la $j^{\text{ième}}$ variable en calculant la moyenne de l'erreur sur toutes les permutations e_{perm} de la différence avec l'erreur de référence de la variable : $importance_j = e_{perm,j} - e_{ref,j}$. Il est enfin possible de normaliser la valeur de l'importance par l'écart-type sur l'ensemble des variables pour classer les variables sur une échelle continue $[0; 1]$. Nous utiliserons cette méthode pour sélectionner les variables pertinentes.

E.2.5 Boosting

KEARNS [Kea88] pose l'hypothèse de l'existence d'un méta-classifieur qui utiliserait une association de classifieurs aux performances non optimales (légèrement supérieure à une réponse aléatoire) pour obtenir de bonnes performances : le *boosting*. Dans un tel ensemble, chaque classifieur est ainsi faiblement corrélé avec la totalité des données. SCHAPIRE [Sch90] vérifie l'hypothèse et par la suite BREIMAN [Bre96b; Bre97] développe la méthode. De nombreux algorithmes sont dérivés de cette méthode. Par la suite, MASON et al.; FRIEDMAN [Mas+99; Fri01] proposent le *boosting* avec descente de gradient (*Gradient Boosting*) et FRIEDMAN [Fri02] ajoute une dimension stochastique : *Stochastic Gradient Boosting*. Cette idée est motivée par le *bagging* E.2.3. Chaque classifieurs est entraîné sur des partitions aléatoires différentes du jeu de données, mais sans aucune répétition des échantillons initiaux. Une partition qui a pour dimensions la moitié du jeu de données initial produit une augmentation de performance significative du méta-classifieur. Un des algorithmes le plus populaire dans des compétitions de classification est *XGBoost*. Il est basé sur le *Stochastic Gradient Boosting* d'arbres de décisions binaires. Cependant, les performances de cet algorithme pour des jeux de données où les échantillons possèdent de grandes dimensions (> 1000), comme des images, sont inférieures aux méthodes à réseaux de neurones profonds. La performance de ces algorithmes dépendent de la pertinence de la réduction de la dimension des échantillons, qui doit être implémentée par un humain. Les réseaux de *Deep Learning* dépassent cette limite en apprenant l'algorithme de réduction de dimensions adapté en même temps que l'algorithme de classification. Enfin, les idées issues du *bagging* et du *boosting* sont utilisées dans les méthodes d'apprentissages des réseaux de neurones profonds.

E.2.6 Réseaux de neurones

Le travail de MCCULLOCH et PITTS [MP43] interroge sur la méthode de fonctionnement du cerveau humain : de nombreuses cellules élémentaires connectées entre elles permettent de résoudre des problèmes complexes, ce qui pose la problématique de la recherche Connexionniste. Ils proposent de concevoir des neurones, sous la forme de portes logiques élémentaires. Pour des valeurs d'entrée x_i , un neurone calcule la somme pondérée par une matrice de poids \mathbf{W} , puis si la valeur obtenue est supérieure à une valeur b , la sortie est zéro, sinon la sortie est un, Équation E.9. Cet algorithme permet de convertir des variables continues en valeurs booléennes discontinues. Par la suite, ROSENBLATT [Ros58] propose le *perceptron*, en s'appuyant sur la connaissance de l'époque du système de la vision biologique : de la rétine au cerveau. Le *perceptron* permet d'agrèger à l'aide d'un réseau de neurones à une couche, des données représentant des variables pertinentes extraites d'images (*pre-processing*). La thématique de recherche Connexionnisme sera peu développée par la suite car les ressources informatiques nécessaires sont importantes et les résultats obtenus sont limités en comparaison des attentes de l'époque. Les autres méthodes présentées dans cette section seront préférées, jusqu'aux récents succès du *Deep Learning*, §3.2.1.1.

$$f_{\text{perceptron}}(x_i) = \begin{cases} 1 & \text{si } \mathbf{w}_i \cdot x_i + b_i > 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{E.9})$$

Suite à la proposition de réseaux de neurones à multiples couches successives de FUKUSHIMA [Fuk80], RUMELHART, HINTON et WILLIAMS [RHW85] applique une méthode d'ajustement itératif des poids en utilisant la rétro-propagation de l'erreur. La rétro-propagation de l'erreur s'appuie sur les travaux sur la dérivation automatique des fonctions composées, initiés par LINNAINMAA [Lin76]. De plus, RUMELHART, HINTON et WILLIAMS [RHW85] étend les capacités du réseau à répondre aux problèmes où les données ne sont pas linéairement séparables,

en introduisant des fonctions d'activations non linéaires, en lieu et place de la simple condition inférieure/supérieure. La particularité des réseaux de neurones est leur capacité à modéliser des problèmes fortement non linéaires. La prochaine étape est la construction de réseaux aux architectures plus complexes et l'utilisation de fonctions de convolution. Nous appliquerons ces algorithmes dans la Section §3.2.1.1.

F

Réseau de convolution profond, Deep Learning

Cette annexe propose une présentation complémentaire des méthodes d'apprentissage des réseaux de convolution profond. Nous présentons l'historique des méthodes de Deep Learning, puis la dernière avancées des réseaux résiduels. Enfin, nous détaillons l'ensemble des hyper-paramètres et leurs conséquences sur l'apprentissage et les performances des modèles.

Cette annexe est complémentaire de la Section 3.2. Elle complète la présentation des méthodes d'apprentissage de modèles à réseaux de neurones profonds.

F.1 Historique

Les réseaux de neurones de convolution ont profité de la disponibilité croissante de la puissance de calcul des processeurs graphiques. En 2006, le premier réseau de convolution est implémenté sur processeur graphique par CHELLAPILLA, PURI et SIMARD [CPS06], avec des performances quatre fois supérieures à l'implémentation sur processeur classique. En 2011, un réseau de convolution accéléré sur processeur graphique (60 fois plus rapide) dépasse les performances de l'humain sur une tâche de classification de panneaux signalétiques routiers [Cir+11]. En 2012, le réseau AlexNet de KRIZHEVSKY, SUTSKEVER et HINTON [KSH12] gagne le challenge annuel de classification d'images *ImageNet* [Den+09] avec un très grand écart de 10,8% sur le score, avec l'ensemble des concurrents. La performance d'*AlexNet* (8 couches) est dépassée en 2013 une version identique aux hyper-paramètres optimisés [ZF13], puis en 2014 par *VGG16-19* (16 et 19 couches) [SZ14] et *GoogleNet* (22 couches). Ce dernier est dépassé en 2015, par le réseau *ResNet101* [He+15a] contenant plus de 150 couches. L'architecture massive de ces réseaux évolue depuis 2011 vers des architectures de plus en plus profondes [He+15a] et qui sont plus efficaces sur le plan de la mémoire à allouer et puissances de calculs, mais aussi de plus en plus complexes, §F.2. Les architectures de l'état de l'art de la littérature dépassent aujourd'hui les capacités d'ingénierie humaine ; elles sont générées automatiquement, §3.3.

F.2 Réseaux de convolutions résiduels

Construire des réseaux de neurones aux architectures profondes permet de limiter l'utilisation de couches pleinement connectées, dont les poids sont très coûteux à optimiser. La problématique principale des réseaux profonds est l'entraînement. La rétro-propagation a une faible incidence sur les poids situés les plus en amont du réseau. Cela rend l'entraînement des réseaux aux couches supérieures à dix très difficile. C'est pourquoi des connexions intermédiaires ont été introduites par SRIVASTAVA, GREFF et SCHMIDHUBER [SGS15a; SGS15b] : les *Highway Networks*. Elles permettent à la rétro-propagation d'agir sur toutes les couches, y compris les couches en amont. Cette architecture est inspirée des connexions intermédiaires pondérées des réseaux récurrents *Long Short-Term Memory*. Soit y_{i+1} la sortie d'une couche i qui est composée d'une fonction affine et d'une activation non linéaire f_{i+1} dont les poids sont \mathbf{W}_f . On introduit une connexion intermédiaire T pondérée par une matrice de poids \mathbf{W}_T , Équation F.1. Le poids \mathbf{W}_T détermine si la couche laissera passer l'information ou la transformera. Les auteurs notent que \mathbf{W}_T doit être initialisée à des valeurs négatives afin de débiter nécessairement l'apprentissage de \mathbf{W}_f . Par la suite, f pourra être ignoré au fur et à mesure de l'apprentissage si cela entraîne de meilleures performances. De manière simplifiée, cette architecture permet au réseau d'ajuster sa profondeur optimale, lors de l'apprentissage : si les connexions intermédiaires sont utilisées, le réseau est moins profond.

$$y_{i+1} = f_{i+1}(y_i, \mathbf{W}_f) \cdot T_{i+1}(y_i, \mathbf{W}_T) + y_i \cdot (1 - T_{i+1}(y_i, \mathbf{W}_T)) \quad (\text{F.1})$$

Par la suite, HE et al. [He+15a] propose l'architecture *ResNet* qui est un cas particulier de *Highway Network* où $\mathbf{W}_T \equiv 0,5$, Équation F.2. Les données sont transmises de manière équivalente entre la transformation et la connexion intermédiaire. [He+16] compare les performances des deux méthodes et montre que la plus simple architecture *ResNet* offre de meilleures performances. Cependant, SRIVASTAVA, GREFF et SCHMIDHUBER [SGS15a] montrent que la valeur apprise de \mathbf{W}_T est différente de 0.5. On a particulièrement souvent $\mathbf{W}_T > 0.5$: le réseau a appris à utiliser en priorité les connexions intermédiaires, ce qui simplifie le réseau mais impacte les performances. De plus, les poids \mathbf{W}_T augmentent le nombre de paramètres à apprendre, ce qui pourrait diminuer la performance.

$$y_{i+1} = f_{i+1}(y_i, \mathbf{W}_f) + y_i \quad (\text{F.2})$$

Par la suite, ces idées amènent à l'architecture *DenseNet* [Hua+16] : les connexions intermédiaires sont présentes entre toutes les couches et non plus seulement d'une couche à l'autre. Toutes les couches peuvent alors avoir accès à l'information de bas niveau, comme par exemple l'image originale et combiner cette information pour résoudre le problème. La Figure F.1 présente l'architecture d'un bloc *Dense*.¹ Un réseau complet enchaîne successivement quatre blocs *dense*.

La dernière évolution des réseaux résiduels est l'introduction de multiples blocs dans chaque neurone classiques. C'est l'architecture *ResNext* [Xie+16], une dimension C dite de "cardinalité" qui définit le nombre de bloc présent dans chaque couche. Les auteurs montrent l'intérêt d'une architecture où $c = 32$: chaque bloc est répété 32 fois par neurones.

Les performances sont améliorées bien que cela représente une augmentation conséquente des paramètres du réseau. Dernièrement, MAHAJAN et al. [Mah+18] ont réussi à augmenter les performances sur *ImageNet* en réalisant un pré-apprentissage sur 940 millions d'images issues d'*Instagram*. La capacité (au sens de la théorie VC [Vap92]) du modèle *ResNext* est bien supérieure à la seule base *ImageNet* et un plus grand nombre de données réelles permet d'augmenter les performances, par la généralisation du problème.

1. Les architectures présentées dans ce travail sont générées avec l'aide des scripts développés par IQBAL [Iqb18].

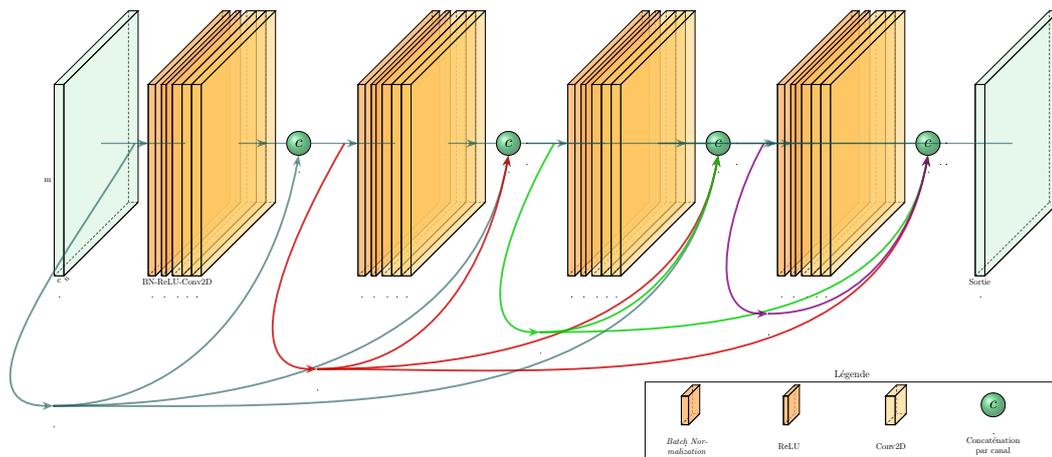


Figure F.1 – Architecture d'un bloc DenseNet.

Cependant, l'augmentation du nombre de paramètres des réseaux n'est pas nécessairement significative de meilleures performances. Dernièrement, le réseau *EfficientNet* dépasse l'état de l'art sur *ImageNet* en diminuant drastiquement le nombre de paramètres ajustables et optimisant sous contrainte l'occupation mémoire et le nombre d'opérations nécessaires. Précédemment, les réseaux *MobileNetV1* [How+17] et *MobileNetV2* [San+18] cherchent à obtenir les meilleures performances sur dispositifs embarqués tels que les smartphones. Il s'agit de limiter le nombre de paramètres et le nombre d'opérations à réaliser (additions et multiplications). *MobileNetV1* obtient une performance supérieure à *GoogLeNet*, avec trois fois moins d'opérations à réaliser. Il égale *VGG19* avec trente fois moins d'opérations et dix fois moins d'occupation mémoire. *MobileNetV1* utilise un bloc de convolution efficace, proposé dans l'architecture *Xception* de CHOLLET [Cho16] : la convolution est effectuée indépendamment sur chaque canal, avec un poids différent pour chaque canal, puis les résultats sont concaténés. Pour une convolution traditionnelle de fenêtre 3×3 , la réduction du nombre d'opérations de calcul à effectuer est d'un facteur 9. *MobileNetV2* ajoute ensuite l'utilisation de connexions intermédiaires entre chaque couche, à la manière des réseaux résiduels. Les performances de ces réseaux sont inférieures à l'état de l'art mais ils permettent d'exécuter l'inférence avec des performances satisfaisantes sur des systèmes embarqués.

F.3 Fonctions d'activations

Pour éviter les deux problèmes de l'explosion ou de l'effondrement de la valeur du gradient pendant l'apprentissage, nous utiliserons dans nos travaux des fonctions d'activation *LeakyReLU*, *PreLU* ou *ELU*, récemment proposées dans la littérature. La fonction d'activation est une non-linéarité qui suit traditionnellement l'opération de convolutions. Elle permet de modéliser une réponse à un problème non linéaire. Les fonctions d'activation historiques sont la tangente hyperbolique et la sigmoïde. NAIR et HINTON [NH10] proposent la fonction *ReLU* (*Rectified Linear Unit*) qui est une approximation de la sigmoïde par trois et obtient de meilleures performances, en diminuant le coût du calcul.

Le principal problème est que la fonction *ReLU* vaut zéro pour des valeurs négatives. C'est pourquoi MAAS, HANNUN et NG [MHN13] introduisent le *LeakyReLU* : une succession de

Fonction	Équation	Dérivée
Sigmoïde	$f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}$	$f(x)(1-f(x))$
Tanh	$\tanh(x) = \frac{2}{1+e^{-2x}} - 1$	$1 - f(x)^2$
ReLU	$\begin{cases} 0 & \text{si } x < 0 \\ x & \text{si } x \geq 0 \end{cases}$	$\begin{cases} 0 & \text{si } x < 0 \\ 1 & \text{si } x \geq 0 \end{cases}$
LeakyReLU	$\begin{cases} 0,01x & \text{si } x < 0 \\ x & \text{si } x \geq 0 \end{cases}$	$\begin{cases} 0,01 & \text{si } x < 0 \\ 1 & \text{si } x \geq 0 \end{cases}$
PreLU	$\begin{cases} \alpha x & \text{si } x < 0 \\ x & \text{si } x \geq 0 \end{cases}$	$\begin{cases} \alpha & \text{si } x < 0 \\ 1 & \text{si } x \geq 0 \end{cases}$
ELU	$\begin{cases} \alpha(e^x - 1) & \text{si } x < 0 \\ x & \text{si } x \geq 0 \end{cases}$	$\begin{cases} f(x) + \alpha & \text{si } x < 0 \\ 1 & \text{si } x \geq 0 \end{cases}$

Tableau F.1 – Fonctions d’activation.

deux droites affines, dont la pente de la droite pour les valeurs négatives est non nulle, mais très faible ($0,01 \cdot x$). Par la suite, HE et al. [He+15b] introduisent le *PreLU* (*Parametric ReLU*) dont un paramètre $\alpha \geq 0$ définit la pente de la droite pour les valeurs négatives. α est appris au cours de l’apprentissage tout comme les matrices de poids du réseau. La valeur de α peut également être indépendante pour chaque canal. Ces fonctions sont discontinues et ne sont pas dérivables en zéro. Cela peut entraîner des problèmes de convergence lors de la rétro-propagation du gradient. C’est pourquoi dernièrement, CLEVERT, UNTERTHINER et HOCHREITER proposent le *ELU* (*Exponential Linear Unit*) qui est dérivable [CUH15]. L’ensemble des graphes de ces fonctions est présenté dans la Figure F.2, leurs dérivées dans le Tableau F.1.

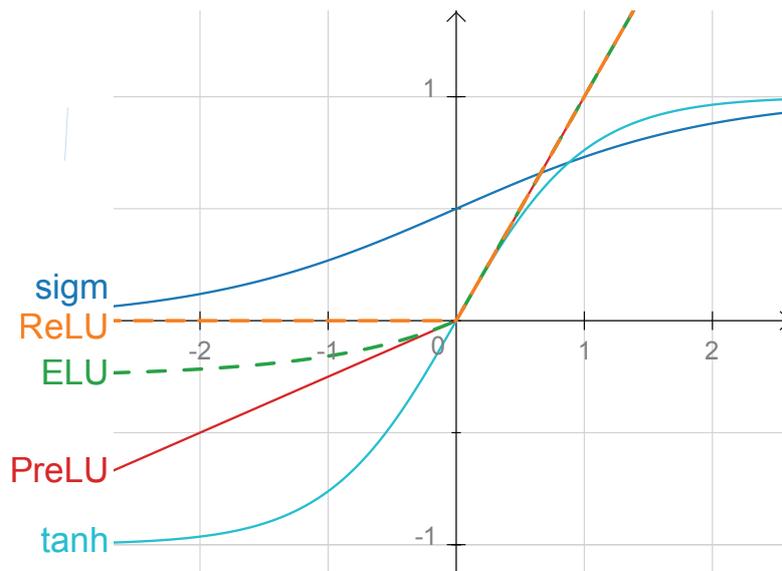


Figure F.2 – Fonctions d’activation.

F.4 Méthodes de régularisation pour limiter le sur-apprentissage

Le nombre de degrés de liberté d'un modèle à réseaux de neurones profonds est supérieur à un million. C'est pourquoi, il est courant que le modèle se spécialise afin d'obtenir un très bon score de justesse sur les échantillons d'apprentissages, mais un mauvais score sur de nouveaux échantillons : c'est le problème du *sur-apprentissage*. Plusieurs méthodes de régularisation permettent de limiter ce problème et nous détaillerons dans cette section les méthodes que nous utilisons. GOODFELLOW, BENGIO et COURVILLE proposent une définition du terme "régularisation", spécifique à l'alchimie du *Deep Learning* [GBC16] :

« La régularisation est toute modification faite à un algorithme d'apprentissage afin que l'erreur de généralisation soit réduite, mais pas l'erreur d'apprentissage. »

F.4.1 Dropout

SRIVASTAVA et al. [Sri+14] proposent l'utilisation d'une couche dite de *dropout* : la valeur de sortie de cette couche est aléatoirement, selon un pourcentage de chances α choisi, fixée à zéro. Le *dropout* est actuellement la méthode de régularisation la plus performante pour limiter le sur-apprentissage. Ainsi, l'optimisation est réalisée sur une mauvaise valeur (zéro) de sortie du modèle pour un pourcentage α d'échantillons d'un *mini-batch*. La valeur de α est souvent fixée entre $[0; 0,5]$. Lors de l'utilisation du modèle pour inférence, la valeur de α est nulle : la couche de *dropout* n'est jamais activée, pour ne pas fausser les prédictions.

F.4.2 Normalisation de lots

La couche de normalisation de lots (*Batch Normalization*) a été proposée par IOFFE et SZEGEDY [IS15]. Elle nécessite l'emploi de l'entraînement par descente de gradient stochastique qui découpe le jeu de données d'apprentissage en *mini batch* répartis aléatoirement. On définit les valeurs x_i en entrée de la couche pour un *mini batch* $B \in X$. On calcule la variance σ_B^2 de l'entrée et la moyenne μ_B . La couche *BN* normalise les valeurs des entrées x_i en \bar{x}_i par la variance et la moyenne de la distribution du *mini batch*, Équations F.3.

$$\begin{aligned} \mu_B &\leftarrow \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i, && \text{Moyenne} \\ \sigma_B^2 &\leftarrow \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (x_i - \mu_B)^2, && \text{Variance} \\ \bar{x}_i &\leftarrow \frac{x_i - \mu_B}{\sqrt{\sigma_B^2 + \varepsilon}}, && \text{Batch normalization} \end{aligned} \quad (\text{F.3})$$

La couche *BN* limite les variations importantes de la covariance des entrées. S'il n'y a pas de normalisation, lors de la rétro-propagation, l'ajustement des poids devra être fait pour chaque distribution différente de *mini-batch*. Avec la normalisation, la sortie aura toujours une distribution normalisée sur zéro et ainsi la valeur des poids à ajuster ne sera pas extrême. IOFFE et SZEGEDY [IS15] suggère d'utiliser en priorité des couches *BN* plutôt que le *dropout*, car ce dernier fait perdre la totalité de l'information du réseau lorsqu'elle est active, ce qui pénalise fortement la vitesse d'apprentissage. Les architectures de réseaux profonds antérieures à 2015 (par exemple VGG16) n'utilisent pas de couches *BN*, alors que la majorité des architectures postérieures à 2015 en utilisent. Lors de l'utilisation du modèle pour inférence, la valeur de μ_B et σ_B^2 est fixée pour tous les *mini batch* : ce sont leurs moyennes respectives sur tous les *mini batch* de l'entraînement.

F.4.3 Arrêt prématuré de l'apprentissage

Cette méthode permet de limiter le sur-apprentissage en stoppant la phase d'apprentissage dès lors qu'il n'y a plus d'amélioration des performances du modèle. Aussi appelé *early stopping* [YRC07], il s'agit de trouver le nombre optimal d'itérations successives pour ne pas sur-apprendre le jeu de données d'apprentissage. Pour cela, le jeu de données initial est séparé en une partition d'apprentissage et une partition de validation. L'apprentissage du modèle est effectué en utilisant la partition d'apprentissage. À chaque itération, la performance du modèle est évaluée sur la partition de validation, inconnue du modèle. Si la performance de validation a été améliorée, alors l'itération d'apprentissage a amélioré le modèle. En revanche, si la performance de validation est moins bonne qu'à l'itération précédente, le modèle a été dégradé pour la partition de validation. C'est pourquoi, il aurait été judicieux de ne pas effectuer cette itération qui a dégradé le modèle, et de conserver le modèle tel que précédemment : c'est ce que réalise le *early stopping*. L'algorithme de descente de gradient peut souvent produire une mauvaise performance pendant quelques itérations avant d'améliorer le modèle, c'est pourquoi on introduit le terme de patience p : le nombre d'itérations qui n'améliore pas le modèle, avant de terminer l'apprentissage. La performance de cette méthode dépendra du choix judicieux de l'hyper-paramètre p , c'est pourquoi il est obligatoire de trouver la valeur de p optimale pour le problème à résoudre, §3.3.

F.4.4 Réduction de dimensions par interpolation

L'idée principale de l'architecture des réseaux de neurones profonds (avant la proposition des réseaux résiduels) est de réduire successivement, à chaque couche, la dimension des vecteurs, afin de réduire le nombre de paramètres des couches. Cela réduit les coûts des calculs et le risque de sur-apprentissage. Les couches de convolutions appliquent un filtre mais ne réduisent pas la dimension. C'est pourquoi elles sont suivies de couches dites de *pooling*. Parmi les nombreuses fonctions de *pooling* proposées, on distingue les deux principales : le sous-échantillonnage par moyenne, et la seule conservation de la valeur maximale, le *max pooling*, Tableau F.2. Cette couche est appliquée sur un certain nombre de valeurs adjacentes. Des dimensions courantes sont de 2×2 à 4×4 , en fonction de la dimension des caractéristiques des échantillons que l'on cherche à mettre en valeur. Une fenêtre de 2×2 réduit la dimension d'un facteur 4.

0	255	10	0	→	255	200
10	20	0	200		50	20
50	0	0	0		50	20
10	0	20	10			

Tableau F.2 – Illustration d'une couche de max pooling.

BOUREAU, PONCE et LECUN [BPL10] analysent l'influence du choix de la fonction et montre la supériorité du *max pooling* lorsque les valeurs à détecter sont peu fréquentes. SCHERER, MÜLLER et BEHNKE [SMB10] obtient également des performances supérieures avec le *max pooling* qui permet d'extraire les caractéristiques de petites dimensions spatiales. Une particularité du *max pooling* est d'être très simple à calculer lors de la rétro-propagation : seul le poids associé à la valeur maximale est ajusté. La Figure F.3 illustre l'effet du *max pooling* et de l'*average pooling* pour quatre filtres de convolutions différents.

OQUAB et al. [Oqu+15] étudie l'utilisation du *global max pooling* : seule une unique valeur maximale de la couche présente z est conservée, Équation F.4. Cela fait émerger une propriété intéressante : la possibilité d'utiliser la valeur de la couche précédente z comme une carte de saillance de la localisation des différentes classes. Cette carte est générée à partir d'un jeu de

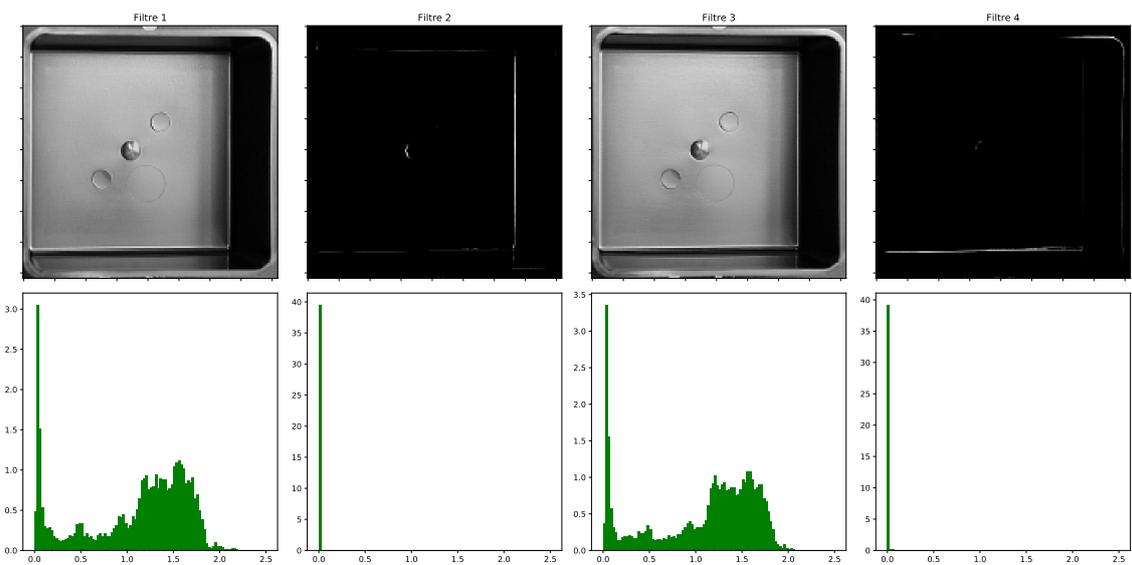
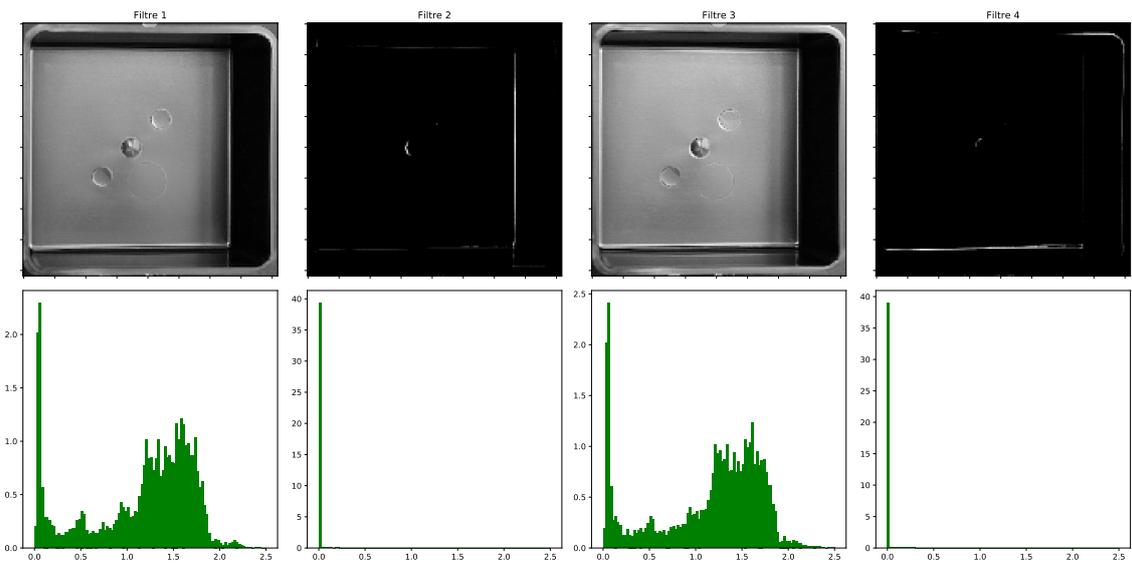
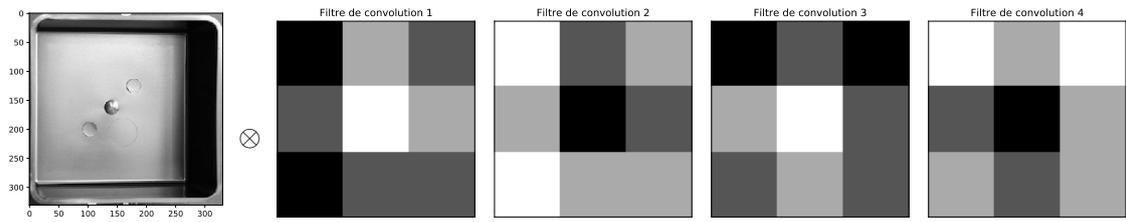


Figure F.3 – Comparaison max pooling *c* et average pooling *d* pour 4 filtres de convolutions *b*.

données sans information sur la localisation des objets, de manière semi-supervisée. La couche de *global max pooling* force le réseau à détecter la position de la meilleure classe dans l'image.

$$y_{i+1} = \max_{j,k} z_{j,k}(y_i) \quad (\text{F.4})$$

De récentes analyses montrent que le *max pooling* est une source majeure de perte d'information, ce qui peut limiter les performances, particulièrement pour les réseaux génératifs. C'est pourquoi les architectures récentes cherchent à le remplacer par des couches de sous-échantillonnage par moyenne (*average pooling*). Dans son réseau composé de sous blocs denses, [LCY13] introduit le *Global Average Pooling*, Équation F.5. [Zho+15] montre l'intérêt du *Global Average Pooling* lors de l'apprentissage, ce qui permet d'obtenir des cartes de saillance de la localisation des objets dans l'image. Cette démarche est similaire aux travaux de OQUAB et al. [Oqu+15] avec le *global max pooling*, mais l'utilisation de la moyenne force le réseau à détecter l'ensemble des régions où la classe est présente. Cette carte de saillance par classes z est nommée *Class Activation Map*.

$$y_{i+1} = \frac{1}{N} \sum_{j,k} z_{j,k}(y_i) \quad (\text{F.5})$$

F.4.5 Pénalisation sur les poids

Proposé par KROGH et HERTZ [KH91], il s'agit d'ajouter un terme de pénalisation E de la valeur des poids à la fonction de coût \mathcal{L} que l'on cherche à optimiser. Un facteur λ pondère la valeur des poids \mathbf{W} du réseau. Cette méthode permet de rendre le réseau robuste aux perturbations ce qui améliore les performances. C'est une méthode simple et efficace, dont l'utilisation est indispensable pour atteindre les performances de l'état de l'art de la littérature. La pondération peut être effectuée sur la norme ℓ_1 , ce qui pénalisera tous les poids différents de zéro. Mais la pondération est généralement réalisée sur la norme ℓ_2 , ce qui pénalisera les grandes valeurs des poids. Dans ce cas, cette démarche est équivalente à la régularisation de TIKHONOV [Tik43; TA77] par une matrice Γ , avec $\Gamma = \lambda I$. On cherche à amener un maximum de poids du réseau à zéro. La méthode est d'autant plus critique que les erreurs d'arrondis, inhérentes à la représentation des nombres informatiques, doivent être évitées lors de l'optimisation par descente du gradient.

$$E(\mathbf{W}) = E_0(\mathbf{W}) + \frac{1}{2} \lambda \sqrt{\sum_i \mathbf{w}_i^2} \quad (\text{F.6})$$

F.4.6 Augmentation artificielle du jeu de données

La plus simple des méthodes existantes pour limiter le sur-apprentissage est de disposer d'un jeu de données comportant une grande variété d'échantillons par classe. *ImageNet* propose 2000 échantillons par classe. Récemment, *ResNext_wsl* [Mah+18] est entraîné sur plusieurs millions d'images par classe. Lorsque que l'on ne dispose pas de suffisamment de données, il est possible d'augmenter les données existantes. Il s'agit d'effectuer des transformations affines ou non linéaires, rotations, cadrages ou d'ajouter du bruit dans les images. L'objectif est d'augmenter la variance du jeu de données initial. Les taux de modifications optimaux doivent être choisis par validation croisée pour obtenir les meilleures performances possibles sur le problème spécifique. Nous observons de bonnes performances avec des rotations jusqu'à cinq degrés et des cadrages qui varient de dix pour-cent des dimensions originales, illustrés dans la Figure F.4.

Le choix des paramètres d'augmentation peut être effectué par validation croisée afin d'optimiser les performances. On préférera se rapprocher des situations réelles de production des données. Dans notre cas d'application industrielle du contrôle qualité, de légères variations de cadrage, rotation ou de perspectives peuvent exister. En revanche, nous travaillons avec un

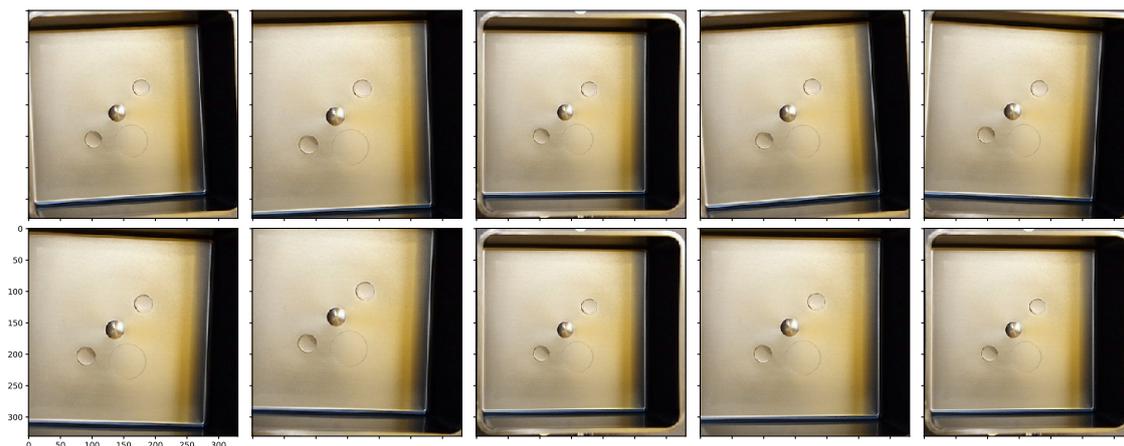


Figure F.4 – Augmentation d’une image par translations et rotations.

éclairage contrôlé, donc les perturbations d’éclairage ou de colorimétrie sont peu probables. Les paramètres de l’augmentation du jeu de données dépendent de la connaissance du métier. Si la connaissance du métier n’est pas certaine, il est préférable d’acquérir un plus grand nombre d’images réelles, plutôt que de générer des données artificielles avec de mauvais a priori.



Résultats de l'extraction de la géométrie d'une pièce à partir de son image thermique

Cette Annexe est complémentaire de la Section 2.3 du Chapitre 2. L'objectif est d'extraire l'information de l'image thermique d'une pièce afin d'obtenir sa géométrie. La Figure G.1 présente les résultats obtenus sur le jeu de données de validation, qui n'a pas été utilisé pendant l'apprentissage. Les résultats montrent que le modèle permet d'obtenir la géométrie à partir de l'image thermique, sur ce cas d'application spécifique.

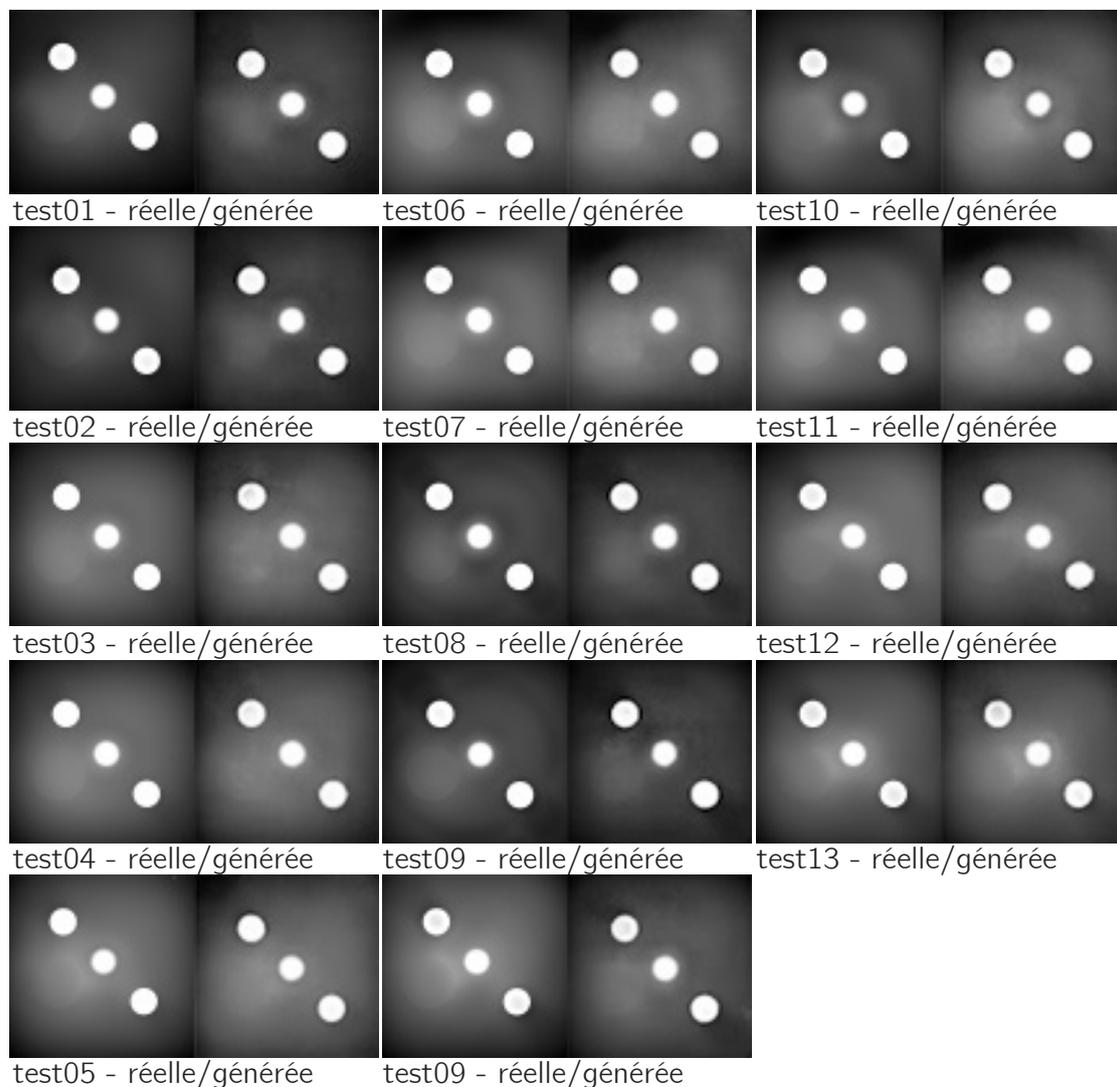


Figure G.1 – Comparaison entre les images générées par le modèle pix2pix à partir de l'image thermique et les images "géométriques" réelles pour le jeu de données de validation.



Confidentiel - Essai "plaques"

Cette annexe présente les résultats obtenus par le système de contrôle que nous avons proposé, lors d'un essai au centre de Recherche et Développement Sigmatech de l'équipementier automobile Plastic Omnium en Avril 2019.

Cette annexe est complémentaire de la Section 3.2. Elle complète la présentation des méthodes d'apprentissage de modèles à réseaux de neurones profonds.

H.1 Essai "plaques" confidentiel

Dans la cadre du projet de recherche collaboratif FUI SAPRISTI, nous avons réalisé un essai au centre de Recherche et Développement *Sigmatech* de l'équipementier automobile Plastic Omnium en Avril 2019. Cet essai est confidentiel.

Contrôle automatique non-invasif de la qualité des produits

Application au procédé d'injection-moulage des thermoplastiques

Résumé

La maîtrise de la qualité de la production est un objectif particulièrement important pour la croissance des industries. Contrôler la qualité d'un produit nécessite de la mesurer. Le contrôle de cent pourcent des produits est un objectif important pour dépasser les limites du contrôle par prélèvement, dans le cas de défauts liés à des causes exceptionnelles. Cependant, les contraintes industrielles ont limité le déploiement de la mesure des caractéristiques des produits directement au sein des lignes de production. Le déploiement du contrôle visuel humain est limité par sa durée incompatible avec la durée du cycle des productions à haute cadence, par son coût et par sa variabilité. L'intégration de systèmes de vision informatique présente un coût qui les réservent aux productions à hautes valeurs ajoutées. De plus, le contrôle automatique de la qualité de l'aspect des produits reste une thématique de recherche ouverte. Notre travail a pour objectifs de répondre à ces contraintes, dans le cadre du procédé d'injection-moulage des thermoplastiques. Nous proposons un système de contrôle qui est non invasif pour le procédé de production. Les pièces sont contrôlées dès la sortie de la presse à injecter. Nous étudierons l'apport de l'imagerie non-conventionnelle. La thermographie d'une pièce moulée chaude permet d'obtenir une information sur sa géométrie, qui est complémentaire de l'imagerie conventionnelle. La polarimétrie permet de discriminer les défauts de courbure des surfaces des défauts de la structure de la matière, car les premiers modifient l'angle de polarisation de la lumière réfléchié alors que les seconds diffusent la lumière. D'autre part, les cahiers des charges des produits présentent de plus en plus d'exigences tant sur les géométries complexes que sur l'aspect. Cependant, les caractéristiques d'aspect sont difficiles à formaliser. Pour automatiser le contrôle d'aspect, il est nécessaire de modéliser la notion de qualité d'une pièce. Afin d'exploiter les mesures réalisées sur les pièces chaudes, notre approche utilise des méthodes d'apprentissage statistique. Ainsi, l'expert humain qui connaît la notion de qualité d'une pièce transmet son savoir au système, par l'annotation d'un jeu de données d'apprentissage. Notre système de contrôle apprend alors une métrique de la qualité d'une pièce, à partir des données brutes issues capteurs. Nous avons privilégié une approche par réseaux de convolution profonds (*Deep Learning*) afin d'obtenir les meilleures performances en justesse de discrimination des pièces conformes. La faible quantité d'échantillons annotés disponible dans notre contexte industriel nous ont amenés à utiliser des méthodes d'apprentissage par transfert de domaine. Enfin, afin de répondre à l'ensemble des contraintes, nous avons réalisé l'intégration verticale d'une prototype de dispositif de mesure des pièces et de la solution logicielle de traitement par apprentissage statistique. Le dispositif intègre l'imagerie thermique, polarimétrique, l'éclairage et le système de traitement embarqué nécessaire à l'envoi des données sur un serveur d'analyse distant. Deux cas d'applications permettent d'évaluer les performances et la viabilité de la solution proposée.

Mots-clés : Qualité, Injection-moulage, Thermographie, Polarimétrie, Apprentissage de métrique, Deep Learning

Abstract

Inline quality control of the product is an important objective for industries growth. Controlling a product quality requires measurements of its quality characteristics. One hundred percent control is an important objective to overcome the limits of the control by sampling, in the case of defects related to exceptional causes. However, industrial constraints have limited the deployment of measurement of product characteristics directly within production lines. Human visual control is limited by its duration incompatible with the production cycle at high speed productions, by its cost and its variability. Computer vision systems present a cost that reserves them for productions with high added value. In addition, the automatic control of the quality of the appearance of the products remains an open research topic. Our work aims to meet these constraints, as part of the injection-molding process of thermoplastics. We propose a control system that is non-invasive for the production process. Parts are checked right out of the injection molding machine. We will study the contribution of non-conventional imaging. Thermography of a hot molded part provides information on its geometry, which is complementary to conventional imaging. Polarimetry makes it possible to discriminate curvature defects of surfaces that change the polarization angle of reflected light and defects in the structure of the material that diffuse light. Furthermore, specifications on products are more and more tighter. Specifications include complex geometric features, as well as appearance features. However, the appearance characteristics are difficult to formalize. To automate aspect control, it is necessary to model the notion of quality of a part. In order to exploit the measurements made on the hot parts, our approach uses statistical learning methods. Thus, the human expert who knows the notion of quality of a piece transmits his knowledge to the system, by the annotation of a set of learning data. Our control system then learns a metric of the quality of a part, from raw data from sensors. We favor a deep convolutional network approach (Deep Learning) in order to obtain the best performances in fairness of discrimination of the compliant parts. The small amount of annotated samples available in our industrial context has led us to use domain transfer learning methods. Finally, in order to meet all the constraints and validate our propositions, we realized the vertical integration of a prototype of device of measure of the parts and the software solution of treatment by statistical learning. The device integrates thermal imaging, polarimetric imaging, lighting and the on-board processing system necessary for sending data to a remote analysis server. Two application cases make it possible to evaluate the performance and viability of the proposed solution.

Keywords : Quality, Injection-molding, Thermography, Polarimetry, Metric learning, Deep Learning

