



HAL
open science

Integrated design and manufacturing of "net shape" forged products: application on forged differentials

Laurent Berviller

► **To cite this version:**

Laurent Berviller. Integrated design and manufacturing of "net shape" forged products: application on forged differentials. Engineering Sciences [physics]. Arts et Métiers ParisTech, 2005. English. NNT : 2005ENAM0005 . pastel-00001278

HAL Id: pastel-00001278

<https://pastel.hal.science/pastel-00001278>

Submitted on 7 Jun 2005

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.

Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers
Laboratoire de Génie Industriel et de Production Mécanique
(LGIPM)

THÈSE

présentée pour obtenir le grade de

DOCTEUR
de
L'ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE
D'ARTS ET MÉTIERS

Spécialité : Mécanique et Génie Mécanique

par

Laurent BERVILLER

**CONCEPTION ET FABRICATION INTEGRES DE PRODUITS FORGES « NET
SHAPE » : APPLICATION AUX DIFFERENTIELS FORGES**

Soutenue le 29 mars 2005 devant le jury composé de :

MM.	D.	PLAY	Professeur à l'INSA, Lyon	Président du Jury
	G.	GOGU	Professeur à l'IFMA, Clermont-Ferrand	Rapporteur
	S.	TICHKIEWITCH	Professeur à l'INPG, Grenoble	Rapporteur
	G.	COFFIGNAL	Professeur à l'ENSAM, Paris	Examineur
	P.	MARTIN	Professeur à l'ENSAM, Metz	Directeur de thèse
	R.	BIGOT	Maître de Conférences HDR à l'ENSAM, Metz	Codirecteur de thèse
	P.	SECORDEL	Directeur Technique d'ASCOFORGE SAFE	Invité
	J.M.	DAVID	PREN à l'ENSAM, Lille	Invité

A Thomas et Cathia,
A mes Parents,
A ma Famille

Remerciements

Ces travaux de thèse ont été effectués au sein du Laboratoire de Génie Mécanique et de Production Mécanique (LGIPM) dirigé par Monsieur le Professeur **G. Abba**, et plus précisément au sein de l'équipe d'Ingénierie de Fabrication (IFAB) dirigée par le Professeur **P. Martin**. Je les remercie pour leur soutien.

Mes plus grands remerciements s'adressent à Monsieur **R. Bigot** qui a été mon tuteur de thèse et qui a sans cesse su m'encourager, me conseiller et me guider.

Ces travaux ont été menés en partenariat fort avec le milieu industriel. Que Monsieur **P. Secordel**, d'ASCOFORGE SAFE, trouve dans ce mémoire mes plus vifs remerciements pour sa confiance et son soutien. Mes remerciements s'adressent également à l'ensemble des personnes d'ASCOFORGE SAFE qui ont participé à mes travaux et tout particulièrement à Messieurs **D. Bertucci**, **A. Gasse**, **D. Gulia**, **G. Mathieu** et **N. Muller**. Je remercie également monsieur **M. Robelet**, d'ASCOMETAL CREAS, de m'avoir permis d'accéder et de participer aux expertises de différentiels.

Je tiens à remercier Monsieur le Professeur **G. Gogu**, du LaMI à l'IFMA de Clermont-Ferrand et Monsieur le Professeur **S. Tichkiewitch**, du Laboratoire L3S de Grenoble qui m'ont fait l'honneur de juger ces travaux.

Je tiens à exprimer mes plus sincères remerciements à Messieurs **G. Coffignal**, du LMSP à l'ENSAM de Paris, **J.M. David**, du L2MA à l'ENSAM de Lille, **D. Play**, du LDMS à l'INSA de Lyon et **P. Secordel**, Directeur Technique d'ASCOFORGE SAFE, pour avoir accepté de participer à ce jury.

Mes remerciements s'adressent également à Messieurs les Directeurs **A. Faessel** et **G. Kugel**, successivement directeurs du centre ENSAM de Metz, pour leur soutien à mes activités de recherche.

Je remercie également Madame **M. Reynier**, Directrice Générale de l'ENSAM, ainsi que Monsieur **J.P. Hautier**, Directeur de la recherche de l'ENSAM, pour leur soutien par un aménagement de mon service d'enseignement pendant la durée de mes travaux de thèse.

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à l'équipe des "pièces forgées à hautes performances" constituée de mes collègues Messieurs **L. Langlois**, **J. Bruyère** et **C. Baudouin** pour leur sympathie, pour leurs compétences et pour leur collaboration dans cette recherche technologique. Je remercie tout particulièrement Monsieur **L. Morhain**, technicien du hall « forge », pour sa collaboration sur les mesures d'engrènement.

Je remercie Messieurs **V. Fix**, **N. Behr**, **J. Schall**, **R. Falousse**, **A. Laklalech**, **Q. Balandier**, **T. Scheer** et **G. Balter** pour leur contribution à mes travaux à travers tout ou partie de leur étude de Projet de Fin d'Etudes à l'ENSAM.

J'adresse mes plus vifs remerciements, une nouvelle fois à Monsieur **J.M. David**, et également à Monsieur **S. Leleu**, du L2MA à l'ENSAM de Lille, pour leur soutien et leurs nombreux conseils scientifiques et technologiques.

Je voudrais également remercier mon collègue Monsieur **D. Matheis** pour m'avoir soulagé d'une partie de l'organisation des enseignements de construction pendant la durée de ma thèse.

Que tous les membres de l'équipe IFAB, trouvent ici un témoignage de ma reconnaissance.

Que tous les membres de l'ENSAM Metz que j'ai côtoyé, et grâce auxquels ce travail a pu être effectué dans une ambiance agréable, trouvent ici l'expression de ma reconnaissance.

Préambule

Les travaux présentés dans ce manuscrit ont été menés en étroite collaboration industrielle avec la société ASCOFORGE SAFE et le centre de recherche sur les aciers, le CREAS. Dans un soucis de confidentialité, le manuscrit a été scindé en deux tomes et le tome 2, contenant les parties V et VI, n'est pas diffusé. Seuls les membres du jury ont accès aux deux tomes en sus des équipes impliquées dans ces travaux.

Le tome 1 développe l'approche scientifique et technologique mise en œuvre dans ces travaux de thèse.

Sommaire du tome 1

I	Introduction	6
II	Contexte et problématique	9
II.1	Le produit : le différentiel automobile	9
II.1.1	Présentation du fonctionnement	9
II.1.2	Architecture des différentiels	11
II.1.3	Conclusion	15
II.2	Les outils de formalisation	16
II.2.1	Choix d'un outil de description d'activités et d'informations associées	16
II.2.2	Capitalisation des connaissances	16
II.2.3	Approche par entités	20
II.2.4	Conclusion	22
II.3	Conception et fabrication de pignons coniques	23
II.3.1	Géométrie	23
II.3.2	Démarche de définition géométrique d'un engrenage conique :	29
II.3.2.a	Détermination des deux surfaces en développantes	29
II.3.2.b	Définition des paramètres en rapport avec les hauteurs de dents	30
II.3.2.c	<i>Définition des paramètres en rapport avec les épaisseurs de dents</i>	32
II.3.2.d	Modification des épaisseurs pour tenir compte du jeu et du bombé de denture	34
II.3.3	Dimensionnement	34
II.3.3.a	Calcul de S_H	39
II.3.3.b	Calcul de S_F	41
II.3.3.c	Classification des coefficients de dimensionnement	42
II.3.3.d	Quantification de certains facteurs	43
II.3.3.e	Conclusions sur le dimensionnement	46
II.3.4	Fabrication	48
II.3.5	Conclusion	49
II.4	Les évolutions de la conception et de la fabrication en mise en forme	49
II.4.1	Processus de conception de pièces en mise en forme	52
II.4.2	Outillages de mise en forme de précision	56
II.4.3	Conclusion	60
III	Approche proposée	61
III.1	Présentation de l'approche	61
III.1.1	Identification des données, informations et connaissances technologiques pertinentes	61
III.1.1.a	Identification des données, informations et connaissances technologiques utilisées	62
III.1.1.b	Détermination des données, informations et connaissances technologiques pertinentes	62
III.2	Perspectives de capitalisation des connaissances acquises	62
III.3	Application aux pignons forgés de différentiel	63
III.3.1	Description globale des activités initiales et des principales informations associées	63
III.3.2	Etude des évolutions apportées à l'activité A1 : « concevoir des pignons de différentiel »	67
III.3.2.a	Présentation des principales informations liées à l'activité initiale A1 : « concevoir des pignons de différentiel »	67

III.3.2.b	Présentation de l'évolution des principales informations nécessaires en entrée de l'activité A1 : « concevoir des pignons de différentiel ».....	69
III.3.2.c	Présentation de l'évolution des principales informations nécessaires en sortie de l'activité A1 : « concevoir des pignons de différentiel ».....	71
III.3.2.d	Présentation de la nouvelle activité A1 : « concevoir des pignons de différentiel »	72
III.3.3	Etude des autres évolutions apportées au niveau du cycle initial	75
III.3.4	Entités liées aux pièces du produit différentiel	80
III.3.4.a	Mise en place des entités.....	80
III.3.4.b	Mise en œuvre des entités	86
III.3.5	Illustration du processus de conception et fabrication sur un exemple d'information.....	86
IV	Conclusions et perspectives	88
	Références bibliographiques.....	91

Plan du tome 2

V Développement de connaissances et d'outils spécifiques pour la conception et le contrôle de pignons coniques forgés

V.1 Connaissances et outils pour la conception des pignons

V.1.1 Expertise de différentiels existants

V.1.1.a Analyse des calculs normalisés appliqués au différentiel

V.1.1.b Détermination des caractéristiques géométriques des pignons expertisés

V.1.1.c Détermination des caractéristiques matériaux des pignons expertisés

V.1.1.d Résultats de l'expertise

V.1.2 Pré – dimensionnement des pignons forgés

V.1.2.a Présentation des paramètres de pré - dimensionnement

V.1.2.b Présentation de l'outil développé et résultats obtenus

V.1.3 Modélisation de la géométrie nominale complète

V.1.3.a Introduction

V.1.3.b Modélisation de la surface active de denture

V.1.3.c Modélisation complète du pignon

V.1.3.d Conclusion

V.1.4 L'engrènement dans un environnement de CAO

V.1.4.a Introduction

V.1.4.b Détection d'interférences en géométrie non chargée

V.1.4.c Simulation de la tache de contact sous charge

V.1.4.d Conclusion

V.1.5 Simulation d'engrènement par utilisation des éléments finis

V.1.5.a Introduction

V.1.5.b Analyse du contact durant l'engrènement

V.1.5.c Analyse des contraintes en pied de dents

V.1.5.d Influence de la surface de raccordement sur les contraintes

V.1.5.e Influence des renforts forgés sur l'engrènement

V.1.5.f Conclusion discussion

V.2 Connaissances et outils pour le contrôle de la fonctionnalité

V.2.1 Essais d'endurance

V.2.1.a Présentation du banc d'essai de fatigue

V.2.1.b Amélioration de la répétabilité des essais

V.2.2 Essais d'engrènement

- V.2.2.a Contrôle des portées
- V.2.2.b Mesure des erreurs d'engrènement
- VI Résultats obtenus sur des applications industrielles
 - VI.1 Amélioration de la qualité d'engrènement
 - VI.2 Re-conception de deux différentiels à partir de leur cahier des charges
 - VI.2.1 Evolution d'un cahier des charges existant
 - VI.2.1.a Présentation du cahier des charges
 - VI.2.1.b Améliorations proposées
 - VI.2.1.c Vérifications sur logiciels éléments finis
 - VI.2.2 Nouveau cahier des charges

Tome 1

I Introduction

Les travaux présentés ici concernent le domaine de la conception intégrée de produits mécaniques en grande série. La démarche de conception - fabrication concerne ici des familles de produits connus, pour lesquels on souhaite améliorer les performances. Le travail de thèse est donc concentré essentiellement sur l'intégration des connaissances du métier de fabrication, dans une démarche de conception intégrée. Les principaux objectifs sont l'amélioration de la qualité des produits ainsi que la réduction de la durée du cycle de conception, fabrication et contrôle. Ceci sera rendu possible ici par une meilleure formalisation et intégration des connaissances en conception et fabrication. Il s'agit en fait de mettre en place une méthodologie permettant de déterminer des informations, au sens large du terme, pertinentes associées aux activités concernant la partie du cycle de vie du produit allant du cahier des charges au produit industrialisé final.

Le contexte général de cette étude se situe d'une part en pleine évolution des relations entre donneurs d'ordres et sous traitants dont une conséquence est notamment le transfert de la partie conception vers les sous traitants et d'autre part dans une évolution industrielle du métier de la forge, du secteur automobile en particulier, vers des produits forgés de hautes qualités dimensionnelles type « net shape ».

Ce bref historique est destiné à mieux saisir ce contexte d'évolutions. La recherche de gains financiers d'une entreprise industrielle peut se traduire sous forme de deux approches : soit par une diminution des coûts d'obtention du produit (fabrication, conception, logistique,...) soit par des améliorations de la fonctionnalité du produit. Par exemple dans le domaine de la mise en forme, les outillages de forge représentent un coût important de la pièce fabriquée [CAP98] [DOE98][MAM96]. Ainsi de nombreuses études tendent à diminuer le coût de ces outillages par une augmentation de leur durée de vie [GRO00] [LAN04] [PAN02]. La diminution des coûts doit être perçue aussi à travers l'ensemble des procédés mis en œuvre. La mise en œuvre des aciers à dispersoïdes a permis la fabrication de bielles sécables alliant la métallurgie des aciers et les procédés de fabrication des bielles sécables. Quelques travaux développent ce type d'approches pour la fabrication de pièces de forge de précision [SAI01] [DOU00] [REI03]. Ces approches demandent la formalisation et l'intégration des connaissances dans une démarche globalisante. Elles permettent la capitalisation des connaissances afin de les réutiliser au mieux. Cette démarche de conception intégrée permet, par exemple, de réduire les délais de mise sur le marché des produits et donc les coûts directs des produits d'une part et d'augmenter la fonctionnalité des produits d'autre part. Cette approche, alliée à une évolution des procédés de mise en œuvre, permet également l'apparition de nouveaux produits :

- Le développement des technologies d'usinage a permis l'usinage direct des outillages de forge et en particulier leur niveau de précision dans des matériaux à hautes caractéristiques mécaniques rendant possible une qualité élevée des pièces fabriquées.
- Le développement de nouvelles technologies de mise en œuvre a permis la fabrication de pièces à géométries complexes et à hautes caractéristiques mécaniques. L'apparition du thixoforgeage au début des années 70 [SPE72] a conduit à la fabrication de pièces fortement sollicitées au sein des automobiles [CHI96] [CHI94].

Les contraintes industrielles et l'évolution des relations entre donneur d'ordre et fournisseurs conduisent les industriels de la Forge à une évolution de leur métier vers la maîtrise de la conception en plus de la réalisation et du contrôle de leurs produits. D'abord fournisseurs de

pièces « brutes » reprises en usinage, ils ont été amenés à minimiser les variations dimensionnelles des produits fournis et à réduire les surépaisseurs de matière. C'est l'apparition des pièces dites forgées « near net shape » pour lesquelles les surfaces fonctionnelles sont reprises par un usinage de finition seul, rendu possible par une maîtrise en parallèle du procédé de forgeage. L'apparition des outils numériques et des modélisations physiques des procédés de mise en forme alliés à une évolution permanente des capacités informatiques a rendu possible l'insertion industrielle des outils de simulation numériques [CHE02] [SLA02]. Les procédés de mise en forme permettent ainsi de réaliser des pièces de grande qualité dimensionnelle et métallurgiques, ce sont les pièces dites « forgées net shape ».

L'approche présentée ici est globale en ce sens qu'elle s'intéresse à une grande partie du cycle de vie en partant de l'analyse du cahier des charges jusqu'à la vérification de la fonctionnalité sur bancs d'essais. Dans cette approche, la partie optimisation de la gamme de forgeage et des outillages n'est pas développée. Ce travail se concentre sur la partie conception du produit qui inclus, en particulier, la définition de la géométrie, le choix d'un matériau, le choix d'un traitement thermique, le dimensionnement mécanique par calculs analytiques et par simulations éléments finis, la mise en place des gammes de contrôle et la définition des essais sur banc.

Ces travaux sont centrés sur une fonction « transmission de puissance par engrenage » et l'application industrielle support de ces travaux concerne plus particulièrement les différentiels automobiles à pignons forgés « net shape ».

Ce manuscrit comporte deux chapitres publics, deux chapitres confidentiels et une conclusion. Le chapitre II présente le contexte et la problématique de l'étude. Compte tenu du fait que cette thèse aborde plusieurs domaines chacun très vastes comme notamment la conception de pignons, la modélisation de processus et de produits et la conception de pièces forgées, nous avons choisi de ne pas chercher à faire un état de l'art exhaustif de l'ensemble des domaines abordés. Nous avons ainsi cherché à faire ressortir essentiellement des éléments clés permettant en particulier de vérifier que nos travaux sont complémentaires de ceux existants et qu'ils peuvent aussi s'intégrer sur certains aspects aux outils et théories existants. Ce chapitre est décliné en quatre paragraphes :

Le paragraphe 1 présente le fonctionnement et les différentes architectures d'un différentiel automobile et montre l'évolution vers des pignons forgés « net shape ».

Le paragraphe 2 décrit quelques outils de formalisation d'informations et de connaissances.

Le paragraphe 3 présente les méthodes de conception et de fabrication des engrenages coniques droits. Les paramètres de dimensionnement mécanique et géométrique y sont détaillés.

Le paragraphe 4 présente les évolutions de la conception et de la fabrication en mise en forme. Le forgeage « net shape » y est décrit ainsi que les différentes gammes associées. L'intérêt d'intégrer l'activité de conception du produit dans le processus de forge est évoqué.

Le chapitre III décrit l'approche que nous proposons afin de déterminer les données, informations et connaissances technologiques pertinentes. Cette approche est ensuite appliquée au cas des pignons forgés de différentiel. Des perspectives de capitalisation des connaissances sont illustrées à travers la notion d'entités. Nous proposons une description du pignon forgé sous forme d'entités.

Une conclusion du tome 1 est présentée en fin de chapitre III. Elle permet également de décrire de manière synthétique le contenu des chapitres suivants confidentiels.

Le chapitre IV, classé confidentiel, présente les expertises que nous avons conduites afin d'obtenir les connaissances complémentaires nécessaires pour l'amélioration de la conception des pignons coniques.

Le chapitre V, également confidentiel, présente les premiers résultats obtenus par la mise en place de notre démarche sur des cas industriels étudiés avec notre partenaire.

II Contexte et problématique

Le paragraphe II.1 présente notre analyse de la technologie des produits « différentiel » récents existants sur le marché.

Le paragraphe II.2 est consacré aux outils de formalisation et de capitalisation de la démarche de conception intégrée.

Le paragraphe II.3 s'intéresse aux théories et aux méthodes existantes en conception et fabrication de pignons coniques.

Enfin le paragraphe II.4 présente les évolutions de la conception et de la fabrication dans le domaine de la mise en forme.

II.1 Le produit : le différentiel automobile

Nous présentons ici la technologie des produits « différentiel » récents existants sur le marché afin de constater l'évolution vers des produits net shape d'une part et la possibilité d'en améliorer la conception d'autre part. Cette étude permet également de montrer les nombreux paramètres qui entrent en jeu dans la conception d'un produit mécanique de type « transmission de puissance par engrenage » et la nécessité de trouver une méthode permettant la détermination de paramètres de conception pertinents intégrant directement les procédés de fabrication utilisés.

II.1.1 Présentation du fonctionnement

La fonction première d'un différentiel est de permettre aux deux roues motrices d'un même train de véhicule de tourner à des vitesses de rotation différentes afin d'éviter le glissement du pneumatique sur la chaussée. Ce glissement apparaîtrait, en cas de liaison rigide entre les deux roues motrices, notamment lors de la conduite dans un virage mais aussi en ligne droite en raison des diamètres des deux pneumatiques qui ne peuvent être parfaitement égaux.

La figure II.1-1 illustre l'ensemble des fonctions et des contraintes d'un différentiel en fonctionnement nominal, sous la formalisation d'un diagramme pieuvre. Ce produit doit répondre à quatre fonctions principales :

1. **FP1** : permettre de transmettre une partie de la puissance de l'arbre de sortie de boîte de vitesse vers le cardan gauche de manière uniforme
2. **FP2** : permettre de transmettre une partie de la puissance de l'arbre de sortie de boîte de vitesse vers le cardan droit de manière uniforme
3. **FP3** : permettre la répartition de la vitesse de rotation entre les cardans
4. **FP4** : garantir la mise en position des cardans par rapport au carter de pont

A cela s'ajoutent principalement trois contraintes:

1. **C1** : Assurer le confort acoustique de l'utilisateur
2. **C2** : Permettre l'admission de lubrifiant
3. **C3** : S'insérer dans le carter de pont

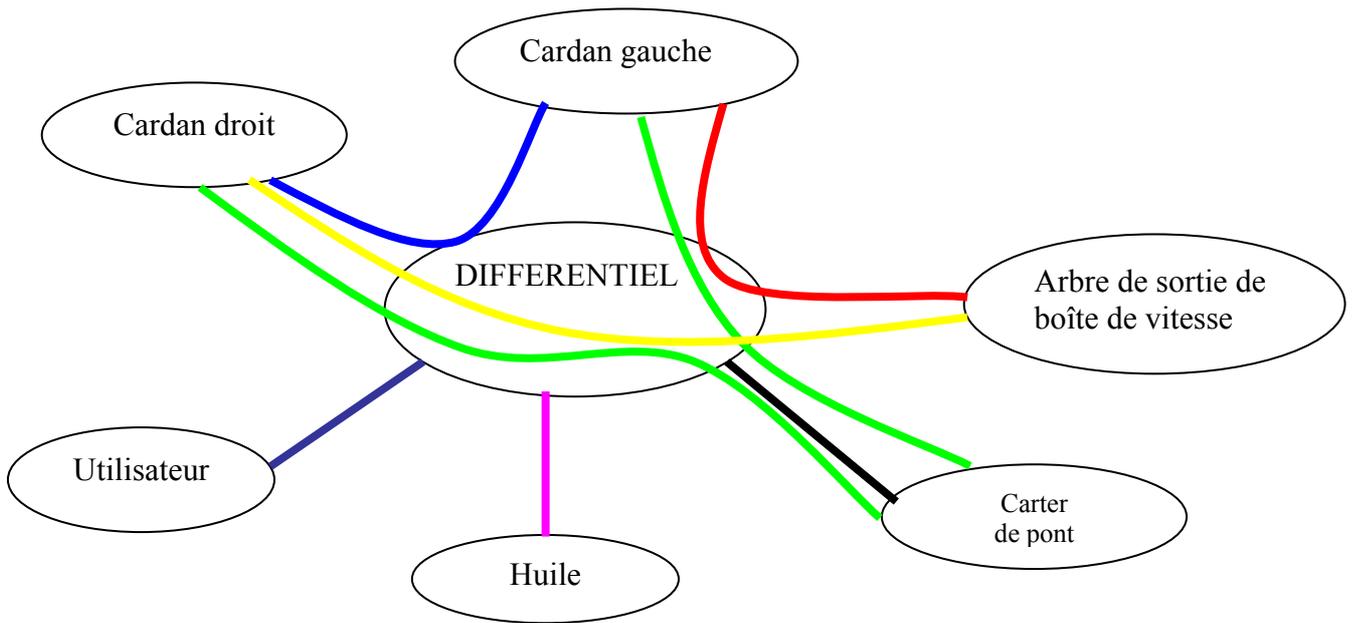


Figure II.1-1 : diagramme pieuvre du produit différentiel

Il est à noter que le terme « carter de pont » désigne soit le carter de boîte de vitesses dans le cas d'un véhicule à roues motrices avant (traction), soit le carter de pont arrière dans le cas d'un véhicule à roues motrices arrières (propulsion) ou à transmission à quatre roues motrices. Il s'agit dans tous les cas d'un carter dans lequel le différentiel doit s'insérer.

La figure II.1-1 permet de constater qu'en plus de la fonction cinématique de répartition de vitesse de rotation, le différentiel doit également transmettre la puissance aux deux roues du véhicule et participer au guidage des deux arbres de transmission par rapport au carter de boîte de vitesses.

La solution, répondant à ces fonctions et utilisée sur les véhicules automobiles, est le différentiel à pignons coniques droits. Le schéma cinématique minimal de cette solution est décrit sur la figure II.1-2 ci-dessous.

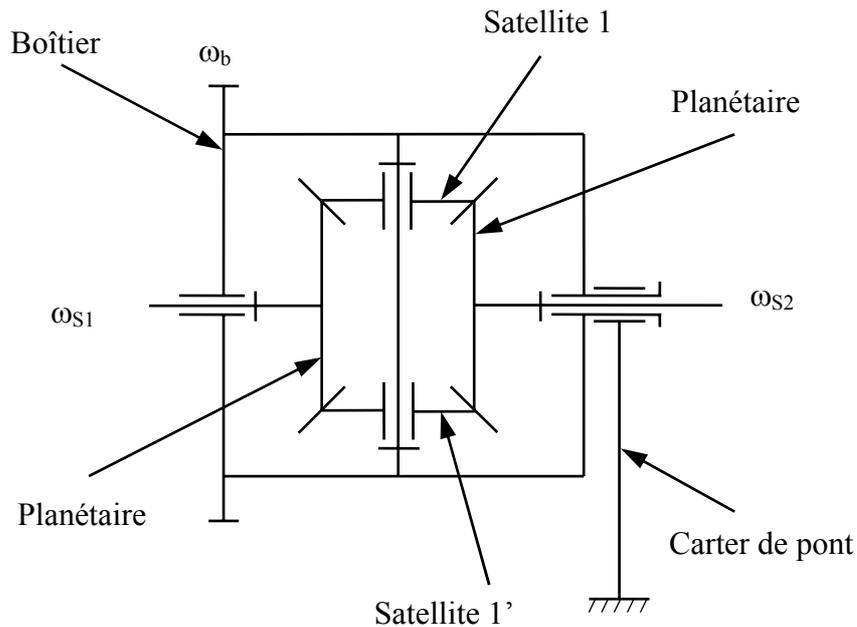


Figure II.1-2 : Schéma cinématique minimal d'un différentiel à pignons coniques

Le boîtier de différentiel comporte une couronne dentée entraînée par l'arbre de sortie de la boîte de vitesses. Les deux pignons coniques de sortie sont nommés « planétaires » et entraînent les deux arbres de transmission reliés aux roues motrices. D'un point de vue cinématique, un seul pignon « satellite » est nécessaire. Pour des raisons de diminution des efforts radiaux sur les guidages des planétaires et de diminution des efforts sur les dents des pignons, il est nécessaire d'avoir au moins deux satellites.

Un calcul de cinématique [ESN93] donne la relation suivante :

$$\frac{\omega_{S1} + \omega_{S2}}{2} = \omega_b$$

En notant ω_i la vitesse de rotation de i par rapport au carter de pont.

Cette relation montre, en particulier, que le nombre de dents des satellites et des planétaires n'influe pas sur la cinématique du différentiel. Le choix de ces nombres de dents peut ainsi se faire par des critères de dimensionnement mécanique et de fabrication.

Cette solution « type » peut se décliner en plusieurs architectures présentées et commentées ci-dessous.

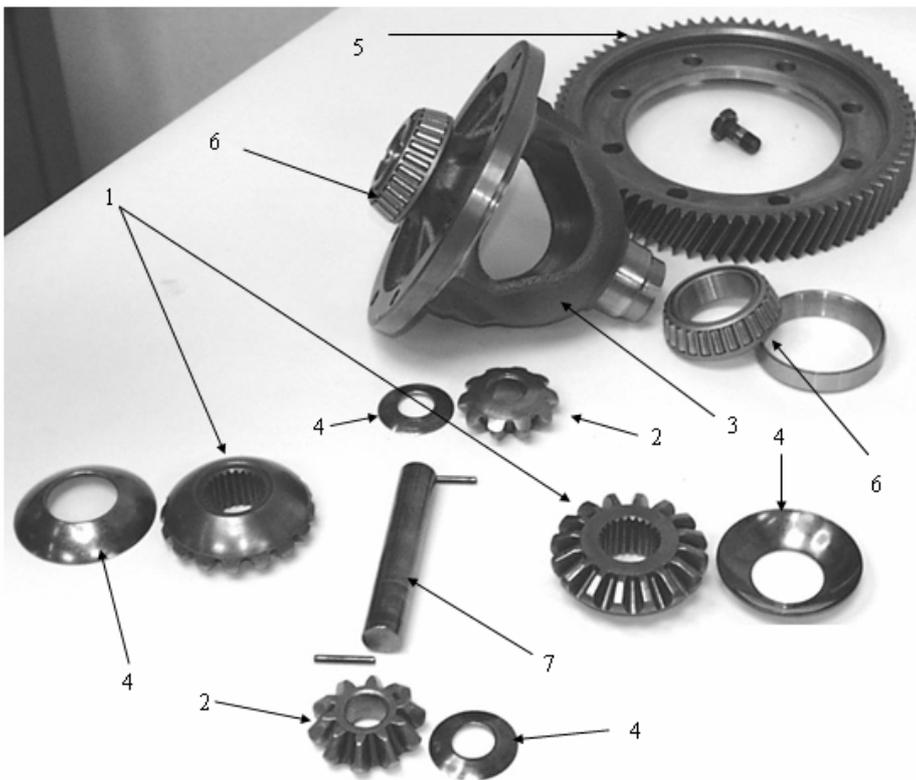
II.1.2 Architecture des différentiels

L'analyse qui suit est en grande partie issue de l'étude de concurrence réalisée dans le cadre de ces travaux et a porté sur plus de 20 véhicules différents récents (tous encore commercialisés en 2003) de 15 constructeurs différents européens, américains et japonais [ROB03]. Les différentiels étudiés ont fonctionné durant quelques 2000 à 3000 kilomètres sur des véhicules achetés neufs dans le but de vérifier les performances, consommations, ... avant de les démonter complètement. Une étude de la géométrie, des matériaux et des traitements thermiques des pignons a été réalisée à partir de ces différentiels et sera présentée en détail au

chapitre IV. Nous présentons ici quelques tendances générales afin d'illustrer la conception actuelle des différentiels.

L'architecture la plus répandue est celle qui est présentée sur la figure II.1-3. D'un point de vue purement cinématique, un seul pignon satellite suffit. Afin de diminuer les forces appliquées sur les dents d'un satellite, deux satellites sont usuellement utilisés permettant de réduire d'un facteur de deux les efforts sur la denture. De plus, dans le cas d'un seul satellite, la force de contact sur les dents induirait un moment sur la liaison pivot entre les planétaires et le boîtier de différentiel. L'arbre guide satellites (7) est en liaison complète par rapport au boîtier (3) lors du fonctionnement. Les satellites sont en liaison pivot glissante par rapport à cet arbre et c'est la composante axiale de la force transmise par le satellite aux planétaires qui permet de maintenir le contact entre satellite et boîtier. Les planétaires droit et gauche transmettent le couple de forces reçu par les satellites aux arbres de transmission respectivement droit et gauche du véhicule par l'intermédiaire des cannelures visibles sur la figure. Les rondelles sphériques s'interposent entre les différents pignons et le boîtier afin d'éviter l'usure du boîtier au niveau du contact qui se fait avec mouvement relatif dès que les roues droite et gauche ne tournent pas à la même vitesse (ce qui est le cas la plupart du temps). En effet, le matériau du boîtier étant de la fonte alors que les pignons sont en acier qui a subi un traitement de durcissement superficiel, on choisit d'ajouter des rondelles de dureté élevée (pour diminuer l'usure) qui seront immobiles en rotation par rapport au boîtier (grâce à un coefficient de frottement plus élevé entre rondelle et boîtier qu'entre rondelle et pignon). La couronne d'entrée (5) est en liaison complète par rapport au boîtier grâce ici à des vis (parfois avec des rivets ou encore par frettage associé au collage) et permet de transmettre le couple de sortie de la boîte de vitesses au boîtier de différentiel qui est lui-même en liaison pivot par rapport au carter de la boîte de vitesses grâce aux deux roulements coniques (6).

Au niveau des surfaces d'appui entre les planétaires et le boîtier il existe deux possibilités. On peut choisir soit une sphère associée aux cannelures (cas de la figure II.1-3) soit un appui plan associé à une surface cylindrique extérieure usinée (voir figure II.1-4). En ce qui concerne les satellites, ils possèdent forcément une surface d'appui sphérique dans le cas, le plus répandu, d'un boîtier en une seule partie pour une raison de montage (par rotation des satellites autour de l'axe des planétaires pour les mettre en position en face de l'arbre guide satellite).



7	Arbre guide satellites
6	Roulements
5	Couronne d'entrée
4	Rondelle sphérique
3	Boîtier de différentiel
2	Pignon satellite
1	Pignon planétaire
Nb	Désignation

Figure II.1-3 : Exemple d'un différentiel à architecture classique démonté



Figure II.1-4 : Exemple de guidage de planétaires avec appui plan : a) vue d'ensemble du différentiel ; b) détail d'un planétaire montrant la surface plane d'appui et le cylindre court assurant le centrage sur le boîtier

Une autre architecture est parfois utilisée : il s'agit d'augmenter le nombre de satellites au dessus de deux. Il est ainsi possible d'avoir trois ou quatre satellites dans un différentiel, le cas le plus utilisé ici étant quatre satellites (voir l'exemple sur la figure II.1-5). Ceci permet de pouvoir passer un couple plus élevé dans un même encombrement mais nécessite des pièces supplémentaires et génère bien sur un surcoût. Cette solution est utilisée en pratique lorsque l'encombrement du boîtier de différentiel ne doit pas être augmenté malgré l'augmentation du couple à transmettre (soit pour des raisons de standardisation des boîtiers ou des carters de boîte de vitesses, soit pour des raisons d'encombrement limite sur le véhicule).



Figure II.1-5 : Exemple de différentiel avec quatre satellites

Voici un dernier exemple d'architecture originale : utiliser la même pièce pour réaliser un planétaire du différentiel et la tulipe du joint de transmission tripode. Un exemple est donné sur la figure II.1-6.



Figure II.1-6 : Exemple d'intégration de fonctions dans un même produit forgé : a) vue d'ensemble du différentiel ; b) détail du planétaire solidaire de la tulipe obtenu par extrusion

On constate aujourd'hui une évolution vers les différentiels à pignons forgés net shape puisque sur 28 modèles étudiés 18 sont forgés et 10 usinés (64% sont donc forgés). De plus, la plupart des constructeurs étudiés ici possèdent des modèles usinés et d'autres forgés ce qui signifie très probablement que leurs modèles usinés vont progressivement disparaître au profit des forgés.

De l'étude des matériaux sur ces 28 modèles, il ressort notamment une assez grande diversité des nuances utilisées en fonction des constructeurs, voire même en fonction des pays des constructeurs. Il s'agit bien sûr toujours d'aciers sur lesquels un durcissement superficiel a été réalisés mais même les épaisseurs de couche durcie superficiellement varient en fonction des constructeurs.

Dans le cas des pièces forgées il existe également plusieurs gammes possibles. Pour des pièces de petite taille, il est possible de forger directement à froid en une seule étape (à partir d'une ébauche tubulaire) et pour les pièces de taille supérieure il existe deux possibilités : soit le forgeage à chaud suivi d'une étape de calibration à froid, soit le forgeage à « mi – chaud » permettant, éventuellement, d'éviter l'étape de calibration et permettant surtout de forger des pignons avec des dents d'épaisseur minimale plus faibles. Ces différentes gammes sont expliquées dans le paragraphe II.4. Elles se retrouvent sur les différentiels étudiés (visible surtout sur les épaisseurs en sommet de dent).

Une étude de pré - dimensionnement des solutions forgées net shape à partir des caractéristiques moteur et boîte de vitesses, de la géométrie ainsi que des matériaux a été réalisée et sera développée dans la partie IV. Elle a permis de comparer les différentes conceptions entre elles. Parmi les conclusions, il est à noter que les constructeurs, ou plutôt souvent les sous traitants de ceux-ci, ne sont pas arrivés à des solutions de qualité égale. Une des raisons est que dans la plupart des cas la géométrie utilisée pour les pignons forgés est basée sur celle des pignons usinés qu'ils doivent remplacer en y intégrant uniquement les contraintes imposées par le procédé de forgeage. Les contraintes géométriques de fabrication des pignons usinés étant beaucoup plus restrictives que celles des pignons forgés, les potentialités du procédé de forgeage ne sont pas exploitées.

II.1.3 Conclusion

Ce premier travail d'observation conclue à l'existence de nombreuses possibilités de concevoir un différentiel qui sont fonction, par exemple :

- ✓ de l'encombrement disponible dans le boîtier,
- ✓ du nombre de satellites,
- ✓ du nombre de dents des satellites,
- ✓ du nombre de dents des planétaires,
- ✓ de la géométrie des dents,
- ✓ des matériaux ainsi que des traitements thermiques,
- ✓ du procédé d'obtention des pignons, ...

Ainsi le nombre de paramètres à déterminer est très important. Il faut donc, pour augmenter la qualité des solutions, mettre en place des critères, des indicateurs, associés à une formalisation des activités de conception, fabrication et contrôle pour permettre de faire des choix technologiques, c'est-à-dire des choix techniques basés sur une démarche scientifique et intégrant les aspects économiques.

II.2 Les outils de formalisation

Il est important de préciser que le travail de thèse est concentré sur l'intégration des connaissances des métiers de fabrication dans la conception. Il s'agit de travailler sur les activités (concernant les phases de conception, d'industrialisation, de production et de contrôles de fonctionnalité du produit) et les informations associées et échangées.

Un outil de description devient alors nécessaire afin de formaliser l'existant dans le but de chercher à l'améliorer. L'objet du paragraphe II.2.1 est de faire le choix de cet outil.

Lorsque ce travail d'analyse et d'amélioration de l'existant a été effectué, il est également intéressant de le capitaliser. Nous examinons cet aspect dans le paragraphe II.2.2.

Enfin, dans le paragraphe II.2.3, nous expliquons comment la notion d'entité technologique peut y participer.

II.2.1 Choix d'un outil de description d'activités et d'informations associées

Dans son rapport de thèse, Eynard [EYN99], effectue une synthèse bibliographique très complète sur les modèles applicables en ingénierie des produits mécaniques. Dans son chapitre 2, consacré à l'ingénierie des produits et aux modélisations associées, il présente un état de l'art des modèles de produit, des modèles d'activité et de processus et des modèles dédiés au processus d'ingénierie. Il entend par ingénierie l'ensemble des activités qui concourent à la définition d'un produit et de ses modes de production. Ses travaux de thèse ont permis de proposer une extension du modèle GRAI [PUN85] au processus de conception afin de contribuer à la conduite et à la traçabilité du processus d'ingénierie. L'objectif est de faciliter le pilotage global de la conception et de l'industrialisation pour des entreprises travaillant avec des produits de conception routinières ou innovantes. Le modèle qu'il a développé ne concerne donc pas notre besoin mais son analyse de l'existant fait ressortir que parmi les modélisations connues de la littérature en 1999, IDEFØ est celui qui nous convient le mieux. Précisons que nos critères de sélection étaient la simplicité de lecture, la possibilité d'obtenir une vue globale des activités d'un processus de conception et fabrication en conception routinière ainsi que de pouvoir le détailler plus ou moins finement sur certaines activités. La méthode IDEF et le modèle IDEFØ [COL93] sont très répandus dans le domaine de la conception notamment. Il permet de décrire hiérarchiquement un système de nature quelconque en identifiant les activités et les échanges entre activités. Il est ainsi possible d'avoir une vue globale du processus de conception et fabrication et il est aussi possible de détailler les informations et les activités avec des niveaux hiérarchiques. Par contre l'aspect séquençement des activités ne peut être représenté mais n'est pas indispensable dans notre cas comme nous le montrerons par la suite. Néanmoins il serait possible de compléter ce modèle par un modèle IDEF3 dédié à la représentation de processus [MAY92] [VER96].

La synthèse proposée par Eynard [EYN99], qui passe en revue les modèles IDEFØ et IDEF3, les réseaux de Petri et les réseaux GRAI pour le domaine des modèles génériques d'activités et de processus est la suivante : « Les méthodes IDEF se révèlent de bons outils de communication de par les représentations graphiques simples et bien formalisées qu'elles exploitent. Elles fournissent des moyens d'analyse et de synthèse (ce qu'est ou ce que doit être le système) efficaces et d'une utilisation aisée. La représentation hiérarchique multi-niveaux se révèle intéressante, car le passage du global au détail facilite la compréhension de systèmes même complexes. » et il précise que les points faibles sont la subjectivité du formalisme et l'absence de représentation du séquençement d'un processus pour IDEFØ, ce qui en fait un outil de représentation purement statique.

La figure II.2.1-1 rappelle le formalisme général de la représentation IDEFØ pour des activités. Chaque activité est indiquée par une phrase brève avec un verbe à l'infinitif inscrite dans un rectangle que nous appellerons boîte. Une activité principale est en général décrite par

plusieurs niveaux. Le niveau le plus élevé est noté A-0 (« A moins 0 ») et représente l'activité principale. Le diagramme de niveau inférieur A0 se décompose en un diagramme composé de n boîtes notées de A1 à An qui doit s'inscrire très exactement dans le diagramme de niveau immédiatement supérieur (voir figure II.2.1-2). Chaque activité A1 jusqu'à An peut se décomposer au niveau inférieur noté niveau A1 puis aux niveaux encore inférieurs A2, A3, ... Ak.

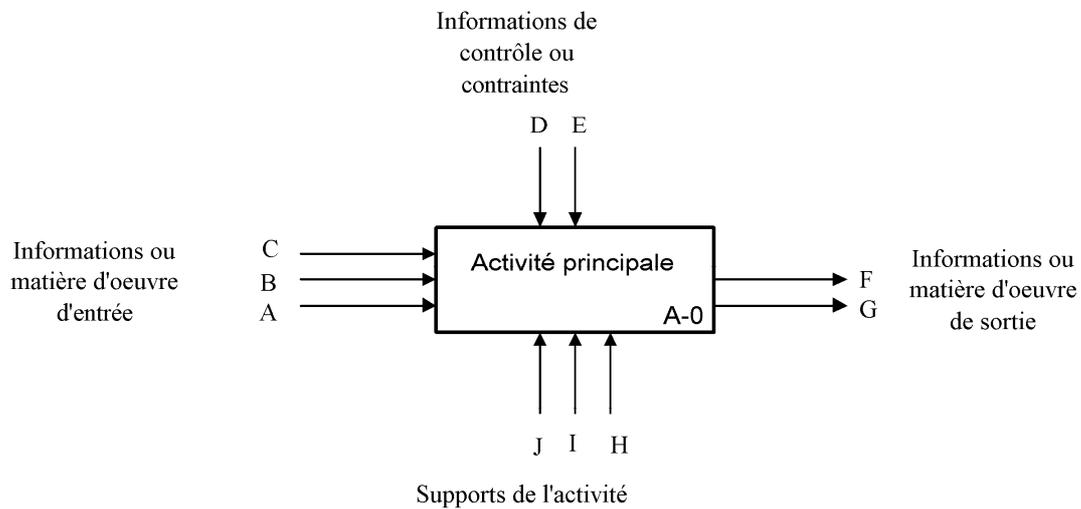


Figure II.2.1-1 : représentation générale au niveau A-0 d'une activité selon IDEF0

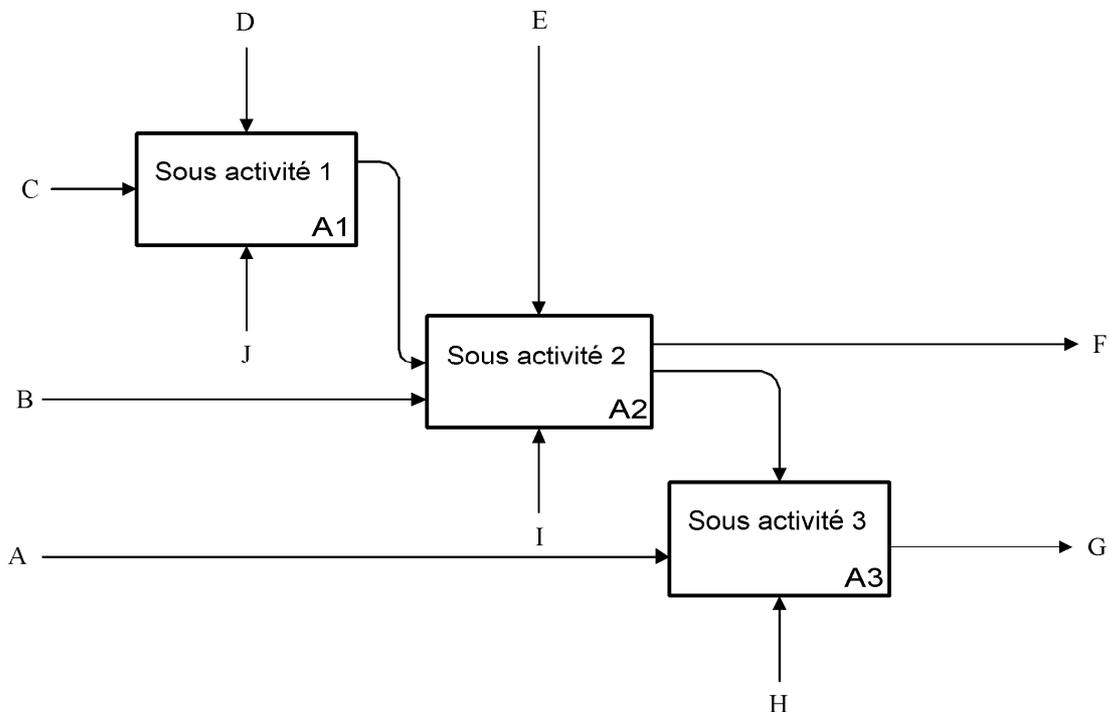


Figure II.2.1-2 : représentation générale au niveau A0 de l'activité principale de la figure II.2.1-1

II.2.2 Capitalisation des connaissances

Précisons que dans notre démarche nous ne nous situons pas dans un cas générique de conception d'un produit mais que beaucoup d'éléments sont identifiés au début (en comparaison avec les applications dans la littérature sur les modèles) :

- Le procédé principal est connu, puisque le contexte est précisément celui de l'évolution des procédés en vue d'améliorer la qualité des produits. Il reste néanmoins à prendre en compte les contraintes et surtout les potentialités complémentaires permises par le procédé principal tout en étudiant les procédés complémentaires nécessaires à la finition des pièces.
- Le produit est décrit en grande partie, il reste à définir des variantes et pour les pièces principales le constituant à définir plus finement la géométrie et le dimensionnement mécanique.
- Les ressources :
 - Au niveau de la fabrication, elles sont en grande partie imposées par les machines disponibles mais il reste des libertés possibles au niveau des outillages, des gammes par exemple.
 - Au niveau du contrôle de la fonctionnalité du produit des plus grandes libertés sont permises
 - Au niveau de la conception, les outils ne sont pas définis à priori comme par exemple le dimensionnement mécanique.

Le travail d'analyse et d'amélioration de l'existant peut donc être formalisé au travers d'outils développés spécifiquement au niveau des différentes activités. Ces outils spécifiques peuvent participer à la capitalisation de cette nouvelle démarche de conception – fabrication – contrôle mais il faut y associer la connaissance des raisons des choix technologiques effectués car si il y a une évolution de certaines contraintes ou potentialités au cours du temps, il est indispensable d'en tenir compte. Il est possible, pour tenir compte de cet aspect, d'associer par exemple des documents et/ou des procédures aux différents outils spécifiques sur lesquels une mise à jour de certaines données, informations ou voir même, connaissances serait nécessaire le cas échéant. Mais cela suppose une certaine vigilance des différents acteurs, voir même d'un acteur supervisant une grande partie du processus de conception – fabrication – contrôle afin d'éviter que certaines évolutions ne passent inaperçues car ne concernant, à priori, qu'une activité du cycle alors qu'en réalité elles influent sur d'autres activités. Nous avons donc cherché dans la littérature comment les modélisations de produit et de processus pourraient nous permettre de rendre plus dynamique cette capitalisation de la nouvelle démarche mise en place. Dans cette recherche, nous avons privilégié les outils de capitalisation les plus proches des applications industrielles.

A partir de la synthèse bibliographique présentée dans [EYN99], un modèle proche de notre domaine d'application est le modèle de processus de conception de Vargas [VAR95] qui complète le modèle de produit de Saucier [SAU97] et qui s'intéresse à la conception routinière de familles de produit en mécanique avec une application aux culasses automobiles. L'objectif de ce modèle est de supporter le travail des concepteurs et de capitaliser un historique de la conception. Ce modèle intègre le produit et le processus de conception et il comporte les aspects dynamiques, c'est-à-dire notamment la possibilité d'adapter le processus de conception en fonction des résultats et des choix précédents la tâche de conception à effectuer. Par ailleurs, ce modèle de processus de conception « permet de suivre les évolutions technologiques puisque sa mise à jour se fait sans mettre en cause la description du produit ou des autres tâches et méthodes. Il représente, par là même, une capitalisation du savoir faire de

l'entreprise ». Ce modèle peut donc permettre à priori de prendre en compte des évolutions éventuelles à chaque nouvelle variante conçue. Dans notre contexte, la mise en place d'un tel modèle nous paraît difficile. Ces travaux de thèse ([VAR95] et [SAU97]) ont été effectués dans le cadre du projet européen DEKLARE dans lequel le groupe PSA Peugeot Citroën a pris part. Par la suite, la Direction des Plates-formes, des Techniques et des Achats du même groupe a mis en place un cadre industriel permettant d'adresser ce type de problématique : le cadre KEHPREN [COP02]. Le principal objectif est d'intégrer et de capitaliser des connaissances et des savoir-faire de définition des produits. Plus précisément, le cadre Kephren a pour objet de sélectionner, de développer et de mettre en œuvre des applications d'aide à la conception, destinées aux concepteurs et projeteurs, intégrant des savoir-faire métier (voir figure II.2.2-1). Il ressort de cette expérience que la démarche employée et les outils existants, supportant cette démarche, sont en adéquation avec les besoins exprimés par les utilisateurs (maintenabilité aisée, bonne ergonomie d'utilisation, intégration au poste de travail, ...).

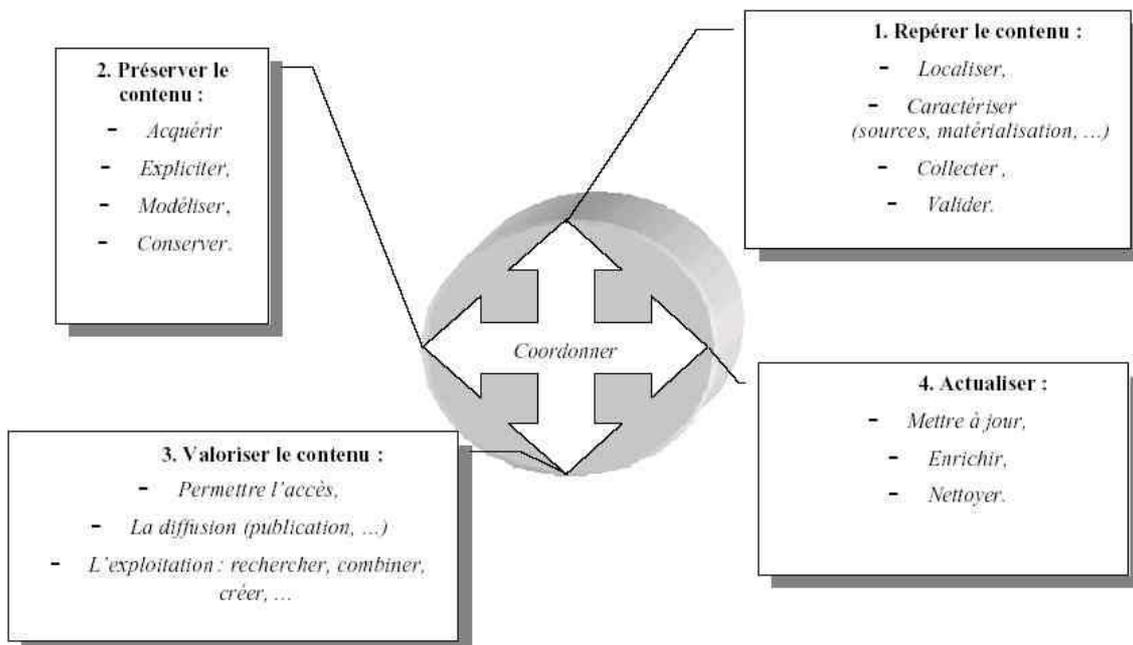


Figure II.2.2-1 : Démarche dans le cadre du projet PSA « KEHPREN » [COP02]

Pour compléter la synthèse bibliographique précédente on peut citer notamment les travaux de thèse de Labrousse [LAB04] qui propose un modèle conceptuel unifié pour la gestion dynamique des connaissances d'entreprises. Les connaissances produit, processus et ressources sont couplées grâce à un modèle générique basé sur les concepts de fonction, de comportement et de structure (FBS-PPR: Functional Behaviour Structure – Product Process Resources). Ces travaux visent à améliorer l'intégration et la traçabilité des éléments des processus d'entreprise pour analyser et extraire les éléments réutilisables. Les aspects dynamiques de la connaissance sont pris en compte par la modélisation proposée. Il s'agit ici d'une démarche plus globale que celles présentées précédemment.

II.2.3 Approche par entités

Lors de la conception d'une nouvelle variante de produit, il est nécessaire dans le cadre de la conception intégrée de centraliser toutes les informations liées au produit dans un modèle informatique de référence, centralisé et partagé entre les différents acteurs. Il ne s'agit pas ici de s'intéresser à cet aspect général du problème qui a déjà fait l'objet de nombreux travaux comme l'indique A. Bernard dans une synthèse sur les principaux modèles et approches pour la conception et la fabrication intégrées [BER00]. Nous avons, par contre, mené une réflexion sur la notion d'entité technologique généralement associée au modèle de produit et de processus, comme cela est souligné également dans [BER00]. On retrouve d'ailleurs cette notion d'entités technologiques dans les travaux de [VAR95]. Cette notion est également présente dans les travaux concernant plus spécifiquement l'intégration des vues métiers dans la conception [BEL 94] [TIC96]. Précisons que ces travaux ont pour but de tenir compte du point de vue métier du fabricant dans le cas général de la conception d'un produit mécanique. Cette approche très générique peut s'appliquer au cas de la conception routinière de produits et en particulier de différentiel automobile, support de nos travaux.

Par exemple, dans le domaine des produits forgés à froid, Zhang et al. [ZHA04] ont développé un « modèle d'information produit » en langage XML permettant de décrire l'ensemble des informations relatives au produit et permettant de transmettre les données produit par web. Ils précisent que l'évolution des modèles utilisés dans les systèmes de CFAO (voir figure II.2.3-1) a permis d'intégrer la notion de « modélisation par entité ». Ils ajoutent qu'avec le développement de l'intelligence artificielle, c'est le modèle de connaissance du produit qui est de plus en plus utilisé aujourd'hui [ZHA04]. La figure II.2.3-2 montre les entités géométriques qui ont été définies dans ce travail.

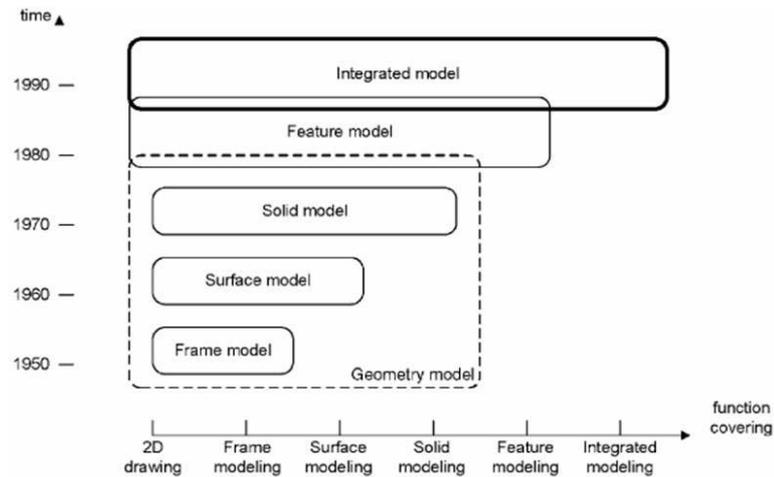


Figure II.2.3-1 : évolution des modélisations de produit

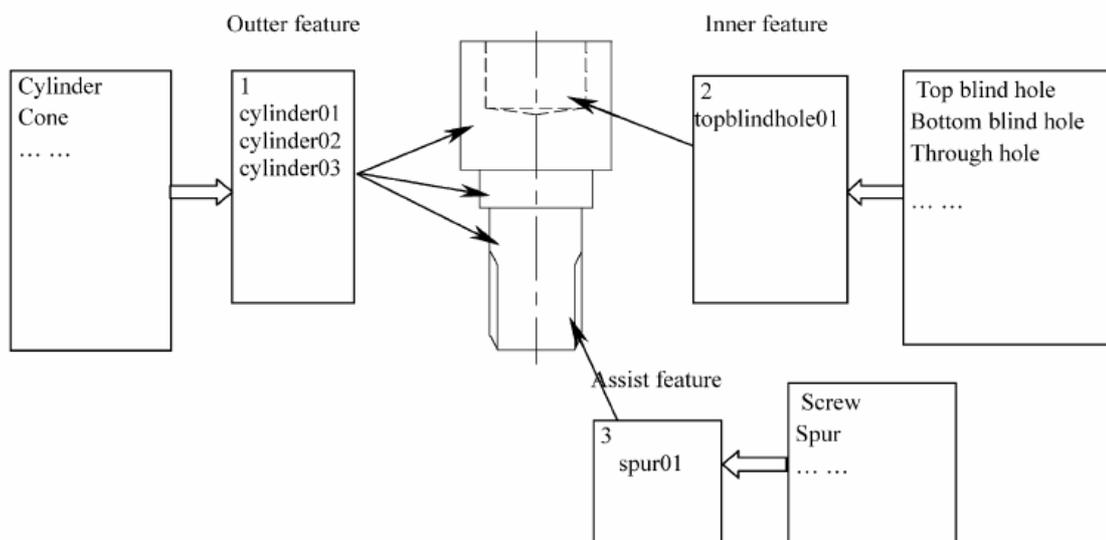


Figure II.2.3-2 : exemples d'entités pour des pièces forgées à froid [ZHA04].

Une définition générale de l'entité a été donnée par le groupe GAMMA [GAM90] :

« Groupement sémantique (atome de modélisation) caractérisé par un ensemble de paramètres, utilisé pour décrire un objet indécomposable utilisé dans le raisonnement relatif à une ou plusieurs activités liées à la conception et l'utilisation des produits et des systèmes de production ». Le lecteur trouvera une synthèse sur la modélisation par entités dans [TOL98].

Nous retiendrons que la notion d'entité permet de faire un lien entre la conception du produit et certains aspects de la fabrication. Une approche par entités permet de formaliser les informations technologiques du produit en tenant compte des différentes vues associées aux acteurs métiers. Cela permet de faciliter les échanges entre les différents acteurs du processus de conception et fabrication. Nous proposons plus loin au chapitre II.3.2, dans le cas de notre application, une réflexion débouchant sur la définition d'entités applicables à la définition du produit, à sa fabrication et au contrôle de sa fonctionnalité.

II.2.4 Conclusion

Dans cette partie II.2, nous avons montré pourquoi la méthode IDEFØ nous semble bien appropriée à la représentation des activités liant les différents états d'un produit entre le cahier des charges et la fabrication. Après avoir précisé les particularités du contexte dans lequel notre démarche se situe, nous avons analysé certains outils de capitalisation des connaissances existants. Enfin, nous avons constaté que la notion d'entité est particulièrement intéressante pour compléter la formalisation et la capitalisation des informations technologiques.

Nous allons situer maintenant nos travaux sur les pignons forgés vis-à-vis de la conception de pièces forgées et la fabrication de pignons coniques.

II.3 Conception et fabrication de pignons coniques

II.3.1 Géométrie

La géométrie exacte des surfaces actives d'engrenages coniques à dentures droites est basée sur des courbes dites de développante de cercle sphérique [HEN99]. Le choix de développantes de cercle sphériques permet notamment d'obtenir un couple de surfaces conjuguées et donc un engrenement homocinétique. La figure II.3.1-1 montre la génération, d'un point de vue géométrique, d'une développante de cercle sphérique. Sur cette figure, le plan (Pb) passant par le centre S de la sphère de rayon R roule sans glisser sur le cône de base de demi-angle au sommet δ_b . Le plan N est normal à Pb et lui est invariablement lié. Du point de vue de l'engrenage, le plan (Pb) est appelé plan d'action et sa trace sur la sphère, qui est un grand cercle de cette sphère, est la ligne d'action.

Le profil de la denture est décrit par le point M intersection de cette ligne d'action avec le plan de génération (N).

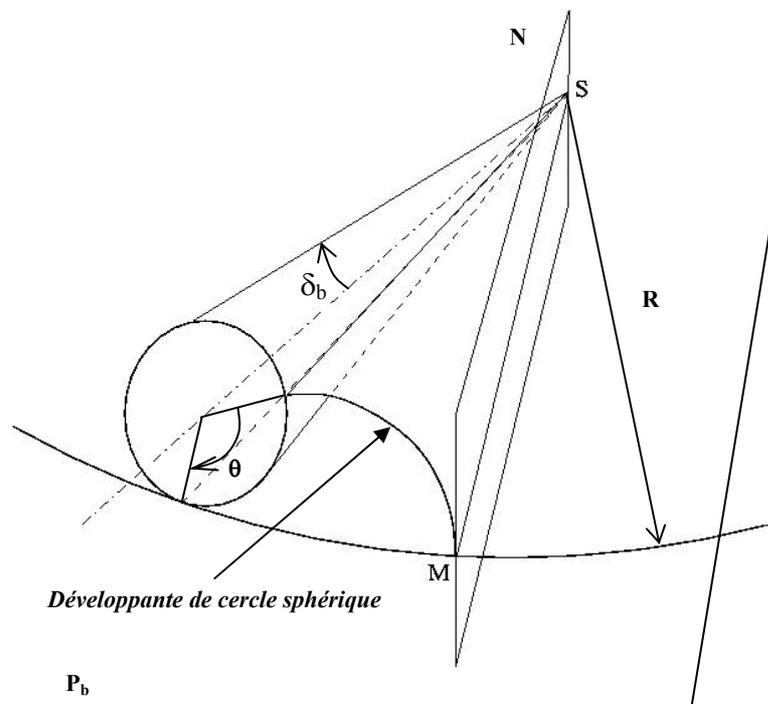


Figure II.3.1-1 : génération d'une développante de cercle sphérique

Une démonstration permettant d'obtenir les coordonnées d'un point d'une développante de cercle sphérique a été proposée notamment par Bouaziz [BOU96] sous forme d'équations paramétrées.

Ces coordonnées dans un repère cartésien s'écrivent :

$$X=[a \cos\theta \cos(a\theta) + \sin\theta \sin(a\theta)]R \quad (\text{II.1})$$

$$Y=[a \sin\theta \cos(a\theta) - \cos\theta \sin(a\theta)]R \quad (\text{II.2})$$

$$Z=[b \cos(a\theta)]R \quad (\text{II.3})$$

avec $a=\sin\delta_b$, $b=\cos\delta_b$

Notons (SII.1) le système d'équations paramétrées constitué des trois équations précédentes. En générant deux surfaces à développante de cercle sphérique à partir de deux cônes primitifs tangents suivant leur génératrice, on obtient deux surfaces conjuguées : les profils de denture restent tangents lors de l'engrènement.

Le rapport des vitesses angulaires ne dépend que du rapport du diamètre des cercles primitifs des deux roues, le rapport des vitesses angulaires est donc constant, la transmission du mouvement est donc bien homocinétique.

Sur la figure II.3.1-2, on peut voir les différentes dimensions caractéristiques d'un engrenage concourant. On notera en particulier :

- Le diamètre primitif extérieur d ,
- La largeur de denture b ,
- La génératrice primitive R ,
- L'angle primitif δ .

Dans le cas du différentiel l'angle entre les deux axes, noté Σ , sera égal à 90° .

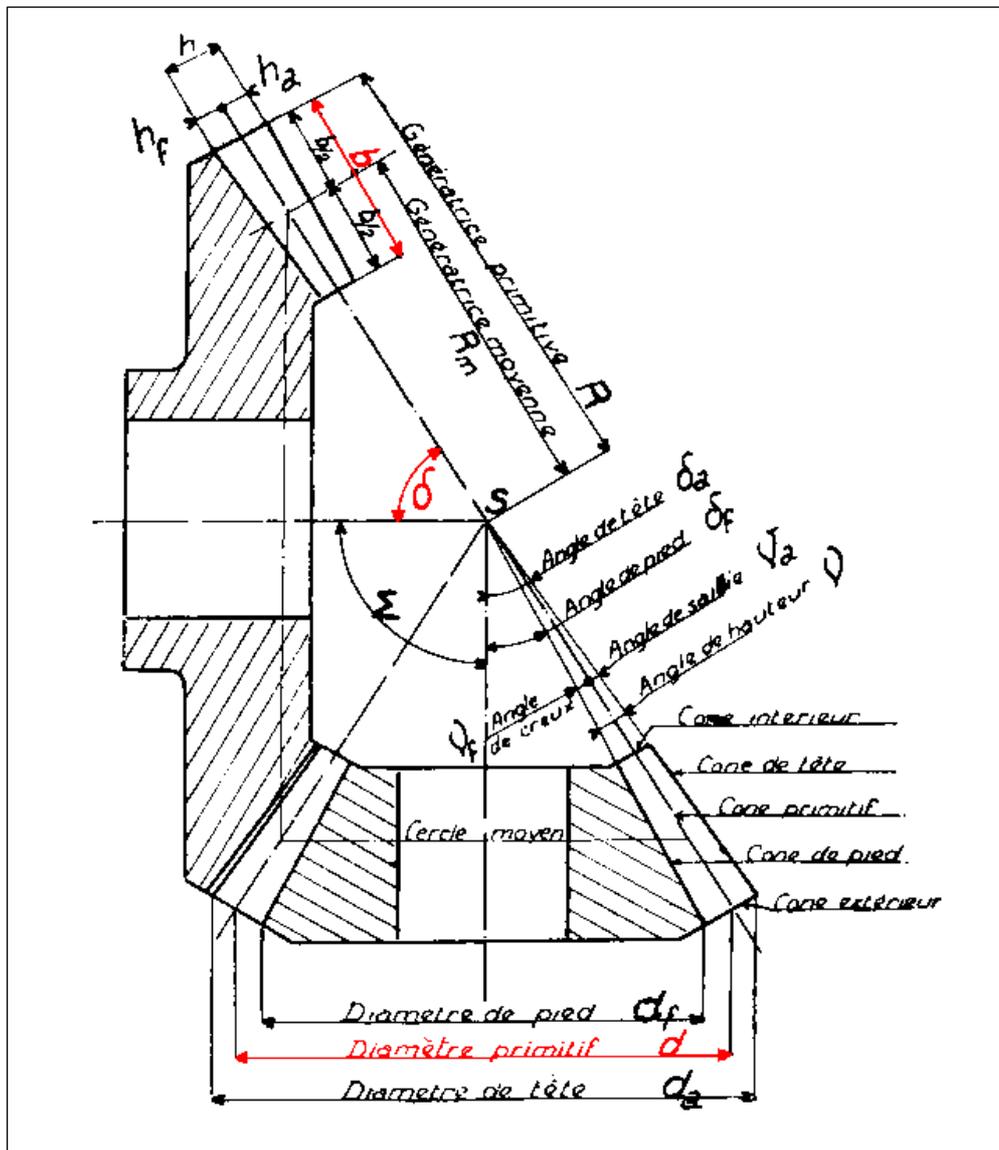


Figure II.3.1-2 : Nomenclature d'un engrenage concourant, section axiale [HEN99]

La méthode utilisée pour le taillage des engrenages coniques pour différentiels en très grande série est la méthode Gleason Revacycle (les aspects fabrications font l'objet du paragraphe II.4.3) [HEN99, BOU96]. Cette méthode impose des définitions géométriques des surfaces de denture intimement liées aux réglages de la machine de taillage. Nous présentons sur la figure II.3.1-4 les paramètres géométriques qui ont été définis par la firme Gleason pour la conception géométrique des pignons coniques pour différentiels automobiles. La nomenclature correspondante est donnée sur les figures II.3.1-2 et II.3.1-3.

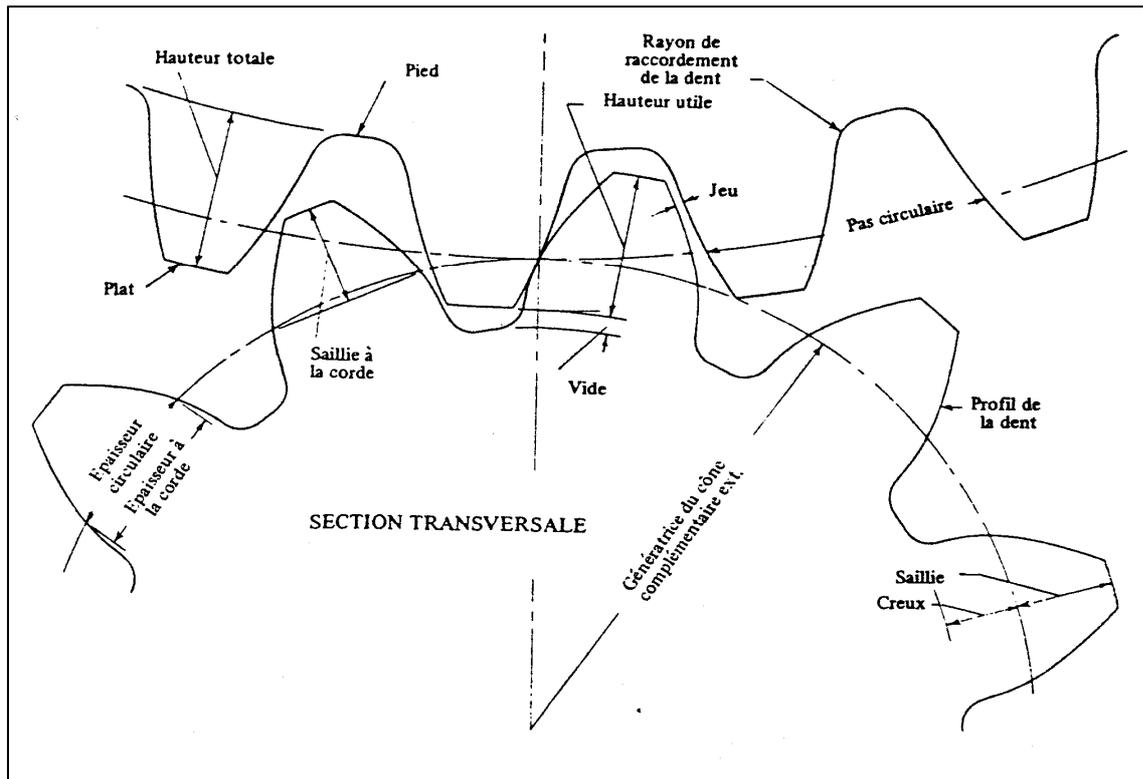


Figure II.3.1-3 : Nomenclature d'une paire d'engrenages coniques, section apparente [HEN99]

Nombre de dents de pignon	Z_1	Profondeur utile	$h_K = 1,6.m$
Nombre de dents de la roue	Z_2	Profondeur totale	$h_t = 1,788.m+0,051$
Module	m	Angle de pression	α
Largeur de denture	b	Angle des axes	$\Sigma = 90^\circ$
	Pignon	Roue	
Diamètre primitif	$d_1 = m.Z_1$	$d_2 = m.Z_2$	
Angle primitif	$\delta_1 = \text{Arctan}(Z_1/Z_2)$	$\delta_2 = \Sigma - \delta_1$	
Génératrice extérieure	$R = d / (2.\sin(\delta_1))$		
Pas circulaire	$p = \pi.m$		
Saillie	$h_{a1} = h_K - h_{a2}$	$h_{a2} = m.(0,43 + 0,37.(Z_1/Z_2)^2)$	
Creux	$h_{f1} = h_t - h_{a1}$	$h_{f2} = h_t - h_{a2}$	
Vide	$c = h_t - h_K$		
Angle de creux	$\nu_{f1} = \text{Arctan}(h_{f1}/R)$	$\nu_{f2} = \text{Arctan}(h_{f2}/R)$	
Angle de tête	$\delta_{a1} = \delta_1 + \nu_{f2}$	$\delta_{a2} = \delta_2 + \nu_{f1}$	
Angle de pied	$\delta_{f1} = \delta_1 - \nu_{f1}$	$\delta_{f2} = \delta_2 - \nu_{f2}$	
Epaisseur circulaire	$s_1 = p - s_2$	$s_2 = p/2 - (h_{a1} - h_{a2}).\tan \alpha - K.m$	
Jeu réel	j		
Epaisseur à la corde	$\overline{S}_1 = s_1 - (s_1^3/6.d^2) - j/2$	$\overline{S}_2 = s_2 - (s_2^3/6.d^2) - j/2$	

Figure II.3.1-4 : dimensions GLEASON des engrenages coniques à denture droite générée pour différentiels de véhicules automobiles

Les équations de la figure II.3.1-4 lient certains paramètres entre eux, par exemple la hauteur h_t est reliée au module, m , par la relation :

$$h_t = 1,788.m + 0,051 \quad (\text{II.4})$$

Dans le cas d'une conception de pignon forgé, ces contraintes liées au taillage Gleason deviennent caduques. Ainsi, nous avons décidé de définir de nouvelles caractéristiques géométriques, basées sur la géométrie en développante de cercle sphérique. Ceci permet de maîtriser la géométrie qui sera utilisée aussi bien en modélisation en CAO qu'en fabrication des matrices de forgeage. Cette approche utilise une définition de la denture conique basée sur des angles en opposition à une définition basée sur des distances. Les principaux points de cette approche [BRU05a] sont présentés ci après.

Le vocabulaire et les notations habituelles dans le domaine des engrenages sont les suivants : Un engrenage est constitué d'un pignon et d'une roue. Le pignon est celui qui possède le plus petit nombre de dents. La roue est celle qui possède le plus grand nombre de dents. Par convention, l'indice 1 est affecté aux grandeurs relatives au pignon et l'indice 2 aux grandeurs relatives à la roue.

Une **courbe en développante de cercle sphérique** est définie par 4 paramètres (voir équations (II.1),(II.2) et (II.3)) qui sont :

- Le rayon de la sphère (appelé aussi génératrice primitive) noté R
- L'angle du cône de base noté δ_b
- La valeur initiale de l'angle de définition de la développante notée θ_i
- La valeur finale de l'angle de définition de la développante notée θ_f

θ est le paramètre permettant de décrire la courbe développante de cercle sphérique définie par le système d'équations (SII.1).

Pour définir une **surface en développante de cercle sphérique** il suffit d'ajouter un paramètre qui est un autre rayon de sphère. Ainsi on délimite une surface réglée entre deux courbes de développante de rayons différents appelés respectivement rayon extérieur (ou génératrice primitive extérieure) et rayon intérieur (ou génératrice primitive intérieure) et notés R_{ext} et R_{int} . Les trois autres caractéristiques de ces deux courbes sont identiques. Une **surface en développante de cercle sphérique** est donc définie par 5 paramètres.

Pour définir un **engrenage conique** il faut d'abord définir deux surfaces en développante de cercle sphérique engrenant l'une avec l'autre. Pour cela il faut se donner un rapport de transmission (noté u et défini comme le rapport de la vitesse de rotation du pignon sur celle de la roue) et un angle entre les deux axes des pignons engrenant. Dans le cas d'un différentiel, l'angle entre les deux axes vaut 90° et c'est donc la valeur que nous utiliserons dans la suite. Soient d_1 et d_2 les diamètres primitifs mesurés sur la sphère extérieure du pignon et de la roue et soient δ_1 et δ_2 les demi angles au sommet des cônes primitifs du pignon et de la roue (voir figure II.3.1-5). Les deux cônes primitifs sont des cônes imaginaires dont les sommets sont confondus avec le centre de la sphère, dont les axes sont confondus avec l'axe de révolution de chaque pignon et qui ont pour propriété d'être tangents entre eux. Les angles au sommet de chaque cône sont tels qu'il y a roulement sans glissement entre ces deux cônes lors de l'engrènement. Le rapport de transmission s'écrit donc :

$$u = \frac{d_2}{d_1} \quad (\text{II.4})$$

La relation entre δ_i et d_i s'écrit

$$d_i = R \sin \delta_i \quad (\text{II.5})$$

Dans le cas d'un angle entre les deux axes de 90° on peut écrire :

$$\delta_1 + \delta_2 = \frac{\pi}{2} \quad (\text{II.6})$$

En combinant (II.4) (II.5) et (II.6) on obtient :

$$u = \frac{1}{\tan(\delta_1)} \quad (\text{II.7})$$

Les équations (II.6) et (II.7) montrent que le choix du rapport de transmission impose les angles primitifs δ_1 et δ_2 .

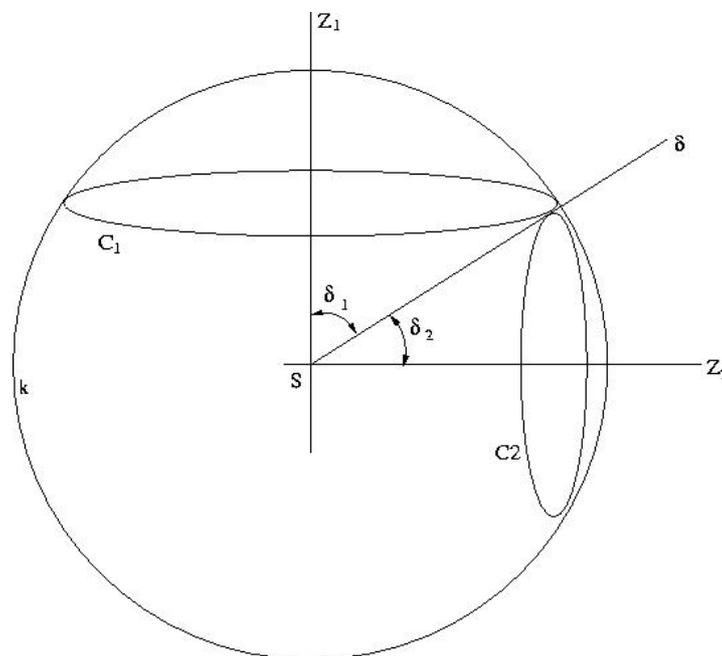


Figure II.3.1-5 : cônes primitifs et cercles primitif

II.3.2 Démarche de définition géométrique d'un engrenage conique :

II.3.2.a Détermination des deux surfaces en développantes

Pour définir la cinématique d'un engrenage conique on commence ainsi par définir les cônes primitifs. Les surfaces actives des dents sont définies par 5 paramètres parmi lesquels ne figurent pas les angles primitifs (voir plus haut). En fait, les demi angles du cône primitif et du cône de base sont reliés par :

$$\delta_{bi} = \arcsin(\sin \delta_i \cos \alpha) \quad (\text{II.8})$$

Où α désigne l'angle de pression de l'engrenage.

L'encombrement disponible impose le rayon de sphère extérieure.

Le rayon de sphère intérieure est choisi pour obtenir une certaine largeur de denture.

II.3.2.b Définition des paramètres en rapport avec les hauteurs de dents

Les deux angles de définition de la développante, notés θ_i et θ_f , ne sont pas choisis directement mais sont fonction de deux autres paramètres : l'angle du cône de pied effectif et l'angle du cône de tête effectif. La notation « effectif » concerne la limite de la zone en développante de cercle sphérique. La figure II.3.1-6 représente les différents cônes ainsi que leur intersection avec la sphère extérieure. Le cône de pied utile peut être différent du cône de base afin de permettre d'améliorer le raccord entre deux dents voisines (le raccord déborde alors sur la développante). Dans le cas des engrenages de différentiel, il est préférable de choisir le cône de pied utile égal au cône de base en raison du faible encombrement disponible afin de privilégier un meilleur engrènement (rapport de conduite plus élevé).

Nous avons choisi de définir certains coefficients permettant de définir les différentes hauteurs de dents représentées sur la figure II.3.1-7.

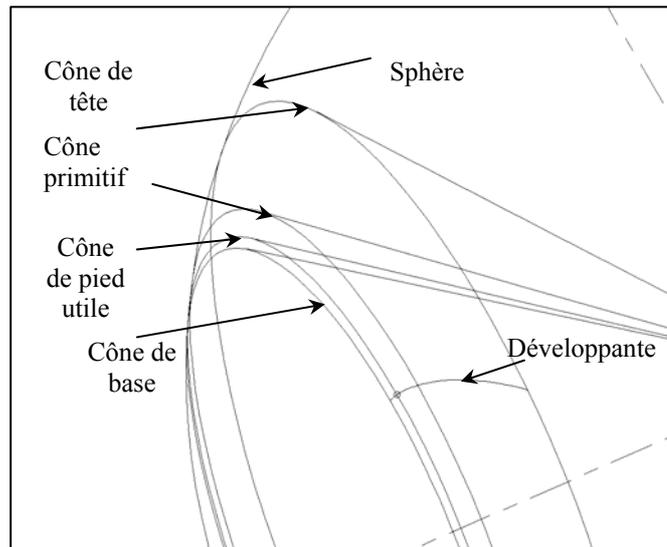


Figure II.3.1-6 : définition des différents cônes

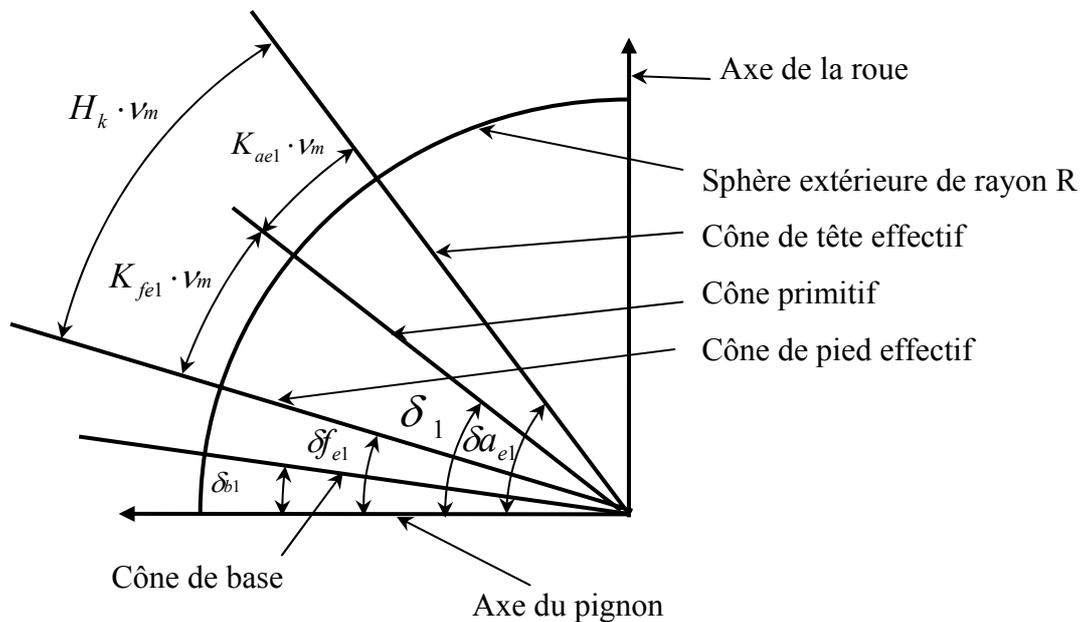


Figure II.3.1-7 : paramètres définissant les hauteurs de dents

Le module primitif de fonctionnement est défini par $m = 2 \frac{r_i}{Z_i}$

Dans le cas de la géométrie conique il est plus intéressant de raisonner en angle plutôt qu'en distance. Pour cette raison nous définissons l'angle du module sur la sphère extérieure :

$$v_m = \frac{m}{R} \quad (\text{II.9})$$

Nous définissons également les trois paramètres suivants :

Dans le cas du pignon avec les indices 1 :

K_{fe1} , K_{ae1} et H_k qui sont des coefficients de hauteur de dent analogues à ceux définis pour les pignons cylindriques mais s'appliquent à des angles. Nous écrivons :

$$\delta_{ae1} = \delta_1 + K_{ae1} \cdot v_m \quad (\text{II.10})$$

$$\delta_{fe1} = \delta_1 - K_{fe1} \cdot v_m \quad (\text{II.11})$$

$$H_k = K_{ae1} + K_{fe1} \quad (\text{II.12})$$

La figure II.3.1-7 illustre la signification géométrique de ces trois paramètres dans le cas d'un pignon (indices 1).

Le coefficient K_{fe1} ne peut pas dépasser une certaine valeur notée $K_{fe1 \max}$ car l'angle δ_{fe1} ne peut être inférieur à δ_{b1} puisque la développante n'est définie qu'à partir du cône de base. Dans le cas des pignons de différentiel nous avons choisi $K_{fe1} = K_{fe1 \max}$. Il ne reste donc plus

qu'un coefficient à choisir pour définir les hauteurs de dent, par exemple H_k qui détermine l'angle de hauteur totale effective de dent.

Nous avons jusqu'ici défini deux surfaces actives permettant d'obtenir un engrènement sur une fraction de tour. Afin d'obtenir un engrènement continu, il est nécessaire de répéter ces surfaces autour de l'axe de rotation de chaque roue dentée, ce qui nécessite de choisir un nombre de dent noté $Z1$ ou $Z2$. Pour permettre la rotation dans les deux sens, il faut encore définir la symétrie de chaque surface par rapport au plan milieu de chaque dent (plan contenant l'axe de révolution), ce qui nécessite de choisir une épaisseur circulaire de dent.

II.3.2.c Définition des paramètres en rapport avec les épaisseurs de dents

Contrairement à un pignon taillé, il est possible dans le cas d'un pignon forgé de choisir librement l'épaisseur de la dent. C'est le coefficient d'épaisseur circulaire primitive K_e qui permet de déterminer l'épaisseur circulaire primitive.

La figure II.3.1-8 représente une vue en projection d'une dent sur un plan orthogonal à l'axe de rotation du pignon. Sur cette figure sont représentés :

- Le cercle primitif qui est défini comme l'intersection du cône primitif et de la sphère extérieure
- Le cercle de base qui est défini comme l'intersection du cône de base et de la sphère extérieure
- Le cercle de tête qui est défini comme l'intersection du cône de tête et de la sphère extérieure

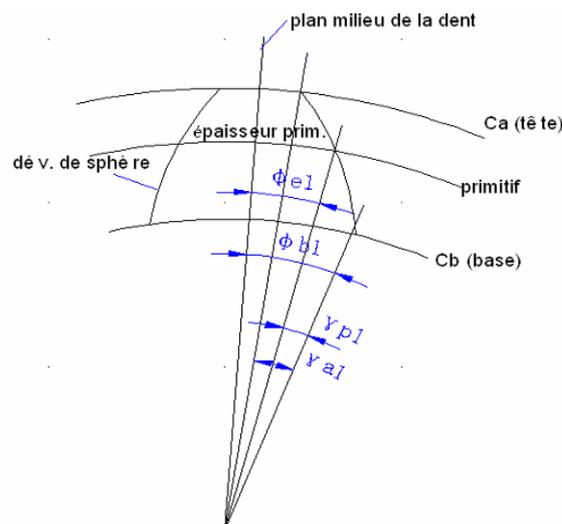


Figure II.3.1-8 : paramètres liés à l'épaisseur de dent [BRU05]

Ces trois cercles se trouvent sur trois plans parallèles au plan de la figure et ne sont pas confondus. Les angles définis (voir figure II.3.1-8) sont des angles entre les différents plans suivants : le plan milieu de la dent et les plans contenant l'axe de rotation du pignon (orthogonaux au plan de la figure II.3.1-8). Chacun de ces trois plans passent par un point particulier qui est l'intersection entre la courbe en développante sur la sphère extérieure et chacun des trois cercles primitifs, de base et de tête.

Ces angles sont constants le long de la génératrice, contrairement aux épaisseurs circulaires. Contrairement à un pignon taillé, il est possible dans le cas d'un pignon forgé, de choisir librement l'épaisseur de la dent. Nous avons donc défini le coefficient d'épaisseur circulaire primitive, noté K_{ei} , qui permet de déterminer l'épaisseur circulaire primitive. Ce coefficient permet d'un part de raisonner en angle mais nous l'avons aussi défini de manière à ce que sa signification soit indépendante de R (c'est-à-dire de la taille du pignon) et du nombre de dents. K_{ei} est défini tel que

$$\varphi_{ei} = K_{ei} \cdot \frac{m}{2r_i} \quad (\text{II.13})$$

φ_{ei} étant l'angle entre le plan de symétrie de la dent et le plan contenant l'axe du pignon et passant par le point de la développante situé sur le cercle primitif (voir figure II.3.1-8).

Le pas primitif, identique pour le pignon et la roue, est défini sur le cercle primitif et s'écrit en fonction du module :

$$p = \pi \cdot m \quad (\text{II.14})$$

Or le pas primitif peut s'écrire en fonction des épaisseurs primitives de dent notées s_1 et s_2 dans le cas d'un jeu de fonctionnement nul (voir figure II.3.1-8) :

$$p = s_1 + s_2 \quad (\text{II.15})$$

Avec r_i les rayons des cercles primitifs on peut écrire (voir figure II.3.1-7) :

$$s_i = 2r_i \cdot \varphi_{ei} \quad (\text{II.16})$$

De (II.15) et (II.16) on déduit :

$$p = 2r_1 \cdot \varphi_{e1} + 2r_2 \cdot \varphi_{e2} \quad (\text{II.17})$$

De (II.14) et (II.17) on obtient :

$$\pi = \frac{2r_1}{m} \cdot \varphi_{e1} + \frac{2r_2}{m} \cdot \varphi_{e2} \quad (\text{II.16})$$

Avec (II.13) on déduit que :

$$\pi = K_{e1} + K_{e2} \quad (\text{II.17})$$

L'équation (II.17) montre que la somme des deux coefficients K_{e1} et K_{e2} vaut toujours π , si on considère un jeu de l'engrenage nul.

Prenons l'exemple de $K_{e1} = \frac{\pi}{2}$. On a alors également, d'après (II.17), $K_{e2} = \frac{\pi}{2}$. De (II.13)

on déduit que $\varphi_{ei} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{m}{2r_i}$. De (II.16) on obtient $s_i = 2r_i \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{m}{2r_i} = \frac{\pi \cdot m}{2}$. Donc, d'après

(II.14), les épaisseurs circulaires primitives du pignon et de la roue sont égales à la moitié du pas primitif. Autrement dit, l'épaisseur de dent est égale au creux de dent.

Avec cette définition (équation II.13) des paramètres K_{e1} et K_{e2} , on obtient l'égalité des épaisseurs circulaires primitives pour les dents du pignon et de la roue avec $K_{e1} = \frac{\pi}{2}$.

Si l'on souhaite par exemple augmenter l'épaisseur des dents du pignon il faut choisir $K_{e1} > \frac{\pi}{2}$. On aura alors augmenté l'épaisseur des dents du pignon en diminuant l'épaisseur des dents de la roue (d'après (II.17) (II.13) et (II.16)).

II.3.2.d Modification des épaisseurs pour tenir compte du jeu et du bombé de denture

Théoriquement, lors de l'engrènement de deux pignons coniques droits parfaits à développante de cercle sphérique, le contact est linéique et se fait sur toute la longueur de la dent.

Dès que la position relative des pignons (décalage des axes ou de la position des pignons sur les axes) n'est plus parfaite, le contact se localise sur le bout intérieur ou extérieur de la dent. Ce déplacement de la zone de contact risque de provoquer des concentrations de contraintes au niveau des arêtes vives et ainsi accélérer la ruine du pignon.

Pour limiter l'influence des erreurs de positionnement, un bombé longitudinal est ajouté sur les surfaces actives des dents d'un des deux pignons de l'engrenage.

L'ajout du bombé permet d'obtenir en théorie (sur des géométries parfaites et indéformables), un contact ponctuel. Lorsque les pignons sont chargés, on obtient une zone de contact centrée autour de la position du maximum de bombé. L'influence des erreurs de positionnement est alors moins importante car la tache de contact reste localisée sur une zone limitée de la surface active de la dent.

Ce bombé se fait généralement avec un ajout de matière sur le pignon. L'ajout de ce bombé augmente ainsi l'épaisseur des dents du pignon. Il faut alors tenir compte de la valeur maximale de bombé dans le calcul des épaisseurs de dents.

De même, il faut tenir compte de la valeur du jeu de fonctionnement dans le calcul des épaisseurs de dents.

Le bombé et le jeu de fonctionnement impliquent une diminution des épaisseurs circulaires des dents : du pignon, ou de la roue, ou des deux.

L'équation (II.18), exprimant le pas primitif (noté p) de l'engrenage en fonction des épaisseurs circulaires (calculées avec les relations (II.13) et (II.16)), du jeu et du maximum de bombé, est établie à partir de la figure II.3.1-7 :

$$p = \frac{\pi d_1}{Z_1} = \frac{\pi d_2}{Z_2} = \text{jeu} + 2 \times \text{bombé}_{\text{max}} + s_1 + s_2 \quad (\text{II.18})$$

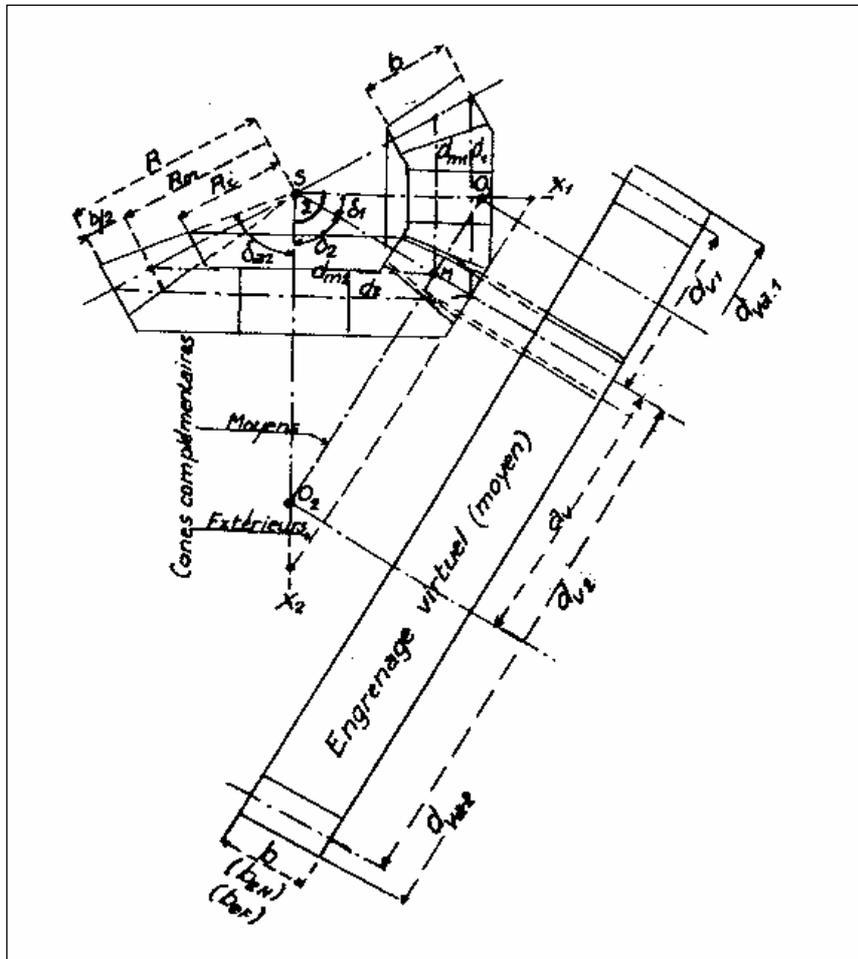
Le pas primitif étant imposé par le choix des nombres de dents et par l'encombrement disponible, la prise en compte du jeu et du bombé implique une diminution des valeurs d'épaisseur calculées avec les relations (II.13) et (II.16).

II.3.3 Dimensionnement

Le dimensionnement des engrenages coniques droits fait l'objet d'une partie de la norme ISO6336. Nous avons utilisé l'ouvrage d'Henriot [HEN99] qui est basé sur la même norme ISO mais qui propose en plus des valeurs numériques permettant de quantifier, plus ou moins finement en fonction des hypothèses, les nombreux coefficients nécessaires à la vérification du dimensionnement mécanique d'un engrenage selon la norme. Pour chaque paramètre

utilisé, l'indice 1 représentera une grandeur relative au pignon (appelé aussi satellite sur un différentiel) et l'indice 2 représentera une grandeur relative à la roue (appelée aussi planétaire sur un différentiel).

La méthode normalisée, de la même manière que la méthode Henriot, concernant les engrenages concourants, utilise en réalité, le calcul pour les engrenages cylindriques, en considérant l'engrenage cylindrique moyen équivalent de la figure II.3.2-1 dans le cas de la méthode détaillée que nous avons choisi d'utiliser.



Les rayons sont obtenus par la relation (2.1) :

$$R_{mi} = \left(R - \frac{b}{2} \right) \cdot \sin(\delta_i) \quad (2.1)$$

Figure II.3.2-1 – Engrenage cylindrique moyen équivalent [HEN99]

Le dimensionnement d'un différentiel nécessite le passage d'un système à 4 pignons, voire 6 pignons, à un système comportant une roue et un pignon afin de pouvoir appliquer le dimensionnement selon la norme.

La figure II.3.2-2 présente les paramètres permettant d'effectuer un calcul de transport des sollicitations d'un différentiel vers un engrenage comportant deux pignons. Nous prendrons, pour la démonstration, le cas d'un différentiel à deux satellites.

Nous considérons dans la suite que ce mécanisme est isostatique et donc que les efforts de denture sont répartis de manière égale sur toutes les dents en contact.

A partir de la figure II.3.2-2 a) on peut écrire la conservation de la puissance en considérant que le rendement est de 1 :

$$C_b \cdot \omega_b = C_{S1} \cdot \omega_{S1} + C_{S2} \cdot \omega_{S2} \quad (2.1.1)$$

Et la relation cinématique d'un différentiel s'écrit :

$$\frac{\omega_{S1} + \omega_{S2}}{2} = \omega_b \quad (2.1.2)$$

D'où :

$$C_b \cdot \left(\frac{\omega_{S1} + \omega_{S2}}{2} \right) = C_{S1} \cdot \omega_{S1} + C_{S2} \cdot \omega_{S2} \quad (2.1.3)$$

Isolons un satellite afin de déterminer une relation entre C_{S1} et C_{S2} (figure II.3.2-3 a). On néglige les effets dynamiques compte tenu des faibles vitesses de rotation des pignons d'un différentiel. Un satellite est soumis à trois actions mécaniques : une du boîtier sur le satellite et une de chacun des deux planétaires sur le satellite au niveau du contact des dentures. Pour notre calcul, on s'intéresse aux projections des forces de contact de denture sur la direction tangentielle (voir figure II.3.2-3 a). L'équilibre sur cette direction permet d'écrire en normes :

$$Ft_{P1/S} = Ft_{P2/S} = \frac{Ft_{arbre/S}}{2} \quad (2.1.4)$$

Le couple appliqué par les deux satellites sur un planétaire s'écrit d'après la figure II.3.2-3 b qui présente un planétaire isolé :

$$C_{Si} = 2 \cdot Ft_{S/Pi} \cdot R_p \quad (2.1.5)$$

Comme d'après (2.1.4) $Ft_{P1/S} = Ft_{P2/S}$, on a d'après (2.1.5) :

$$C_{S1} = C_{S2} \quad (2.1.6)$$

En remplaçant (2.1.6) dans (2.1.3) on obtient :

$$\frac{C_b}{2} = C_{S1} = C_{S2} \quad (2.1.7)$$

Pour le cas de la roue conique d'un engrenage simple (figure II.3.2-3 b), on a l'expression de la composante tangentielle de la force de contact de denture suivante :

$$Ft_{1/2} = \frac{C_2}{R_p} \quad (2.1.8)$$

L'équivalence entre les deux schémas de la figure II.3.2-3 doit permettre de dimensionner les dents des pignons dans les mêmes conditions. Il faut donc déterminer l'expression du couple C_2 tel que les efforts de denture soient identiques dans les deux cas. Des équations (2.1.5) et (2.1.8), on déduit avec cette condition :

$$C_2 = \frac{C_{S1}}{2} = \frac{C_{S2}}{2} \quad (2.1.9)$$

Et avec (2.1.7) on peut écrire :

$$C_2 = \frac{C_b}{4} \quad (2.1.10)$$

En conclusion, on peut dire que pour dimensionner une dent de satellite ou de planétaire de différentiel avec les méthodes de dimensionnement normalisées, il faut considérer un couple appliqué sur la roue de l'engrenage étudié égal au couple appliqué sur le boîtier de différentiel divisé par quatre. Pour obtenir ce résultat, nous avons fait l'hypothèse d'un mécanisme isostatique. Ce n'est pas le cas en réalité. Néanmoins, le fonctionnement isostatique d'un différentiel est assuré d'une part par les aspects géométriques de réalisation (jeux et tolérances) et d'autre part par la déformation du boîtier de différentiel en fonctionnement. Les efforts calculés à partir de ces hypothèses sont donc à priori plus faibles que les efforts réels.

Dans le cas d'un différentiel à quatre satellites, le nombre de dents de satellite en contact avec le planétaire est doublé et on en déduit :

$$C_2 = \frac{C_b}{8}$$

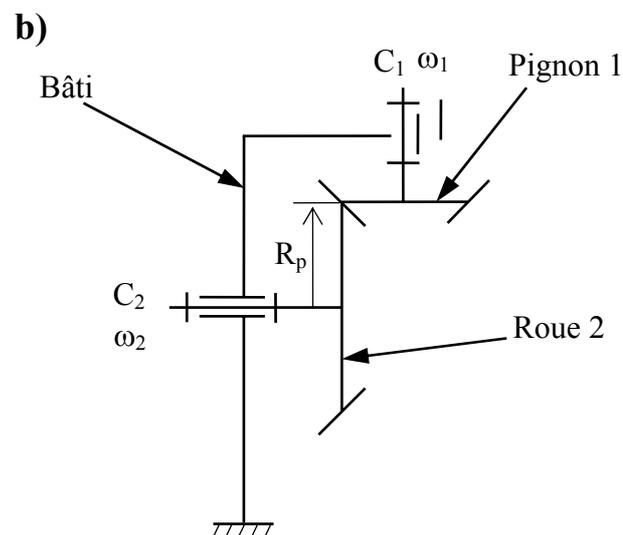
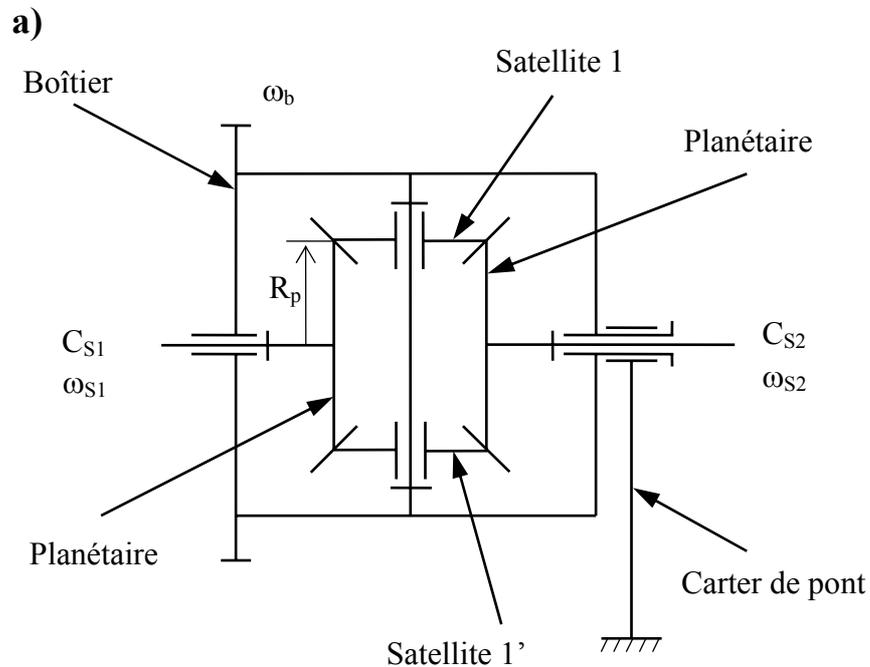


Figure II.3.2-2 : Comparaison des efforts de denture entre : un différentiel a) et un engrenage conique à deux pignons b)

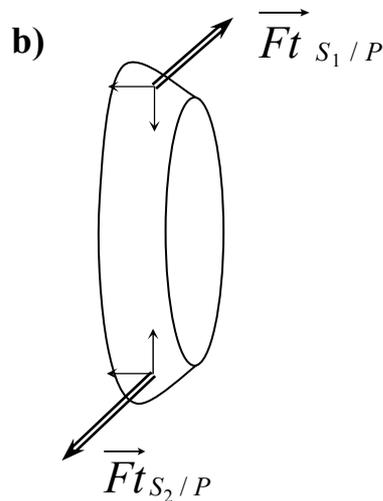
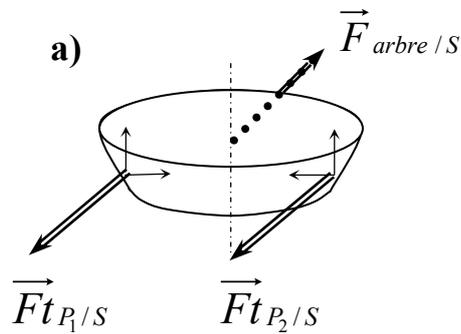


Figure II.3.2-3 : a) Equilibre d'un satellite et b) Equilibre d'un planétaire

Les calculs de dimensionnement d'engrenage sont en fait des calculs de vérification. Les données d'entrée sont : la géométrie du pignon et de la roue, les caractéristiques matériaux. Deux coefficients sont calculés : S_H et S_F .

II.3.3.a Calcul de S_H

S_H est le coefficient de sécurité, selon Henriot, en tenue à la pression superficielle de Hertz avant écaillage. Il est défini par la relation (2.2) :

$$S_H = \frac{\sigma_{HP}}{\sigma_H} \quad (2.2)$$

σ_{HP} est la valeur admissible de la pression de Hertz pour le couple pignon / matériau. Elle est calculée par la relation :

$$\sigma_{HP} = \frac{\sigma_{H \lim}}{S_{H \min}} \cdot Z_N \cdot (Z_L \cdot Z_R \cdot Z_V) \cdot Z_W \cdot Z_X \quad (2.3)$$

$\sigma_{H \lim}$ est la contrainte limite en fatigue superficielle du matériau. $S_{H \min}$ est le coefficient de sécurité minimum souhaité, égal à 1 pour les engrenages automobiles selon la préconisation de la norme [HEN99]. Les six coefficients en facteur du rapport $\frac{\sigma_{H \lim}}{S_{H \min}}$ sont détaillés au paragraphe II.3.3.c, avec un classement en plusieurs catégories en fonction de leur origine.

σ_H est la pression de Hertz en fonctionnement. Elle est calculée par la relation (2.4) :

$$\sigma_H = \sigma_{H0} \cdot \sqrt{K_A \cdot K_V \cdot K_{H\beta} \cdot K_{H\alpha}} \quad (2.4)$$

σ_{H0} est la contrainte de Hertz de base, représentant la contrainte superficielle calculée par les équations de Hertz sans tenir compte de la géométrie de l'engrenage, par exemple. Elle est donc modifiée par les cinq coefficients sous la racine carrée. Ces cinq coefficients sont détaillés au paragraphe II.3.3.c avec le même classement que précédemment. La valeur de σ_{H0} est obtenue par la relation (2.5) :

$$\sigma_{H0} = Z_B \cdot Z_H \cdot Z_E \cdot Z_{LS} \cdot Z_{\beta} \cdot Z_K \cdot \sqrt{\frac{F_{mt}}{b_{EH} \cdot d_{v1}} \cdot \frac{\sqrt{u^2 + 1}}{u}} \quad (2.5)$$

b_{EH} est la largeur de denture du pignon droit équivalent égale à la largeur de dent du pignon conique multipliée par un coefficient 0,85 « pour plus de sécurité » d'après Henriot. d_{v1} est le diamètre virtuel du pignon, c'est-à-dire le diamètre primitif du pignon cylindrique moyen équivalent. La valeur de la contrainte σ_{H0} est commune au pignon et à la roue et son expression a été établie en fonction du diamètre du pignon. F_{mt} est la force moyenne tangentielle (commune au pignon et à la roue), appliquée au rayon primitif du pignon cylindrique moyen équivalent. u est le rapport de réduction de l'engrenage conique :

$$u = \left(\frac{Z_2}{Z_1} \right) \quad (2.6)$$

L'effort tangentiel moyen, F_{mt} , est calculé à partir de (2.7) :

$$F_{mt} = 1000 \cdot \frac{T_1}{rm_1} = 1000 \cdot \frac{T_2}{rm_2} \quad (2.7)$$

T_i est le couple appliqué sur le pignon d'indice i et rm_i est le rayon moyen du pignon d'indice i , c'est-à-dire le rayon primitif mesuré au milieu de la dent du pignon conique. Ainsi en insérant l'équation (2.5) dans (2.4) et en utilisant l'équation (2.3), on obtient à partir de l'équation (2.2), l'expression de S_H :

$$S_H = \frac{\sigma_{H \lim} \cdot Z_N \cdot Z_R \cdot Z_L \cdot Z_V \cdot Z_W \cdot Z_X}{S_{H \min} \cdot Z_B \cdot Z_H \cdot Z_E \cdot Z_{LS} \cdot Z_{\beta} \cdot Z_K \cdot \sqrt{\frac{F_{mt}}{b_{EH} \cdot d_{v1}} \cdot \frac{\sqrt{u^2 + 1}}{u}} \cdot \sqrt{K_A \cdot K_V \cdot K_{H\beta} \cdot K_{H\alpha}}} \quad (2.8)$$

II.3.3.b Calcul de S_F

S_F est le coefficient de sécurité, selon Henriot, en résistance à la rupture par fatigue de flexion en pied de dent. Il est défini par la relation (2.9) :

$$S_F = \frac{\sigma_{FP}}{\sigma_F} \quad (2.9)$$

σ_{FP} est la valeur admissible de la contrainte en pied de dent, qui tient compte du couple pignon/matériau. Elle est calculée par la relation :

$$\sigma_{FP} = \frac{\sigma_{FE}}{S_{F\min}} \cdot Y_N \cdot Y_{\delta re/T} \cdot Y_{Rrel/T} \cdot Y_X \quad (2.10)$$

σ_{FE} est la contrainte limite en fatigue par flexion du couple matériau/géométrie du pied de dent. $S_{F\min}$ est le coefficient de sécurité minimum souhaité, égal à 1,25 selon la préconisation de la norme. Les quatre coefficients en facteur du rapport $\frac{\sigma_{F\lim}}{S_{F\lim}}$ sont détaillés au paragraphe II.3.3.c.

σ_F est la valeur de la contrainte en fonctionnement en pied de dent et s'écrit :

$$\sigma_F = \sigma_{F0} \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{F\beta} \cdot K_{F\alpha} \quad (2.11)$$

σ_{F0} est la contrainte de rupture pied de dent de base qui tient compte de l'effort appliqué et de la géométrie de la dent. Elle est calculée par la relation (2.12) :

$$\sigma_{F0} = \frac{F_{mt}}{b_{EH} \cdot m_{mn}} \cdot Y_{FA} \cdot Y_{SA} \cdot Y_\varepsilon \cdot Y_K \cdot Y_{LS} \quad (2.12)$$

Où F_{mt} et b_{EH} ont été expliqués pour le calcul de S_H . m_{mn} est le module moyen normal, c'est à dire le module du pignon conique étudié au niveau du milieu de la dent. Il s'exprime dans le cas d'un pignon conique droit :

$$m_{mn} = \frac{d_1 \cdot \left(R - \frac{b}{2}\right)}{Z_1 \cdot R} = \frac{d_2 \cdot \left(R - \frac{b}{2}\right)}{Z_2 \cdot R} \quad (2.13)$$

Où d_i et Z_i sont respectivement le diamètre primitif et le nombre de dents du pignon conique d'indice i . R et b sont respectivement la longueur de la génératrice primitive et la largeur de l'engrenage conique.

Ainsi en insérant l'équation (2.12) dans (2.11) et en utilisant l'équation (2.10), on obtient à partir de l'équation (2.9), l'expression de S_F :

$$S_F = \frac{\sigma_{FE} \cdot Y_N \cdot Y_{\delta re/T} \cdot Y_{Rrel/T} \cdot Y_X \cdot b_{EH} \cdot d_1 \cdot \left(R - \frac{b}{2}\right)}{S_{F\lim} \cdot F_{mt} \cdot Z_1 \cdot R \cdot Y_{Fa} \cdot Y_{Sa} \cdot Y_\varepsilon \cdot Y_K \cdot Y_{LS} \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{F\beta} \cdot K_{F\alpha}} \quad (2.14)$$

II.3.3.c Classification des coefficients de dimensionnement

Les coefficients intervenant dans le calcul de la durée de vie selon les deux aspects, rupture par fatigue en pied de dent (S_F) et fatigue en pression superficielle (S_H), peuvent être classés en plusieurs catégories en fonction de leur origine :

➤ **Les matériaux**

$\sigma_{H\lim}$;	Contrainte limite admissible en pression superficielle,
Z_E ;	Facteur d'élasticité,
Z_W ;	Facteur de dureté relative,
σ_{FE} ;	Contrainte limite admissible en flexion.

➤ **La durée de vie de l'engrenage**

K_R ;	Facteur de fiabilité,
Z_N ;	Facteur de durée en pression,
Y_N ;	Facteur de durée en flexion.

➤ **Les effets dynamiques**

K_A ;	Facteur d'application,
K_V ;	Facteur dynamique,
K_B ;	Facteur de service,

➤ **Les dimensions et la géométrie de l'engrenage**

b ;	Largeur de denture du pignon conique,
m_{mn} ;	Module moyen normal du pignon conique,
d_1 ;	Diamètre primitif du pignon de l'engrenage conique,
u ;	Rapport de réduction de l'engrenage conique,
Y_{Fa} ;	Facteur de forme,
Y_{Sa} ;	Facteur de concentration de contraintes,
Y_{ST} ;	Facteur de concentration de contrainte de l'engrenage d'essai,
Y_K ;	Facteur de conicité,
Y_X ;	Facteur de dimension,
$Y_{\delta relT}$;	Facteur relatif d'entaille,
Y_{RrelT} ;	Facteur relatif d'état de surface,
Z_H ;	Facteur géométrique,
Z_B ;	Facteur de hauteur de contact,
Z_K ;	Facteur de conicité,
Z_X ;	Facteur de dimension.

➤ **L'application de la charge sur les dents**

$K_{H\alpha}$;	Facteur de distribution de charge transversal,
$K_{H\beta}$;	Facteur de distribution de charge longitudinal,

$K_{F\alpha}$;	Facteur de distribution de charge transversal,
$K_{F\beta}$;	Facteur de distribution de charge longitudinal,
Z_ε ;	Facteur de conduite,
Z_β ;	Facteur d'inclinaison d'hélice,
Z_{LS} ;	Facteur de répartition
Y_ε ;	Facteur de conduite,
Y_β ;	Facteur d'inclinaison d'hélice,
Y_{LS} ;	Facteur de répartition.

➤ **Formation du film d'huile**

Z_L ;	Facteur de viscosité,
Z_R ;	Facteur de rugosité,
Z_V ;	Facteur de vitesse tangentielle.

Remarque : Les facteurs en « Y » interviennent dans le calcul de S_F , les facteurs en « Z » interviennent dans le calcul de S_H . Les facteurs en « K » interviennent dans les calcul des deux coefficients.

II.3.3.d Quantification de certains facteurs

Parmi les facteurs intervenant dans les calculs de dimensionnement en fatigue, certains peuvent être quantifiés dans le cas de pignons coniques fonctionnant sur un différentiel automobile. Nous détaillons ces valeurs ci-dessous, tirées de [HEN99].

Pour le calcul de S_H :

Facteurs intervenant dans le calcul de $\sigma_{HP} = \frac{\sigma_{H \lim}}{S_{H \min}} \cdot Z_N \cdot Z_L \cdot Z_R \cdot Z_V \cdot Z_W \cdot Z_X$

- Z_N (Facteur de durée en pression) : dans le cas d'un nombre de cycles inférieur à 10^5 et pour un acier durci superficiellement, $Z_N = 1,6$. Le nombre de cycles subi par une dent de satellite correspond au nombre de tours effectué sur lui-même, car le contact entre un flanc (gauche par exemple) de satellite ne se fait qu'avec un des deux planétaires dans le cas où le véhicule roule en marche avant (cas simulé sur banc d'essais). Dans le cas d'un dimensionnement pour le fonctionnement sur banc d'essais, le nombre de cycle spécifié dans le cahier des charges est toujours inférieur à 10^5 afin de limiter la durée des essais (la vitesse de rotation différentielle étant de l'ordre de 10 tours/min).
- Le produit $(Z_L \cdot Z_R \cdot Z_V)$ (Formation du film d'huile) : dans le cas d'aciers trempés superficiellement suivant l'état de surface :
 $(Z_L \cdot Z_R \cdot Z_V) = 0,92$ pour une denture rectifiée avec une hauteur totale de rugosité supérieure à $4\mu\text{m}$.
 $(Z_L \cdot Z_R \cdot Z_V) = 0,85$ pour une denture taillée par fraisage.

Compte tenu du fait que l'état de surface d'une denture forgée est bien meilleur que celui d'une denture taillée (constatation visuelle et après mesure des rugosités) nous en avons conclu les valeurs suivantes :

$$(Z_L \cdot Z_R \cdot Z_V) = 0,92 \text{ pour un pignon forgé}$$

$$(Z_L \cdot Z_R \cdot Z_V) = 0,85 \text{ pour un pignon taillé.}$$

- Z_W (Facteur de dureté relative) : compte tenu de la dureté superficielle toujours supérieure à 400 HB (trempe superficielle systématique) on adopte $Z_W = 1$.
- Z_X (Facteur de dimension) : Henriot précise qu'avec un choix approprié d'acier et de profondeur de la couche durcie, on peut considérer $Z_X = 1$.

Facteurs intervenant dans le calcul de $\sigma_H = \sigma_{H0} \cdot \sqrt{K_A \cdot K_V \cdot K_{H\beta} \cdot K_{H\alpha}}$

- K_A (Facteur d'application) : en considérant que la machine menante (moteur) et la machine menée (véhicule) ont un fonctionnement uniforme on utilise $K_A = 1$.
- K_V (Facteur dynamique) : Henriot propose une formule fonction notamment de la vitesse moyenne tangentielle du pignon (très faible pour un pignon de différentiel) et qui donne une valeur très proche de 1 (à 10^{-4} près). Nous avons donc adopté $K_V = 1$.
- $K_{H\alpha}$ (Facteur de distribution de charge transversal) : dans le cas d'une qualité 8 (correspondant à des pignons forgés) et avec un durcissement superficiel, Henriot donne $K_{H\alpha} = 1,1$.
- $K_{H\beta}$ (Facteur de distribution de charge longitudinal) : dans le cas d'un acier durci superficiellement, avec une qualité 6 (le maximum proposé dans [HEN99]) Henriot propose une formule : $K_{H\beta} = 1,09 + 0,26 \left(\frac{b}{d_1} \right)^2 + 3,3 \cdot 10^{-4} \cdot b$ dans laquelle il faut remplacer b et d_1 par la largeur de dent virtuelle et le diamètre primitif virtuel du pignon. Cette formule est valable pour des valeurs de $K_{H\beta} < 1,34$, ce qui est le cas pour des pignons de différentiel automobile.

Facteurs intervenant dans le calcul de

$$\sigma_{H0} = Z_B \cdot Z_H \cdot Z_E \cdot Z_{LS} \cdot Z_\beta \cdot Z_K \cdot \sqrt{\frac{F_{mt}}{b_{EH} \cdot d_{v1}} \cdot \frac{\sqrt{u^2 + 1}}{u}}$$

- Z_B (Facteur de hauteur de contact) : ce facteur est calculé sur l'engrenage virtuel. Nous avons programmé les équations données dans [HEN99] afin de déterminer ce facteur numériquement en fonction des données géométriques de l'engrenage conique.
- Z_H (Facteur géométrique) : déterminé par la formule $Z_H = \frac{2}{\sqrt{\sin(2 \cdot \alpha)}}$
- Z_E (Facteur d'élasticité) : pour des aciers forgés pour la roue et le pignon, Henriot donne $Z_E = 193(N/mm^2)^{0,5}$

- Z_{LS} (Facteur de répartition) : Henriot propose $Z_{LS} = \sqrt{0,70} \cong 0,85$
- Z_{β} (Facteur d'inclinaison d'hélice) : $Z_{\beta} = 1$ pour des dentures droites ($\beta = 0$)
- Z_K (Facteur de conicité) : Henriot propose une valeur empirique permettant de considérer les mêmes valeurs de contraintes admissibles que pour les engrenages cylindriques. $Z_K = 0,85$

Ainsi, pour calculer S_H , seules les valeurs suivantes restent à renseigner :

- Le couple appliqué sur le pignon T_1 et les données géométriques $Z_1; Z_2; \alpha; R; b$.
- La caractéristique matériau $\sigma_{H\lim}$
- Le coefficient de sécurité minimum accepté en pression superficielle $S_{H\min}$. Cette valeur correspond à la marge de sécurité minimale souhaitée lorsque $S_H = 1$.

Pour le calcul de S_F :

Facteurs intervenant dans le calcul de $\sigma_{FP} = \frac{\sigma_{FE}}{S_{F\min}} \cdot Y_N \cdot Y_{\delta rel/T} \cdot Y_{Rrel/T} \cdot Y_X$

Y_N (Facteur de durée en flexion) : pour un nombre de cycle à rupture N compris entre 10^3 et $3 \cdot 10^6$ Henriot propose la formule suivante :

$$Y_N = \left(\frac{3 \cdot 10^6}{N} \right)^{0,115}$$

Le nombre de cycles subis par une dent de satellite est différent du nombre de cycles subis par un planétaire donc ce facteur est différent pour les deux pignons d'un même engrenage.

$Y_{\delta rel/T}$ (Facteur relatif d'entaille) : Henriot propose un abaque à partir duquel nous avons déduit $Y_{\delta rel/T} = 0,98$ pour les pignons de différentiel.

$Y_{Rrel/T}$ (Facteur relatif d'état de surface) : Henriot propose également un abaque fonction de la rugosité moyenne R_{ZT} dans le pied de dent. Avec une valeur mesurée sur plusieurs pignons forgés $R_{ZT} \approx 4 \mu m$ nous avons déterminé que $Y_{Rrel/T} = 1,03$

Y_X (Facteur de dimension) : pour un module normal inférieur à 5mm (le cas de la majorité des pignons de différentiel automobile) Henriot donne $Y_X = 1$

Facteurs intervenant dans le calcul de $\sigma_F = \sigma_{F0} \cdot K_A \cdot K_V \cdot K_{F\beta} \cdot K_{F\alpha}$

K_A et K_V ont été déterminé dans le calcul de S_H et valent 1.

$K_{F\alpha}$ (Facteur de distribution de charge transversal) : Henriot propose un tableau donnant le rapport $\frac{K_{H\alpha}}{K_{F\alpha}}$. Avec une qualité 8 on obtient $\frac{K_{H\alpha}}{K_{F\alpha}} = 1,1$. Comme $K_{H\alpha} = 1,1$ on en déduit $K_{F\alpha} = 1$

$K_{F\beta}$ (Facteur de distribution de charge longitudinal) : Henriot propose une formule :

$$K_{F\beta} = (K_{H\beta})^{N_F} \text{ avec } N_F = \frac{1}{1 + \frac{h}{b} + \left(\frac{h}{b}\right)^2} \text{ et } h \text{ étant la hauteur de denture et } b \text{ la largeur de}$$

denture.

Facteurs intervenant dans le calcul de $\sigma_{F0} = \frac{F_{mt}}{b_{EH} \cdot m_{mn}} \cdot Y_{Fa} \cdot Y_{Sa} \cdot Y_{\varepsilon} \cdot Y_K \cdot Y_{LS}$

Y_{Fa} (Facteur de forme) : Henriot propose un abaque en fonction des caractéristiques du pignon virtuel : nombre de dents, angle de pression, coefficient de déport. Nous avons considéré un coefficient de déport systématiquement nul ici car cette notion est caduque dans le cas d'un pignon conique, qui plus est, forgé. Nous expliquons au paragraphe IV.1.2.b comment nous avons pris en compte les variations d'épaisseur de dents du pignon conique étudié par rapport à une valeur à « déport » nul (« déport » au sens de l'engrenage cylindrique).

Ce facteur est différent entre un satellite et un planétaire.

Y_{Sa} (Facteur de concentration de contraintes) : de même que pour Y_{Fa} , Henriot propose un abaque en fonction des mêmes caractéristiques du pignon virtuel.

Y_{ε} (Facteur de conduite) : ce facteur est calculé sur l'engrenage virtuel. Nous avons programmé les équations données dans [HEN99] afin de déterminer ce facteur numériquement en fonction des données géométriques de l'engrenage conique.

Y_K (Facteur de conicité) : Henriot propose de choisir $Y_K \cong 1$ en pratique.

Y_{LS} (Facteur de répartition) : Henriot donne $Y_{LS} = Z_{LS}^2 \cong 0,7$

Ainsi, pour calculer S_F , seules les valeurs suivantes restent à renseigner :

- Le couple appliqué sur le pignon T_1 et les données géométriques $Z_1; Z_2; \alpha; R; b$.
- La caractéristique matériau σ_{FE}
- Le coefficient de sécurité minimum accepté en rupture pied de dent S_{Fmin} . Cette valeur correspond à la marge de sécurité minimale souhaitée lorsque $S_F = 1$.

II.3.3.e Conclusions sur le dimensionnement

Cette approche de dimensionnement et les valeurs numériques s'appuient essentiellement sur une expérience forte des engrenages cylindriques, voire cylindriques usinés sollicités en endurance illimitée. Or dans le cas d'un différentiel, ces valeurs numériques ne sont plus adaptées. En sus, le procédé d'obtention est le forgeage, ainsi les paramètres calés sur un procédé d'usinage doivent être réévalués. Les tests d'endurance et de réception des produits comportent peu de cycles afin de limiter le temps des essais. Cela induit un chargement

important des engrenages remettant en cause l'hypothèse principale d'un dimensionnement en endurance illimitée. Nous avons constaté que les valeurs calculées du coefficient S_H sont très inférieures à 1, notamment pour des pignons pour lesquels la tenue en fatigue sur banc d'essais est validée avec un nombre de cycles de l'ordre de 10 000. Cela signifie que la prédiction par cette méthode de calcul est pessimiste vis-à-vis d'un fonctionnement à faible nombre de cycles (inférieur à 10^6). Il apparaît nécessaire d'identifier les valeurs numériques de ces paramètres dans le cas de pignons coniques forgés montés dans un différentiel automobile. Cela est développé par une expertise de différentiels existants (paragraphe IV.1.1) et par l'analyse de test de fatigue sur banc d'essais (paragraphe IV.2.1).

II.3.4 Fabrication

Initialement, les pignons de différentiel automobile étaient obtenus par enlèvement de matière à partir d'un brut pouvant être forgé. Trois principales méthodes de taillage permettent d'obtenir des pignons coniques droits en série [HEN99] :

- ✓ Le taillage par outils animés de mouvement alternatif (petites séries)
- ✓ Le taillage par fraises disques (grandes séries)
- ✓ Le taillage dit « Revacyle » (très grandes séries)

Compte tenu du contexte de nos travaux, seule la méthode dite « Revacyle » est détaillée. La figure II.3.3-1 présente l'outil de taillage par cette méthode. La firme GLEASON a conçu une machine portant une fraise à axe horizontal, dont le diamètre dépasse 600mm et portant à sa périphérie une succession d'outils de forme déterminée :

- dans la zone M_1M_2 sont disposés les outils d'ébauche et demi finition,
- les outils de finition sont disposés dans la zone M_2M_3 ,
- l'intervalle M_3M_1 ne comporte aucun outil : il correspond au moment où s'effectue la rotation du pignon taillé.

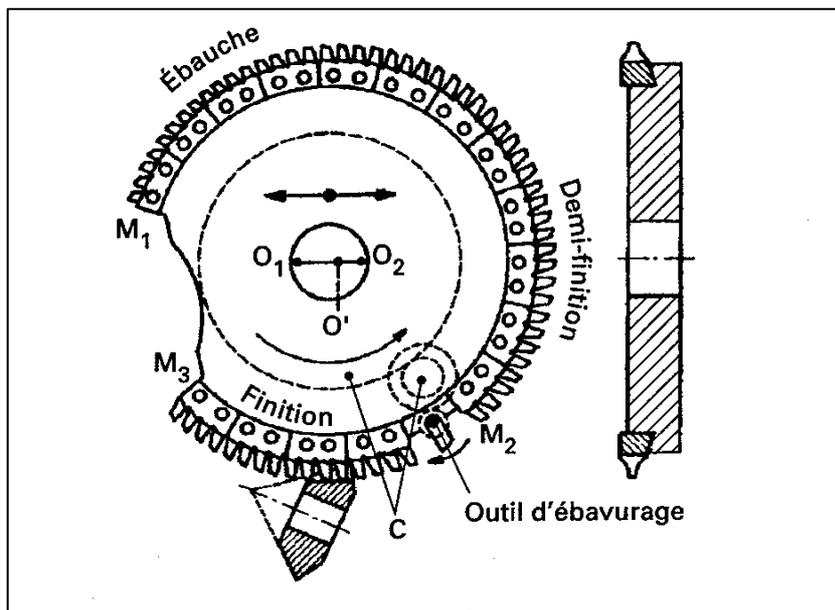


Figure II.3.3-1 : Outil Revacyle de taillage de denture conique droite [HEN99].

La fraise est animée d'une rotation uniforme tandis que son support se déplace parallèlement au pied de la denture taillée. On distingue les phases suivantes :

- O_1 à O' , ébauche avec avance réduite,
- O' à O_2 , demi-finition avec avance augmentée,
- O_2 à O_1 , finition.

On visualise sur la figure II.3.3-1 la commande C de l'outil d'ébavurage permettant de faire le chanfrein au gros bout des dents. Etant donné la rapidité de l'opération de taillage, quelques dizaines de secondes, la machine a été conçue avec des dispositifs de serrage, desserrage et d'alimentation automatiques.

Le procédé Revacycle ne permet pas d'obtenir des dentures conjuguées théoriques. Les dentures taillées sont légèrement plus bombées que les dentures théoriques dans le sens de la hauteur. On constate un léger manque de matière en sommet et en pied de dent. La pièce à tailler est un brut obtenu par forgeage mais sur lequel la denture n'est pas préformée.

Ce brut forgé a évolué en relation avec les processus de forgeage : conception des outillages, machines de forge, aciers à outils, ... Ainsi le brut est devenu une ébauche comportant une denture avec une surépaisseur d'usinage : ce sont les pignons forgés « near net shape ». Ces pignons diminuent le volume et le temps d'usinage. De plus, leurs caractéristiques mécaniques sont augmentées grâce à l'ébauche de denture forgée [DEA00] [VAZ00].

Le contexte économique et la logique technologique ont cherché à diminuer cette surépaisseur d'usinage pour la rendre nulle. Ce sont les pignons forgés « net shape ». Historiquement ces pignons ont été conçus par une approche de pignons usinés. Cette approche est caduque dans le cas de pignons « net shape ». On retrouve la nécessité de redéfinir la géométrie des pignons coniques « net shape ». L'usinage reste présent dans l'obtention de la denture forgée par l'obtention des matrices. Celles-ci sont obtenues par génération en fraisage à grande vitesse [ALT01].

II.3.5 Conclusion

Nous avons montré que la géométrie utilisée pour concevoir des pignons taillés n'est pas adaptée au cas des pignons forgés. Nous avons redéfini la géométrie de la denture à laquelle nous avons associé des nouveaux paramètres. Cette redéfinition permet de prendre en compte au mieux les potentialités ouvertes par le procédé de forgeage net shape.

Nous avons également constaté que le dimensionnement mécanique en fatigue des pignons est bien connu dans le cas de pièces taillées et dans des conditions de fonctionnement à nombre de cycles élevés. Pour le cas particulier du dimensionnement de pignons conique de différentiel forgé avec des conditions de fonctionnement sur banc d'essais (à faible nombre de cycle), nous avons mis en évidence la nécessité d'adapter la méthode existante.

Nous allons, dans le paragraphe suivant, analyser les travaux sur les pièces en mise en forme.

II.4 Les évolutions de la conception et de la fabrication en mise en forme

L'introduction suivante, qui présente synthétiquement les principales techniques de forge, est tirée de l'ouvrage de Cordebois et al. [COR03].

Les principales techniques de forge utilisées industriellement sont la forge libre, l'estampage, le matriçage et l'extrusion pour les plus anciennes et s'y sont ajoutées plus

récemment le forgeage à mi-chaud et le forgeage de précision (en matrice fermées). Les engins de forgeage peuvent être classés en deux catégories suivant la vitesse d'impact :

- Les engins travaillant par chocs avec une vitesse d'impact supérieure à 1 m/s (moutons et marteaux-pilons) ;
- Les engins travaillant par pression avec une vitesse d'impact inférieure à 1 m/s (presses hydrauliques et mécaniques).

Le forgeage libre consiste à former des pièces par une succession d'opérations élémentaires à l'aide d'outillages simples et peu coûteux. Il est essentiellement réservé à la réalisation d'ébauches.

L'estampage, terme réservé à la mise en forme des métaux ferreux et alliages réfractaires, et le **matriçage**, terme réservé à la mise en forme des alliages légers et alliages de titane, utilisent des matrices afin d'obtenir des formes beaucoup plus complexes qu'en forgeage libre. Ils sont mis en œuvre à chaud. L'estampage représente plus de trois quarts des pièces forgées et peut être mis en œuvre par des engins de choc ou de pression. Cette technique implique la présence d'une bavure afin d'absorber le surplus de matière volontairement associé au lopin afin, notamment, d'assurer le remplissage de la matrice. La figure II.4-1, présente l'architecture d'un outillage d'estampage et de matriçage. Le poids des pièces fabricables en estampage peut varier de quelques grammes jusqu'à 2 à 3 tonnes. Les tolérances dimensionnelles sur les pièces obtenues par estampage sont élevées et dépendent des dimensions. Un ordre de grandeur maximum serait le millimètre. Ces tolérances peuvent être diminuées grâce à une opération de calibrage à froid et atteindre le 10^{ème} de millimètre jusqu'à 0,8 millimètre en fonction de l'aire des surfaces à calibrer.

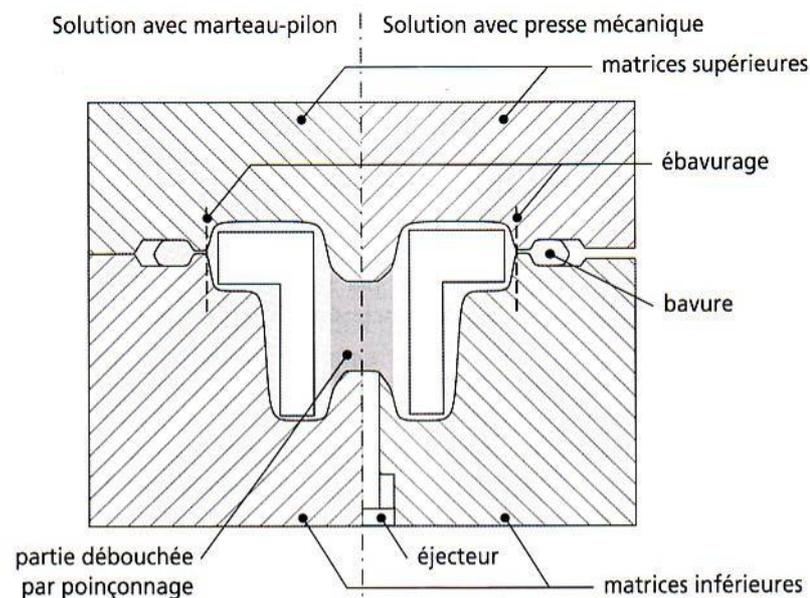


Figure II.4-1 : outillages d'estampage et de matriçage

Le tracé des pièces estampées consiste essentiellement à positionner le plan de joint puis à effectuer « l'habillage » de la géométrie finale usinées afin d'obtenir la géométrie à estamper. Cela consiste essentiellement à ajouter :

- Des surépaisseurs d'usinage au niveau des surfaces fonctionnelles à usiner,
- Des dépouilles afin de rendre plus facile l'écoulement de la matière et l'extraction de la pièce après formage,
- Des congés et des arrondis permettant notamment de réduire l'usure des matrices,
- Des nervures si nécessaires.

L'habillage des pièces estampées ou matriciées dépend de la série. Plus la série est grande, plus la géométrie obtenue s'approche de la géométrie finale. La figure II.4-2 montre qu'avec l'augmentation de la taille des séries, il devient possible de diminuer notablement les surépaisseurs d'usinage.

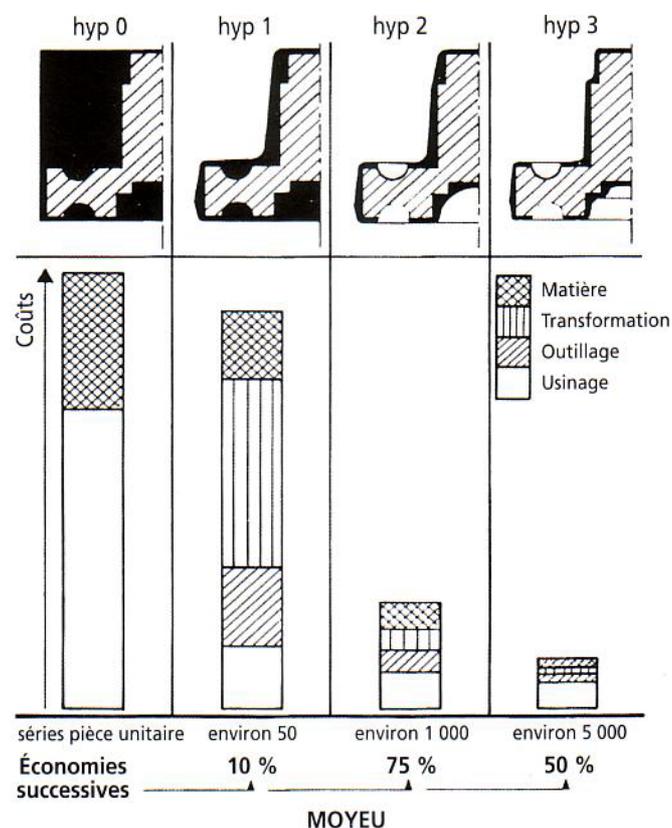


Figure II.4-2 : surépaisseurs d'usinage en fonction de la taille des séries

L'extrusion consiste à obliger un lopin enfermé dans un container et comprimé par un poinçon, à passer totalement ou partiellement dans une filière. Cette technique est effectuée à froid. Les efforts mis en jeu étant très importants, cette technique est en grande majorité appliquée à des pièces de formes axisymétriques. Leur masse n'excède pas trente kilogrammes. Les tolérances des pièces extrudées permettent bien souvent de supprimer les opérations d'usinage car il est possible d'obtenir des précisions de l'ordre de 0,05 mm.

Nous compléterons ici l'analyse précédente par la nôtre, issue des travaux de notre équipe de recherche, pour le domaine des pièces forgées net shape.

L'utilisation industrielle d'outils informatiques de simulation en mise en forme a permis la mise au point d'outillages fermés destinés au forgeage de précision. Les pièces net shape sont fabriquées sur ce type d'outillage. Plusieurs types de gammes sont utilisés :

- L'extrusion en matrice fermée, appelée injection à froid,
- Le forgeage à chaud suivi d'un calibrage,
- Le forgeage à mi-chaud.

Le premier type de gamme offre pour principal intérêt un nombre d'opération réduit puisqu'il est possible d'obtenir une pièce, telle qu'un pignon conique, en une seule opération à partir d'une ébauche tubulaire. L'ébauche étant à température ambiante, la précision dimensionnelle de la pièce ainsi mise en forme ne nécessite pas d'opération de calibrage. Plusieurs inconvénients existent comme en particulier les efforts de forgeage très importants ainsi que l'état des contraintes internes des pièces qui induit des déformations plus importantes durant l'éventuel traitement thermique final (type durcissement superficiel par exemple).

Le deuxième type de gamme nécessite des efforts moins importants que le précédent et la présence d'un traitement thermique de globulisation avant le calibrage permet de relaxer les contraintes internes dues au forgeage et ainsi de réduire sensiblement les déformations en cas de traitement thermique en aval (type durcissement superficiel par exemple). L'inconvénient majeur de ce type de gamme est le nombre d'opérations, nécessitant en particulier des usinages intermédiaires afin de permettre la mise en position des pièces avant calibrage.

Le troisième type de gamme est en quelque sorte un compromis entre les deux premières. La température de forgeage se situe aux alentours de 700°C. Les efforts de forgeage sont alors plus faibles qu'à froid et la précision atteinte ne nécessite pas d'opération de calibrage. Ajoutons de plus que les épaisseurs minimales forgeables sont ici plus faibles qu'avec le forgeage à froid et très proche du forgeage à chaud. De plus, la géométrie des surfaces fonctionnelles secondaires (sphère arrière, alésage) est obtenue en sortie de forgeage avec des surépaisseurs d'usinage plus faibles qu'avec une gamme à chaud. Précisons que le forgeage à mi-chaud de pièces net shape nécessite une très grande maîtrise du procédé afin d'obtenir des pièces industrielles. Il s'agit aujourd'hui de la gamme la mieux adaptée pour la fabrication de pignons net shape de différentiels automobiles.

II.4.1 Processus de conception de pièces en mise en forme

Les travaux de recherche sur la conception de pièces en mise en forme concernent généralement la mise en place de gammes ou la définition des outillages (de forgeage ou d'emboutissage, par exemple). Les données d'entrée sont généralement des géométries de pièces pour lesquelles les tolérances des surfaces fonctionnelles sont imposées. Ces différentes approches peuvent être schématisées par la figure II.4.1-1 qui illustre les évolutions de la conception et de la fabrication de pièces en mise en forme. La figure II.4.1-1a illustre le fait que l'activité nommée « conception » dans les travaux de recherche en mise en forme concerne souvent la mise en place du processus de fabrication. C'est le cas par exemple des travaux de Esche et al. [ESC96] dans le domaine de l'emboutissage. Le but est, dans ce cas, de réussir à obtenir une pièce conforme à une géométrie donnée avec un choix de matériau répondant à la fois aux contraintes liées aux processus et aux caractéristiques mécaniques imposées. Par choix de matériau, nous entendons bien sûr choix de la nuance mais aussi de l'état métallurgique permettant d'obtenir les caractéristiques mécaniques

minimales recherchées de la pièce. Ainsi les traitements thermiques et les traitements de surface sont inclus dans le terme « matériau ». En forge, la première approche de la conception de pièces porte sur la mise au point d'une pièce forgée (donc de la gamme de forge) répondant à un dessin de définition d'une pièce. C'est le cœur du développement des systèmes experts qui capitalisent les règles métiers [CAP98], [BLA96], [KIM92], [TET99], [XUE99], [DOE98], [DOE99]. Le point d'entrée des travaux est une pièce tolérancée, l'utilisation des règles du procédé de forgeage définit par exemple la répartition des volumes, les dépouilles à insérer. Les règles ou contraintes spécifiques à l'entreprise conduisent au nombre de passes à implémenter par exemple. Appliquée au forgeage d'ébauche de pignon, Caporalli et al. [CAP98] définissent trois niveaux pour la mise en place du process de forgeage :

- ✓ Le premier concerne l'analyse de la morphologie de la pièce et son habillage pour la rendre forgeable, approche de type de Boujut et al. [BLA96], [BAU88], par exemple.
- ✓ Le second niveau concerne la mise en place des étapes de forgeage en utilisant les caractéristiques du matériau, les volumes et les contraintes géométriques. Certaines règles bien évidemment sont des "constantes" notamment la répartition des volumes, déjà établie par Chamouard [CHA64], [CHA66], [CHA70]. A ce niveau l'utilisation d'un outil numérique permet de valider le choix des géométries des ébauches afin de garantir le bon remplissage des outillages entre chaque passe : par éléments finis [VAZ00], [BAL96], [FOU95], [FOU96] [FOU01], ou par une modélisation de l'écoulement de matière par expertise métier [MAR94], [MAR96], [TIC92], [TIC97], [TIC98].
- ✓ Le troisième niveau concerne la mise en place des outillages avec l'insertion des dilatations comme des contraintes sur la standardisation éventuelle des outillages [GRO00].

Cette approche par système expert définit des familles de pièces afin d'utiliser et définir des règles métiers. L'évolution des outils de simulations numériques qui englobent l'ensemble du processus de mise en forme (frettage, dilatation, traitement thermique, ...) sont de plus en plus utilisés dans le milieu industriel [CHE02], [SLA02]. Les systèmes experts restent pertinents dans la mise en place très rapide de gamme pour l'établissement de devis ou pour l'ébauche de la gamme de forgeage.

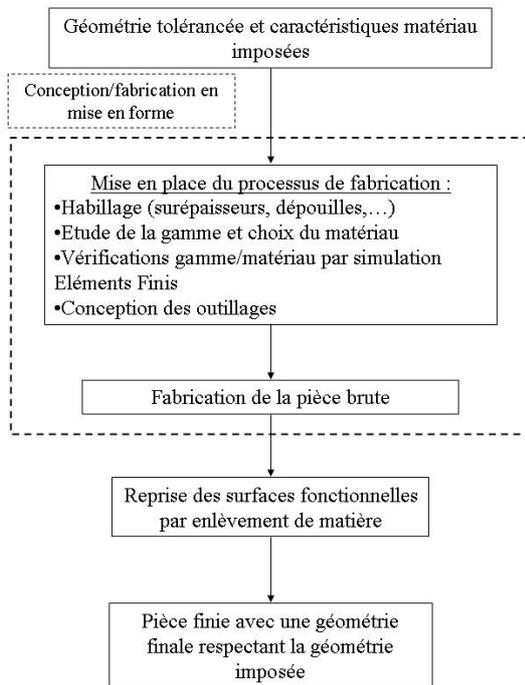
Sur le dernier niveau défini par Caporalli et al., les équipes de Altan [KIM92], [VAZ00], [ALT01], [ALT97], [FAL00], [JIR00], [KIM96], [VAZ00a] ou de Doege [DOE00a], [DOE99], [DOE99a], [DOE00], [DOE97], [DOE94], [DOE92], [DOE98], ont mené d'importants travaux afin de définir au mieux les outillages, nommés process de forgeage ou parfois conception de pièces forgés; en effet l'évolution des outillages permet de nouvelles potentialités géométriques des pièces forgées. Ces travaux cherchent à optimiser le process de forgeage et utilisent comme point de départ la géométrie initiale de la pièce, au sens large [TIC99] et s'imposent une pièce forgée capable de contenir cette géométrie initiale.

Ces travaux ont diminué la surépaisseur d'usinage, limitant ainsi le processus d'usinage à la passe de finition dans le cas des pièces dites « near net shape ». Dans le cas des pièces dites « net shape », les surépaisseurs ont disparu au niveau des surfaces fonctionnelles principales. Dans ce cas, le processus de conception et fabrication a été inspiré du cas précédent, c'est-à-dire que l'activité de conception est restée limitée à une mise en place du processus de fabrication (figure II.4.1-1b). S'il est indéniable que c'est précisément l'étude du processus et du procédé de mise en forme qui a permis l'apparition des pièces net shape, il n'en est pas moins utile d'intégrer les activités de conception/dimensionnement dans ce processus. C'est ainsi qu'il devient possible d'exploiter pleinement les potentialités de ces procédés net shape.

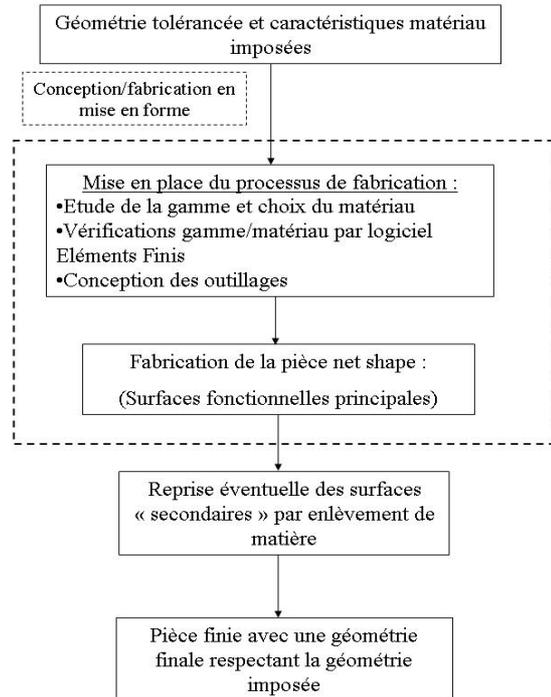
La figure II.4.1-1c illustre cet aspect. Les travaux développés dans cette thèse ont pour objet de déterminer une démarche permettant d'intégrer les procédés de fabrication dans la conception du produit. Ainsi, dans nos travaux, nous adoptons la démarche synthétisée sur la figure II.4.1-1c pour laquelle l'entrée devient un Cahier des Charges et non plus une géométrie fonctionnelle ou une géométrie tolérancée. Certains travaux dans le domaine de la mise en forme mettent en évidence la nécessité de remonter le procédé dans la conception [VAZ00] [ALT97] mais ne précisent pas comment.

Dans ses travaux de thèse, Laureillard [LAU00] propose une démarche d'intégration du processus de forgeage dans la conception des pièces, basée sur l'observation et la collaboration sur le terrain industriel. Le dispositif d'intégration produit-processus proposé s'appuie sur une organisation et des outils de collaboration entre les activités de conception et de méthodes-fabrication. Ces travaux concernent le cas de l'estampage et ne s'appliquent pas directement au contexte de nos travaux qui concerne le cas du forgeage de précision net shape. Notre objectif est d'exploiter les potentialités permises par les évolutions des procédés de mise en forme dès l'activité de conception.

a) Schéma du processus de conception/fabrication usuel de pièces en mise en forme



b) Schéma du processus de conception/fabrication usuel de pièces net shape



c) Schéma du processus de conception/fabrication de pièces net shape : évolutions envisagées

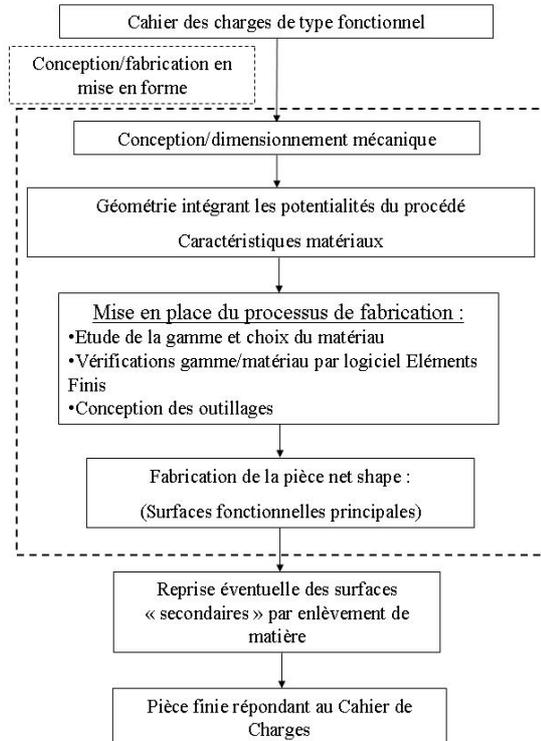


Figure II.4.1-1 : évolutions de la conception et de la fabrication de pièces en mise en forme

II.4.2 Outillages de mise en forme de précision

Le forgeage de précision regroupe deux principaux types de pièces, à savoir :

- ✓ Les pièces « near net shape » sur lesquelles on souhaite une précision géométrique permettant un minimum d'enlèvement de matière. Dans cette optique, on cherche aussi à supprimer les bavures sur les pièces.
- ✓ Les pièces « net shape »

Dans le cas du forgeage de précision, il est nécessaire d'utiliser des outillages fermés comme illustré sur la figure II.4.2-1 tirée de [DOE00a]. L'outillage conventionnel est constitué principalement d'une matrice supérieure et d'une matrice inférieure (figure II.4.2-1a), ce qui implique la présence d'une bavure sur la pièce forgée. L'outillage fermé est constitué soit d'une matrice supérieure qui se déplace vers la matrice inférieure (figure II.4.2-1b), soit de deux demi matrices maintenues en contact par un effort presseur et un ou plusieurs poinçons permettant « d'injecter » le métal entre les deux demi matrices (figure II.4.2-1c). Dans ces deux derniers cas la bavure est supprimée.

Doege et Bohnsack [DOE00a] présentent des travaux sur le développement d'outillages « d'injection » (figure II.4.2-1) pour le forgeage de pièces « net shape ». Ils présentent un exemple de rotor d'alternateur automobile forgé net shape (voir figure II.4.2-2). Cette pièce est obtenue par l'outillage présenté figure II.4.2-3 sur lequel on constate que les deux matrices de la figure II.4.2-1 sont en réalité ici une seule pièce qui est un anneau permettant également le guidage relatif des poinçons supérieur et inférieur. De plus, une ébauche tubulaire permet ici de forger la pièce avec l'alésage central débouchant.

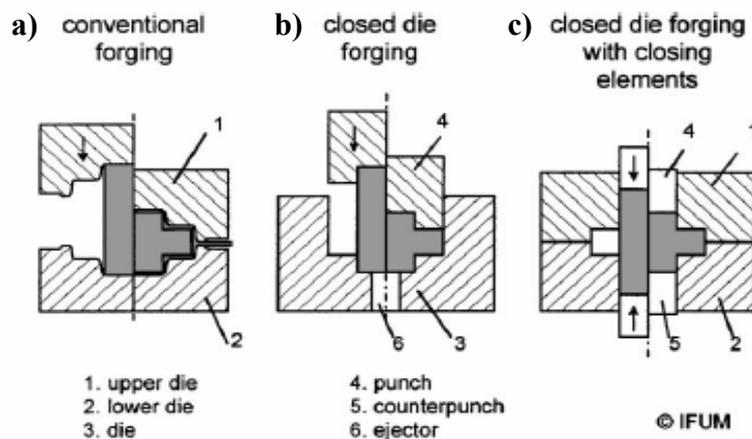


Figure II.4.2-1 : principes de divers outillages de forgeage [DOE00a]



Figure II.4.2-2 : rotor d'alternateur automobile forgé net shape [DOE00a]

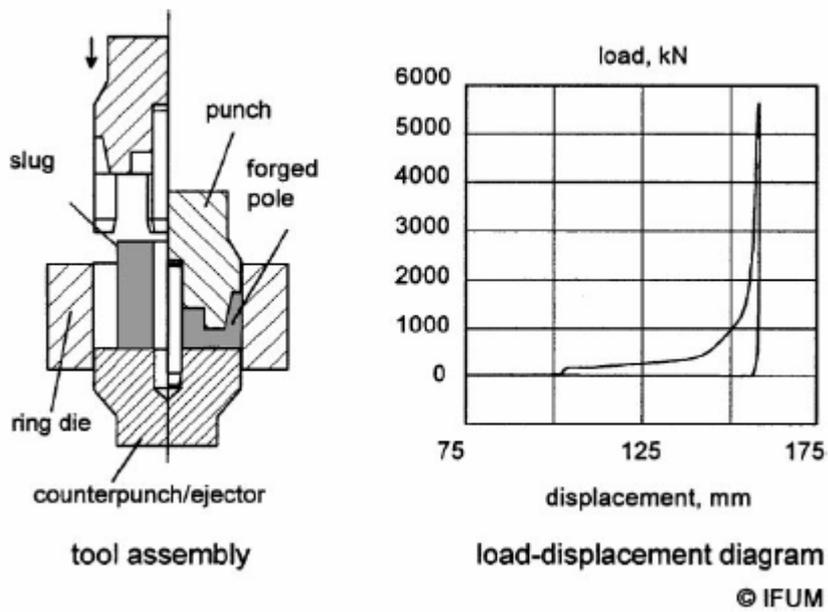


Figure II.4.2-3 : outillage pour le forgeage de rotors d'alternateurs [DOE00a]

La figure II.4.2-4 présente un outillage de forgeage de pignons de type « near net shape » pour lesquels on cherche une précision de réalisation meilleure que dans le cas de l'exemple précédent de rotor. Doege et Bohnsack utilisent dans ce cas une matrice mobile guidée par des colonnes assurant la précision de l'outillage indépendamment des défauts de guidage de la presse. Il est, dans ce cas, nécessaire de prévoir une force de fermeture entre la matrice et le poinçon pour éviter que le métal ne s'introduise entre les deux pièces. Cette force est ici obtenue par la compression de rondelles ressorts. On constate alors [DOE00a] que l'énergie nécessaire à la fermeture peut représenter jusqu'à près de 50% de l'énergie fournie par la presse.

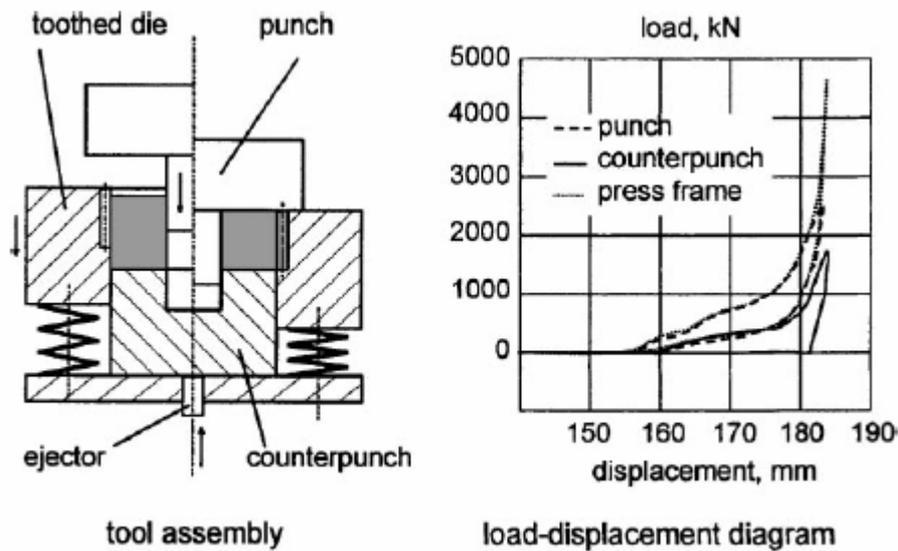


Figure II.4.2-4 : outillage de forgeage de pignons cylindriques « near net shape » [DOE00a]

Afin, en particulier, de diminuer l'énergie nécessaire à la fermeture de l'outillage, Doege et Bohnsack proposent l'utilisation d'un outillage à double action avec deux forces élastiques (voir figure II.4.2-5). Ce type d'outillage est utilisé pour le forgeage de pignons et également pour le forgeage de précision de bielles sans bavure pour lesquelles la diminution de métal peut atteindre 40% par rapport à une bielle estampée, notamment grâce à l'absence de bavure (voir figure II.4.2-6). De plus, l'opération de poinçonnage pour éliminer la bavure est supprimée dans le cas du forgeage de précision sans bavure. Par contre, l'utilisation d'outillages fermés impose en particulier de maîtriser le volume de matière de l'ébauche d'une part, pour assurer le remplissage des matrices, et d'autre part pour éviter de détériorer l'outillage, voir même la presse, dans le cas d'un volume de matière plus important que le volume de la pièce à forger. Un important travail de simulation est nécessaire dans ce cas afin de déterminer la forme de l'ébauche permettant un forgeage sans bavure [VAZ00]. Dans le cas des bielles, Vazquez et Altan proposent une alternative à l'outillage sans bavure sous la forme d'un forgeage de précision avec une bavure contrôlée [VAZ00a]. D'après les auteurs, l'intérêt est économique car dans ce dernier cas la simulation, notamment, est moins longue et moins coûteuse.

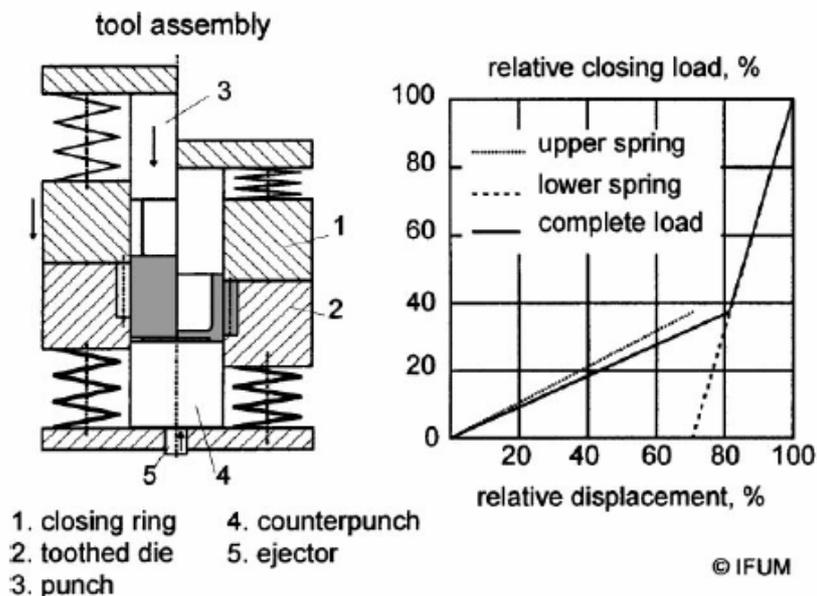


Figure II.4.2-5 : outillage utilisant deux forces élastiques [DOE00a]



Figure II.4.2-6 : comparaison entre deux bielles forgées : avec et sans bavure [DOE00a]

II.4.3 Conclusion

Les outillages complexes développés ces dernières années, associés aux outils de simulation des procédés de mise en forme, permettent aujourd'hui de forger des pièces net shape d'une complexité telle qu'un pignon conique droit par exemple. Nous avons indiqué dans le paragraphe II.4.1 la nécessité d'intégrer les activités de conception/dimensionnement dans le processus de conception/fabrication des pièces net shape afin de pouvoir exploiter pleinement les potentialités offertes par ces procédés. Dans ce cas, le point de départ devient un cahier des charges et non plus simplement une géométrie imposée. De plus, cet aspect est en complète adéquation avec l'évolution des relations entre les grands donneurs d'ordre et leurs fournisseurs. Cette évolution est en train de faire passer les forgerons d'un statut de sous traitant au statut de véritable partenaire. Ainsi, dans la partie suivante, nous proposons une approche de reconception de pièces tenant compte de cet aspect important.

III Approche proposée

III.1 Présentation de l'approche

Rappelons que la spécificité de nos travaux se situe sur l'identification des informations, au sens large du terme, c'est-à-dire plus précisément des données, informations et connaissances pertinentes, dans un contexte de reconception de produits industriels en relation avec les évolutions des processus de fabrication, centrés autour du procédé de forgeage. Le vocabulaire ainsi que les notions associées aux divers niveaux d'information ont été synthétisés par Labrousse et al. dans [LAB03] à partir des travaux de thèse de Gardoni [GAR99].

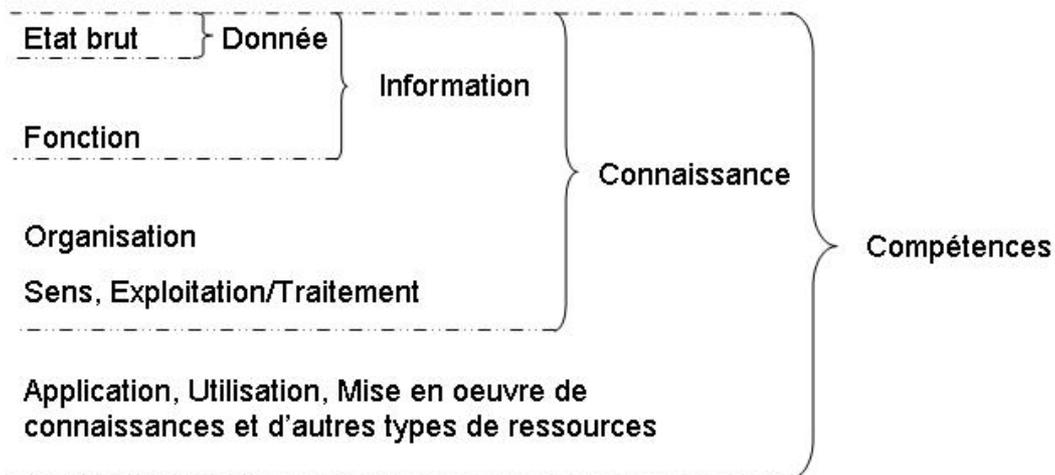


Figure III.1-1 : Définitions synthétiques des notions de données, informations, connaissances et compétences [GAR99]

Dans un but d'illustration de ces notions nous proposons un exemple dans le domaine de la construction mécanique :

Considérons une liaison pivot glissant entre deux pièces.

- ✓ Exemple de données : diamètre $d = 30$ mm ou longueur $l = 60$ mm
- ✓ Exemple d'information : alésage de diamètre nominal 30 mm et de longueur nominale de 60 mm
- ✓ Exemple de connaissance : liaison pivot glissant entre les deux pièces car $l > 1,5d$
- ✓ Exemple de compétence : maîtrise des phénomènes de jeu et de déformation conduisant à l'énoncé de règles de conception (ici $l > 1,5d$ pour obtenir une liaison pivot glissant)

Cette compétence permet d'obtenir d'autres connaissances, dans le domaine des liaisons mécaniques. Une autre connaissance serait : liaison glissière entre les deux pièces car longueur guidage $> 1,5 * \text{largeur guidage}$.

Les données, informations et connaissances étudiées ici sont celles liées aux produits, aux procédés, aux processus et aux ressources de fabrication (du point de vue technologique) et sont nommées données, informations et connaissances technologiques. Elles sont basées à la fois sur l'expérience métier, les résultats expérimentaux et les lois de la physique, de la mécanique, de la chimie, ...

III.1.1 Identification des données, informations et connaissances technologiques pertinentes

Notre approche est basée sur l'analyse des étapes du cycle de vie du produit, délimité dans notre cas du cahier des charges jusqu'à l'industrialisation et incluant en particulier les activités de conception, de fabrication et de contrôle des produits. Le contrôle inclus les aspects dimensionnels, métallurgiques, mécaniques et les tests sur bancs d'essais spécifiques. Cette approche se décompose en deux phases successives décrites ci après.

III.1.1.a Identification des données, informations et connaissances technologiques utilisées

Cette première phase consiste à identifier les activités de la partie du cycle de vie étudiée ici qui font intervenir des métiers et donc des points de vue potentiellement différents [BIG03].

Il faut également déterminer les données, informations et connaissances manipulées par l'ensemble des acteurs du cycle de vie étudié. Pour cela, il est nécessaire de formaliser les méthodes et procédures de travail au niveau de chaque activité, c'est-à-dire définir les données et les informations utilisées, la manière dont elles sont traitées (connaissances) et les résultats (données et informations, voire aussi connaissances) transmis aux autres activités.

Il est indispensable de prendre en compte toutes les activités constituant cette partie du cycle de vie. Par contre, notre travail est concentré sur la conception et donc certaines données, informations et connaissances manipulées ou créées à l'intérieur des activités propres aux processus de fabrication ne sont pas formalisées ici car n'intervenant que sur la spécialité du métier de fabrication. Les données, informations et connaissances prises en compte au niveau de ces activités sont en fait d'un niveau assez général car limitées à celles qui contraignent ou, au contraire, libèrent (par rapport à d'autres processus de fabrication) la géométrie et le matériau au niveau de la conception.

Comme nous l'avons expliqué au paragraphe II.2.1, nous utiliserons le modèle IDEFØ pour formaliser les résultats de cette phase.

Cette première phase permet notamment d'identifier les informations cruciales et de s'assurer de leur prise en compte tout au long du processus de conception et fabrication. On évite également toute perte de leur sémantique grâce au suivi de leur évolution au sein des activités ainsi qu'au cours du temps. Les aspects temporels n'ont pas fait l'objet d'une formalisation particulière mais sont décrits par le texte en faisant référence aux activités formalisées sur les diagrammes IDEFØ.

III.1.1.b Détermination des données, informations et connaissances technologiques pertinentes

Cette seconde phase se décompose en deux étapes décrites ci après :

- La première consiste à déterminer la pertinence, par rapport aux objectifs de qualité, des informations et des connaissances utilisées au niveau des différentes activités identifiées dans ce cycle. Des indicateurs de performance sont définis et quantifiés par des essais et/ou des simulations afin de valider cette pertinence.

- Il devient alors possible, dans cette seconde étape, de définir quelles sont les informations technologiques ainsi que les connaissances nécessaires permettant d'augmenter la qualité du produit. Une partie de ces informations technologiques et de ces connaissances doivent être déterminées par des expertises qui ont pour objectif d'améliorer la connaissance du produit dans son cycle de vie en tenant compte notamment des potentialités permises par les évolutions des procédés de fabrication.

Cette seconde phase permet non seulement de déterminer la pertinence des informations manipulées mais aussi d'en déduire des connaissances en incluant les critères des choix technologiques retenus : elle constitue une phase d'utilisation et d'acquisition de compétences. C'est ainsi que l'amélioration de la qualité des produits fabriqués peut être envisagée. Cette méthodologie permet de favoriser et de capitaliser les sources d'innovation issues dans 80% des cas de la fabrication [HOFpp].

III.2 Perspectives de capitalisation des connaissances acquises

Le problème de la capitalisation des connaissances appliqué à la problématique développée ici a déjà été détaillé au paragraphe II.2.2. Nous ne sommes pas allés jusqu'à spécifier complètement une application existante pour notre cas. Nous avons choisi de poser des bases, indépendamment d'un modèle ou d'une application, permettant de formaliser les données à utiliser : c'est la définition d'entités appliquées au produit étudié qui sera détaillée au paragraphe III.3.2. Cela permet de tenir compte des différentes vues associées aux acteurs métiers et ainsi de faciliter les échanges entre les différents acteurs du processus de conception et fabrication. L'objectif final serait, dans le cas de la conception et fabrication d'une nouvelle variante du produit, de faciliter la prise en compte de l'ensemble des évolutions possibles ou effectives au niveau produit, procédés, processus et ressources.

La réduction de la durée du cycle de conception et fabrication est obtenue ici notamment par la formalisation des connaissances au travers d'outils spécifiques (par exemple fiches de calcul, applications développées en CAO, manuels de référence en ligne, ...).

III.3 Application aux pignons forgés de différentiel

L'approche proposée pour obtenir ces améliorations nécessite obligatoirement de se pencher dans le détail sur l'application étudiée afin d'obtenir les compétences (voir figure III.1-1) nécessaires à la création et au déploiement d'un produit de manière homogène dans un contexte industriel. On entend par homogène le fait de ne pas chercher à quantifier certains paramètres très finement alors que l'incertitude sur un autre est prépondérante sur des variations de la qualité du produit par exemple. Nous pouvons illustrer cet aspect sur l'exemple de la qualité géométrique d'un pignon forgé : il est inutile de chercher à anticiper très finement les déformations des matrices tant que les dispersions dues au traitement thermique final de trempe superficielle sur les dentures ne sont pas maîtrisées. Ces dernières sont actuellement bien plus élevées que les dispersions issues du retour élastique des matrices. Nous mettons en évidence, dans ce chapitre, le déroulement de la méthodologie présentée dans le paragraphe III.1 appliquée au produit étudié dans son contexte industriel. Nous montrons comment déterminer la pertinence des informations manipulées et aussi comment déterminer des connaissances en incluant les critères des choix technologiques retenus afin de pouvoir ainsi améliorer la qualité des produits fabriqués. Pour montrer cela, nous précisons les activités qui existaient, ce que nous y avons modifié et les activités que nous avons ajoutées dans le cycle de vie du produit. Les diagrammes IDEFØ présentés décrivent des activités routinières. Ainsi ces diagrammes ne font pas apparaître en sortie des niveaux A-Ø ou AØ les connaissances et les compétences développées dans le cadre de ces travaux. Les résultats de nos travaux se traduisent au niveau des diagrammes IDEFØ par les modifications et les

créations d'activités que nous décrivons. Ces nouvelles activités utilisent alors les connaissances acquises lors de nos travaux et en partie les compétences.

III.3.1 Description globale des activités initiales et des principales informations associées

A l'aide du modèle IDEFØ nous décrivons sur la figure III.3.1-1 les activités que nous avons identifiées et les principales informations (au sens large) associées permettant d'avoir une vue synthétique de l'ensemble du processus de conception, fabrication et contrôle des pignons forgés de différentiel tel qu'il se présentait au départ de cette étude. Cette figure représente le niveau AØ du diagramme IDEFØ de l'activité «concevoir et fabriquer des pignons forgés net shape de différentiel» qui correspond au niveau A-Ø, le plus synthétique et représenté sur la figure III.3.1-2. Ce diagramme permet de décrire les activités concernant les phases de développement et d'industrialisation de nouvelles variantes de pignons jusqu'à leur mise en production en grande série. Précisons qu'avant la mise en production en grande série d'une nouvelle variante de pignons, il est nécessaire de fabriquer des premières pièces afin de valider leur conception par le constructeur automobile. Ces pièces, fabriquées en très faibles quantités (de l'ordre de la centaine), se divisent en deux types :

- ✓ Les pièces dites *prototypes*, destinées à vérifier la tenue en fatigue du différentiel conçu afin de permettre un retour éventuel sur la conception en cas d'échec à ce niveau. Afin d'obtenir des résultats de test représentatifs des futures pièces de série, il est nécessaire de fabriquer ces pièces avec les mêmes gammes et procédés que ceux de la grande série. Par contre, les opérations automatisées par exemple (manutention, contrôle, montage d'usinage, ...) sont exclues ici.
- ✓ Les pièces dites *échantillons initiaux* (E.I.), destinées à valider les capacités des procédés utilisés. Ces pièces sont issues d'une fabrication qui doit être représentative de la fabrication en grande série. Les caractéristiques de ces pièces comporteront notamment la même variabilité que les pièces de série. Elles sont prélevées après une durée de production permettant de considérer que le processus de fabrication est en régime établi. Un retour éventuel sur les méthodes de production reste ainsi possible à ce niveau.

Ces premières pièces fabriquées avant la mise en production en grande série sont destinées à limiter les prises de risque industriel.

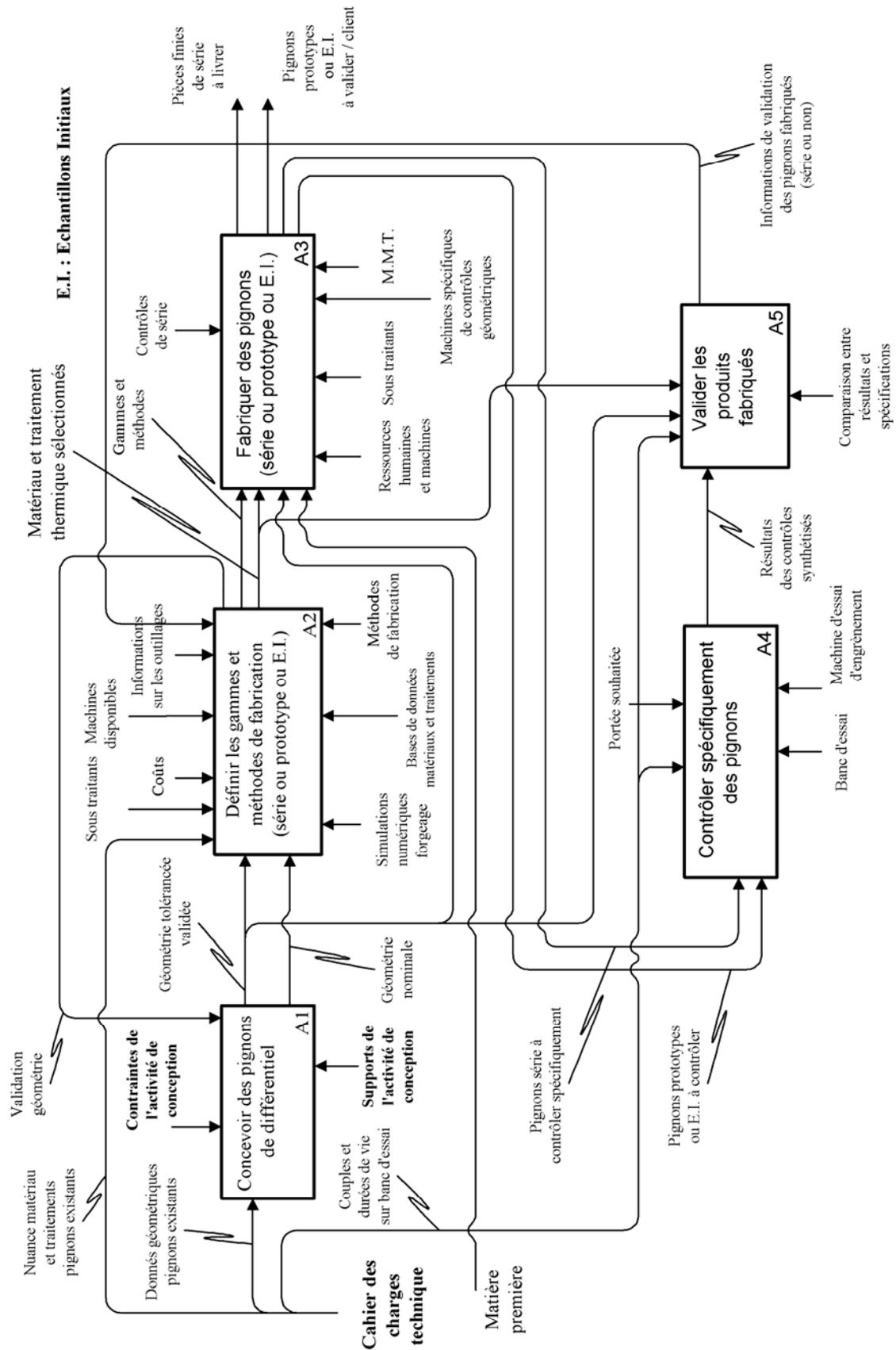


Figure III.3.1-1 : niveau A Ø de l'activité « concevoir et fabriquer des pignons forgés net shape de différentiels » avant modifications

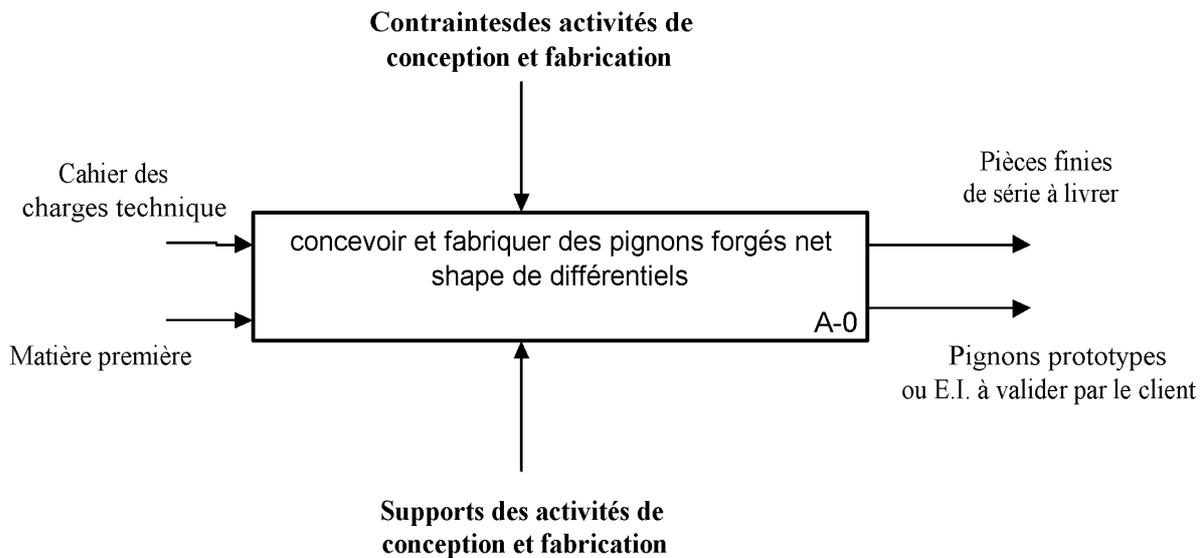


Figure III.3.1-2 : niveau A - Ø « concevoir et fabriquer des pignons forgés net shape de différentiels »

Cette phase de description, associée à des expertises, va donc permettre d'analyser la pertinence des informations et des activités en vue de proposer des améliorations avec une vue globale du cycle.

L'activité A2 « définir les gammes et méthodes de fabrication » n'est pas développée ici car aucun outil spécifique à cette activité n'est développé dans ce travail. Nous avons identifié les données d'entrée et de sortie de cette activité qui sont nécessaires à la modélisation du processus de conception -fabrication du différentiel. Les outils utilisés habituellement pour ce type d'activité ont été décrits dans la partie II.3 « la conception de pièces forgées ». Il en est de même pour l'activité A3 « fabriquer des pignons (série ou prototype ou E.I.) ».

En analysant l'ensemble des données et informations du cycle initial de conception et fabrication nous avons fortement modifié les activités A1 et A4 en prenant en compte de nouveaux paramètres pour deux raisons essentielles :

- La première est que le fait de réaliser un pignon par déformation plastique permet d'obtenir des formes beaucoup plus libres que par génération de trajectoire avec un outil coupant. Cela se traduit en forgeage par la réalisation de géométries plus proches des géométries théoriques permettant en particulier un engrènement de meilleure qualité.
- La deuxième raison est liée au fait que les constructeurs automobiles souhaitent aujourd'hui que l'activité de conception de certains sous ensembles soit entièrement exercée par le fournisseur qui devient alors partenaire. Cela implique, entre autres, que la définition des paramètres géométriques ainsi que le dimensionnement mécanique soit sous la responsabilité du fournisseur [REI03]. Cette activité est alors nouvelle chez le partenaire et n'est pas, ni dans notre cas, ni dans la plupart des cas, un transfert de compétences vers ce dernier.

Compte tenu de ces deux raisons, c'est l'activité de conception (notée A1) qui a subi le plus de modifications.

L'ensemble des modifications est détaillé dans les paragraphes suivants.

III.3.2 Etude des évolutions apportées à l'activité A1 : « concevoir des pignons de différentiel »

Dans cette partie nous détaillons pourquoi et comment nous avons modifié l'activité A1 « concevoir des pignons de différentiel » déjà identifiée sur la figure III.3.1-1. Nous aborderons partiellement la description de certaines autres activités dans cette partie lorsqu'elles sont liées à l'activité A1. Cela devient nécessaire, soit lorsqu'une validation de la conception est recherchée par une réalisation ou des essais, soit lorsque l'activité de conception A1 utilise des informations issues d'autres activités, de contrôle le plus souvent. La description suivant le modèle IDEFØ ne permettant pas de préciser directement la chronologie, il a été choisi ici d'expliquer cette chronologie par le texte car celle-ci est relativement logique et simple.

III.3.2.a Présentation des principales informations liées à l'activité initiale A1 : « concevoir des pignons de différentiel »

Le détail, au niveau A1 selon IDEFØ, de l'activité A1 avant la mise en place des améliorations est décrit sur la Figure III.3.2.a-1 « détails de l'activité A1 « concevoir des pignons forgés de différentiel » avant modifications ». Les explications qui suivent se réfèrent à cette figure ainsi qu'à la figure III.3.1-1.

Initialement la conception des pignons forgés d'un différentiel se faisait à partir d'un cahier des charges dont les informations techniques étaient principalement les suivantes :

- ✓ Une géométrie existante de pignons usinés, sous forme de dessins de définition à adapter selon les besoins du nouveau processus de fabrication.
- ✓ Une qualité minimale de l'engrènement à respecter et basée sur des relevés d'erreurs d'engrènement des mêmes pignons usinés en grande série.
- ✓ La durée de vie minimale sur banc d'essais de fatigue, valeur basée sur des essais de pignons usinés existants.

La flèche notée « Données géométriques pignons existants » regroupe les deux premiers aspects ci-dessus.

En plus de ces informations techniques, il était bien entendu imposé en particulier un coût maximum par pièce sur lequel le sous-traitant devait s'engager.

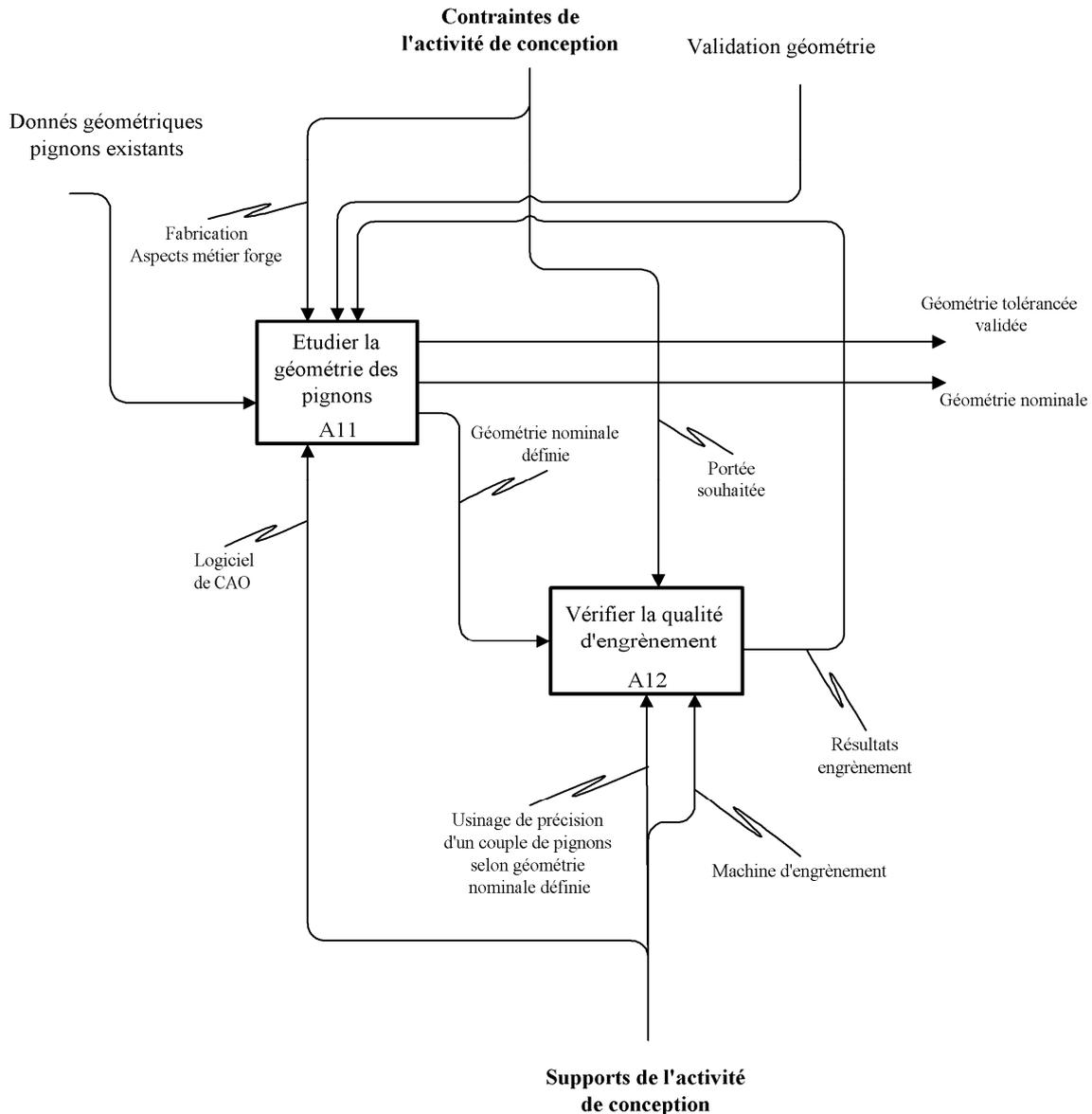


Figure III.3.2.a-1 : Détails de l'activité A1 « concevoir des pignons forgés de différentiel » avant modifications

La quasi-totalité des paramètres de définition géométriques (exemple : nombre de dents, module, angles de tête,...) des pignons usinés était alors conservée et l'activité A11 consistait essentiellement à adapter une géométrie de pignon usiné aux contraintes imposées par le procédé de forgeage. Une vérification des géométries ainsi modélisées se faisait avec l'activité A12 « vérifier la qualité d'engrènement » par l'utilisation d'une machine d'essai d'engrènement. Elle permet de vérifier les portées (zones en contact sur chaque dent au cours de l'engrènement) sous très faible charge sur des pignons prototypes usinés dont la géométrie est très proche de celle des modèles numériques. Lorsque l'engrènement était validé, de manière très qualitative ici, un relevé d'erreurs d'engrènement était réalisé par l'intermédiaire d'une prestation extérieure afin de contrôler que les erreurs d'engrènement se situaient en dessous des limites imposées par le cahier des charges. Ensuite des pignons *prototypes* étaient réalisés afin de contrôler notamment la durée de vie en fatigue afin de valider ou non la conception et de lancer, dans le cas favorable, l'étude de fabrication en série des pignons net shape (voir figure III.3.1-1 activité A3). Les contrôles réalisés sur ces pignons étaient de trois

types : géométriques (contrôle métrologique au niveau de A3 figure III.3.1-1 et contrôle qualitatif d'engrènement en A4 même figure) et mécanique par tenue en fatigue sur le banc d'essais spécifique (activité A4 sur la figure III.3.1-1). Précisons que notre partenaire industriel, Ascoforge Safe, s'était équipé très tôt d'un moyen d'essais spécifique pour vérifier la tenue en fatigue de pignons coniques : il s'agit d'un banc d'essais de fatigue.

Lorsque cette étape de contrôle était validée, les géométries tolérancées, transmises sous forme de plans de définition à l'activité A2 de la figure III.3.1-1, étaient utilisées afin de mettre en place les gammes de fabrication des *échantillons initiaux*. Le rôle de ces *échantillons initiaux* est de fournir au client des pièces quasi identiques au point de vue caractéristiques mécaniques et géométriques à celles qui seront produites en grande série afin de lui permettre de faire des tests de validation. Ces tests sont ici également réalisés par le fournisseur grâce au banc d'essais évoqué précédemment.

La détermination d'un couple matériau / traitement thermique se faisait aussi par comparaison avec les données des pignons initialement usinés à adapter au procédé de forgeage. Cela faisait partie de l'activité A2 de la figure III.3.1-1.

Sachant que les prochains cahiers des charges ne feraient plus référence à des pignons existants taillés d'une part, et après avoir mis en évidence que le procédé de forgeage permet de s'approcher mieux de la géométrie théorique d'un pignon conique d'autre part, il devenait donc nécessaire de transformer cette activité afin de prendre en compte ces remarques.

III.3.2.b Présentation de l'évolution des principales informations nécessaires en entrée de l'activité A1 : « concevoir des pignons de différentiel »

Initialement les informations utilisées en entrée de l'activité A1 étaient celles relatives au cahier des charges, telles que définies au paragraphe III.3.2.a. Une première évolution des informations d'entrée de cette activité concerne donc les informations du cahier des charges que l'on peut synthétiser de la manière suivante :

- Un encombrement maximum,
- Une durée de vie minimale sur banc d'essais,
- Un couple constant appliqué sur l'entrée du différentiel sur banc d'essais,
- Une vitesse de rotation différentielle constante sur banc d'essais,
- Une qualité d'engrènement minimale.

En fonction du constructeur automobile, il est possible de trouver plusieurs valeurs de couple sur le différentiel à tester en fatigue (deux en général) associées à plusieurs durées de vie et vitesses de rotation.

Précisons que l'élaboration du cahier des charges d'un différentiel est effectuée par le client, qui est ici un constructeur automobile. Ce cahier des charges est donc imposé et défini aujourd'hui par les quatre informations présentées synthétiquement par les quatre points précédents. Détaillons un peu plus les points qui sont importants dans notre démarche.

La durée de vie minimale sur banc d'essais est associée à un couple constant appliqué sur l'entrée du différentiel et à une vitesse de rotation différentielle constante. Le couple spécifié dans ce cahier des charges est très supérieur au couple moyen appliqué sur un véhicule automobile lors de son utilisation. Cette différence permet de limiter la durée des tests d'endurance, de fatigue des sous ensembles tel que le différentiel. Les ruines générées sur banc ne sont plus forcément du même type que celles du différentiel sur véhicule.

Ceci implique que les calculs de dimensionnement pour une tenue en fatigue sur banc d'essais sont différents des calculs normalisés qui sont prévus pour des durées de vie très élevées. Nous avons effectivement constaté sur plusieurs comparaisons entre le calcul et les résultats

des tests d'importantes différences. Par exemple si l'on cherche par le calcul la valeur du diamètre primitif minimum afin d'obtenir en théorie une tenue en fatigue oligocyclique on obtient un diamètre calculé plus de deux fois plus important que le diamètre réel des pignons qui tiennent effectivement plus de 10 000 cycles sur le banc d'essai.

Il serait donc utile de déterminer des règles de calcul particulières incluant le transport du « couple véhicule » (couple moyen d'utilisation donnant une durée de vie élevée sur véhicule) au « couple banc » (couple très élevé donnant une durée de vie très faible sur banc d'essai). Sur ce point nous avons constaté, dans le cadre des relations entre notre partenaire Ascoforge Safe et certains constructeurs automobiles, qu'en réalité aucune méthode théorique suffisamment fiable n'est actuellement connue. En fait les constructeurs réalisent de nombreux essais sur véhicule et sur banc, ce qui leur permet d'accumuler une expérience permettant de définir des valeurs de couples et de durées de vie associées sur banc d'essai considérées représentatives de la tenue des pièces sur le véhicule.

Une autre piste a été choisie ici pour tenter de déterminer une méthode de pré dimensionnement mécanique permettant de comparer les résultats de calcul à des pièces de différentiels existants. Il s'agit de ce que nous avons appelé le *Benchmarking*, qui n'est pas présenté dans ce document compte tenu des données confidentielles utilisées. Les résultats de ce *Benchmarking* sont symbolisés sur la figure III.3.2.d-1 « Activité A1 : concevoir des pignons de différentiel après modifications » par un des supports de l'activité de conception noté « informations sur des différentiels existants ».

Au niveau de la définition de l'encombrement disponible, le cahier des charges peut être plus ou moins détaillé selon les cas. La figure III.3.2.b-1 présente un exemple dans un cas où les informations géométriques sont relativement précises. On peut noter en particulier que le diamètre de la sphère est imposé ainsi que les diamètres des alésages des satellites et des cannelures des planétaires. Les distances LP1 et LS1 sont imposées en cotes maxi afin de s'assurer d'une longueur de cannelures et d'alésage minimale. Au niveau de la denture seule une forme en développante de cercle sphérique est imposée ainsi qu'un jeu de fonctionnement. Les tolérances sur les surfaces de denture ne sont pas imposées par le cahier des charges mais le fournisseur doit respecter une certaine qualité d'engrènement et cela avec un coût de fabrication minimum.

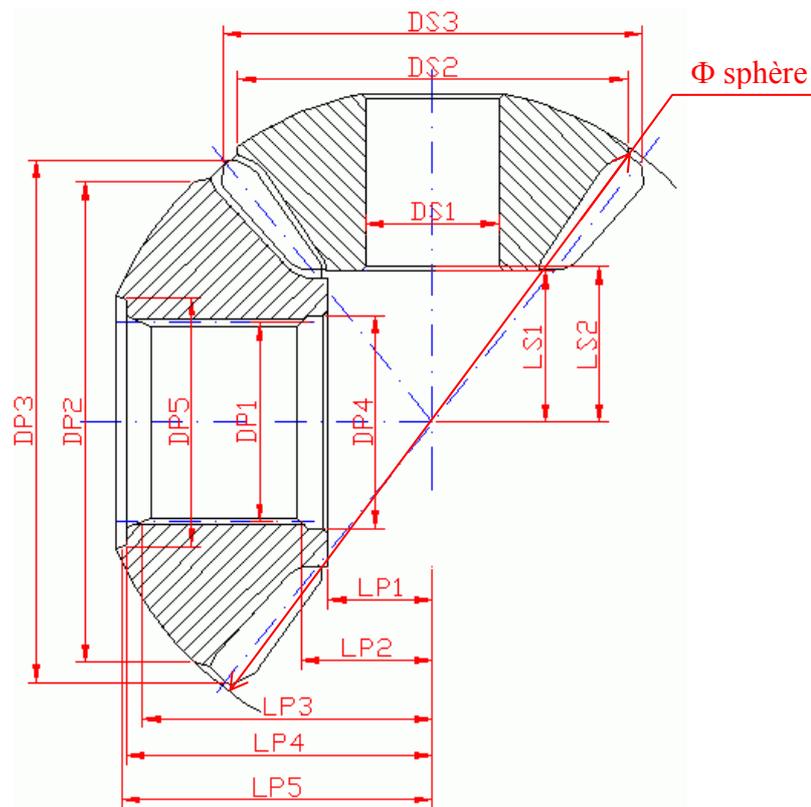


Figure III.3.2.b-1 : exemple de cahier des charges au niveau géométrique

III.3.2.c Présentation de l'évolution des principales informations nécessaires en sortie de l'activité A1 : « concevoir des pignons de différentiel »

Les informations nécessaires au final en sortie de cette activité sont de type géométrique, comme pour la situation initiale, mais aussi de type mécanique, c'est-à-dire caractéristiques matériaux. En effet, à partir du moment où le fournisseur doit, ou peut, dimensionner les pignons qu'il fabrique, il devient nécessaire de lier l'aspect caractéristique mécanique à l'activité de conception.

Les informations géométriques schématisées par les deux flèches de sortie de l'activité A1 sur la figure III.3.2.d-1 après la mise en place des améliorations sont de deux types : avec ou sans les tolérances associées. Pour le cas où elles sont sans tolérances elles permettent aux autres activités de démarrer sans attendre la définition complète des pièces et ainsi, soit gagner du temps, soit permettre d'alerter les concepteurs si une difficulté risque de se présenter en aval de la conception. Par exemple, les simulations numériques de forgeage sont effectuées avec la géométrie nominale. Pour le cas où elles sont avec tolérances il s'agit alors de la définition finale validée.

Pour ce qui concerne les informations relatives aux caractéristiques matériaux, elles sont également de deux types (voir figure III.3.2.d-1) : affinées ou non pour les mêmes raisons que précédemment, c'est-à-dire permettre aux activités en aval de la conception de commencer à travailler avant la finalisation complète de la conception.

III.3.2.d Présentation de la nouvelle activité A1 : « concevoir des pignons de différentiel »

Comme expliqué précédemment, il est nécessaire au niveau de cette nouvelle activité de déterminer, pour chaque pignon d'un différentiel étudié, une géométrie et un dimensionnement mécanique. Ces deux aspects n'étant bien sûr pas indépendants, il faut reprendre entièrement la sous activité ancienne A11 (figure III.3.2.a-1) puisque celle-ci ne concernait que l'étude de la géométrie. De plus, cette ancienne activité A11 ne prenait pas en compte l'ensemble des possibilités offertes par le procédé de réalisation net shape. Compte tenu des besoins en informations exprimés au niveau de la sortie de l'activité A1 et des constatations précédentes, il apparaît utile de créer une sous activité permettant de coupler les deux aspects géométrie et dimensionnement mécanique. Il s'agit de la sous activité notée A11 sur la figure III.3.2.d-1 qui présente le niveau A1, selon IDEFØ, de la nouvelle activité A1.

L'architecture choisie pour le différentiel étudié intervient également sur le pré – dimensionnement puisque, comme expliqué au paragraphe II-1, le nombre de satellites peut être de deux, trois ou quatre. Précisons que ce choix est actuellement effectué par le constructeur automobile, car cela influe notamment sur la géométrie du boîtier. Il est néanmoins possible que ce choix revienne au fournisseur. Dans tous les cas ce choix va intervenir notamment sur les caractéristiques des matériaux par l'intermédiaire des calculs de pré – dimensionnement qui font intervenir en particulier la contrainte limite en rupture et en pression superficielle du matériau. Il est important de prendre en compte, dans ces calculs, des matériaux et traitements thermiques associés qui soient disponibles à un coût maîtrisable (contrainte « coût matériau » sur l'activité A11). Il est prévu d'étudier plusieurs alternatives au niveau de la sous activité A11 afin de faire un choix. Le choix a priori le moins coûteux est celui de deux satellites car le nombre de pièces et le volume de matière sont moindres. Il se peut que dans certains cas l'encombrement disponible énoncé dans le cahier des charges soit trop faible vis-à-vis des caractéristiques matériaux (voir paragraphe II-1). C'est dans ce cas qu'il devient nécessaire de faire le choix d'augmenter le nombre de satellites au dessus de deux.

Au niveau du pré – dimensionnement de la géométrie cette activité permet de déterminer les 9 paramètres géométriques nécessaires et suffisants pour définir les parties actives des pignons (voir paragraphe II.3.1). Il est possible ici de modifier l'épaisseur circulaire sur les pignons afin d'obtenir des épaisseurs en sommet de dent compatibles avec le procédé de forgeage (suffisamment élevée) tout en respectant les contraintes d'engrènement. Cette modification est alors prise en compte dans les calculs de dimensionnement mécanique.

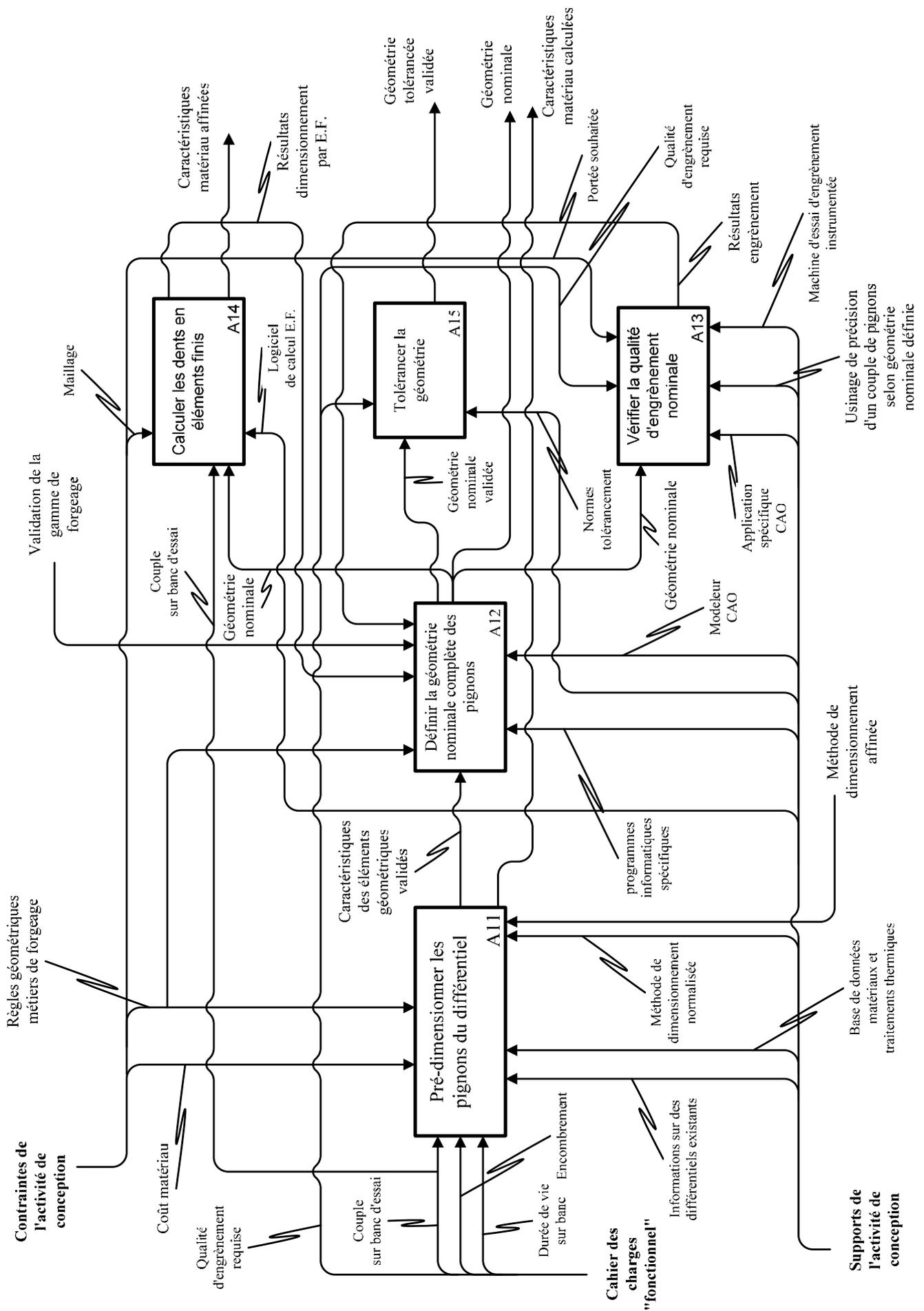


Figure III.3.2.d-1 : « Activité A1 : concevoir des pignons de différentiel après modifications »

Lorsque les pignons ont été pré - dimensionnés, l'activité A12 “ Définir la géométrie nominale complète des pignons ” permet de modéliser la géométrie des dents avec un logiciel de CAO, associé à un programme de calcul mathématique. Il s’agit à ce niveau de géométries nominales. Les raccordements entre dents et les arrondis nécessaires au forgeage et à l’usinage des matrices sont modélisés directement avec le logiciel de CAO.

L’ajout de renforts en pied de dent permet de les rigidifier afin d’augmenter la tenue des pignons vis-à-vis des éventuels à-coups en fonctionnement. La mise en place d'un bombé sur le flanc des dents et d'un jeu de fonctionnement de l'engrenage se fait également à ce niveau. Il est alors possible de modéliser complètement en CAO le pignon sans risque de perte de temps puisque l’on a vérifié que les règles métiers de forgeage sont respectées et que le pré-dimensionnement a été effectué. La figure III.3.2.d-2 montre un exemple de modèle CAO d’un pignon et permet de définir les diverses formes complémentaires aux surfaces actives des dents. Ce modèle CAO nominal peut alors être transmis aux activités en aval de la conception avant d’être validé définitivement.

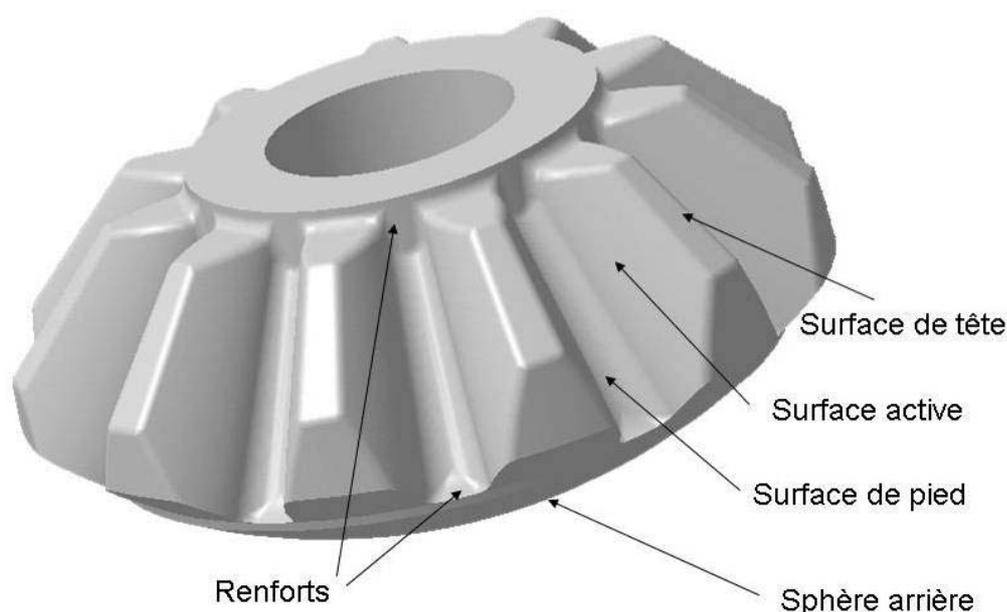


Figure III.3.2.d-2 : exemple d’un modèle CAO d’un pignon forgé.

La vérification des géométries ainsi modélisées est nécessaire afin de valider toutes les étapes précédentes. L’objectif est à ce niveau de détecter une éventuelle erreur. Nous avons également modifié l’activité existante initialement (notée A12 « vérifier la qualité d’engrènement » sur la figure III.3.2.a-1) qui utilisait uniquement une machine d’essai d’engrènement et de manière exclusivement qualitative.

Nous avons développé une application basée sur un logiciel de CAO permettant de faire une première vérification avant de réaliser physiquement un engrènement (voir figure III.3.2.a-1 support *application spécifique CAO* de l’activité A13). Cette application permet de vérifier numériquement si la géométrie modélisée engendre des interférences de fonctionnement de l'engrenage et de visualiser qualitativement l'évolution de la tâche de contact pendant l'engrènement. Cette application vise à intégrer également les paramètres de positionnement par rapport aux surfaces d’assemblage et les conséquences sur l’engrènement [DAN03].

Compte tenu du cahier des charges au niveau de l'engrènement, il est nécessaire de compléter la vérification précédente par une quantification des erreurs d'engrènement d'un couple de pignons (un satellite et un planétaire). Nous avons soulevé la nécessité d'instrumenter la machine existante avec des codeurs rotatifs pour la validation des pièces réalisées par forgeage. Nous avons décidé de l'utiliser également pour valider la conception avec des pignons usinés avec une précision géométrique de classe ISO 5 (voir figure III.3.2.d-1, support de l'activité A13). Les dentures des pièces forgées sont réalisées avec une qualité ISO 7 en sortie de forgeage et avec une qualité ISO 8 après traitement thermique final.

Comme précisé au paragraphe II.4 les normes de dimensionnement des engrenages coniques sont basés sur un modèle d'engrenage équivalent cylindrique. Afin d'affiner ce dimensionnement nous avons ajouté une activité A14 « Calculer les dents en éléments finis » (voir figure III.3.2.d-1). Elle permet notamment de prendre en compte, dans la détermination des contraintes, la géométrie conique, le bombé longitudinal, la géométrie du raccord de fond de dent et les renforts. Le résultat de cette activité donne des caractéristiques matériaux affinées permettant de finaliser le dimensionnement.

Le tolérancement de la géométrie, basé sur les normes, est effectué dès que la géométrie nominale est validée (Activité A15 figure III.3.2.d-1).

Lorsque les étapes précédentes sont achevées, des pignons *prototypes puis Echantillons Initiaux (E.I.)* sont, comme dans la situation initiale, réalisés afin de contrôler notamment la durée de vie en fatigue et ainsi de valider ou non la conception et de lancer, dans le cas favorable, l'étude de fabrication en série des pignons net shape. Ces étapes intermédiaires ont été maintenues pour valider nos travaux étape par étape et afin de convaincre les intervenants (chez notre partenaire et chez ses clients). Cela est nécessaire compte tenu des investissements très élevés mis en jeu lors de la mise en production d'un nouveau différentiel.

III.3.3 Etude des autres évolutions apportées au niveau du cycle initial

Les modifications apportées à l'activité A1 se répercutent sur les informations décrites au niveau AØ, selon IDEFØ. Ces nouvelles informations sont représentées sur la figure III.3.3-1 qui décrit le nouveau cycle de conception – fabrication – contrôle. Les principales modifications concernent les activités A4 et A5 du cycle initial (figure III.3.1-1). Nous détaillons ces modifications dans ce paragraphe. L'activité A4, ancienne comme nouvelle, est intitulée *contrôler spécifiquement des pignons* afin de faire une distinction entre les contrôles de production en grande série et des contrôles plus complets qui nous intéressent ici. Les contrôles de série ont pour but notamment de vérifier si des dérives apparaissent en raison de l'usure des outillages ou de dérèglages de machine, etc. Il s'agit essentiellement de contrôles visuels ou géométriques.

E.I. : Echantillons Initiaux

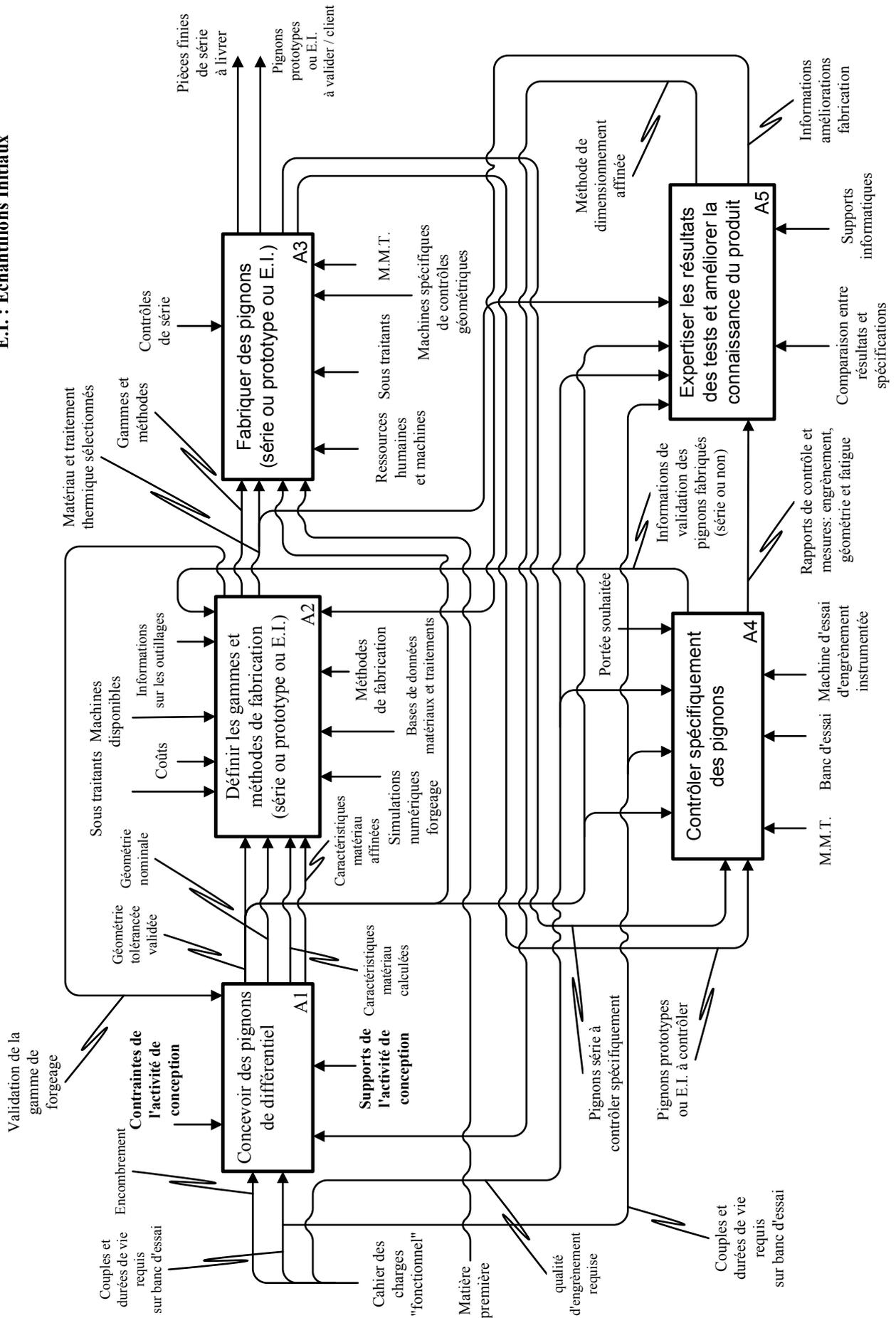


Figure III.3.3-1 : niveau A Ø de l'activité « concevoir et fabriquer des pignons forgés net shape de différentiel » après modifications

Le dimensionnement mécanique décrit dans l'activité A1 de la figure III.3.2.d-1 se fait à partir de méthodes de dimensionnement normalisées qui ne concernent pas directement les pignons coniques ni les pignons forgés. Ce constat fait apparaître l'intérêt de s'appuyer sur une vérification de la fonctionnalité du produit par la mise en place de tests sur bancs d'essais. Nous avons mis en évidence, dans le but d'affiner encore l'expertise des résultats d'essais sur banc, l'intérêt de coupler les contrôles de fatigue sur banc d'essai avec des contrôles d'engrènement et de métrologie tridimensionnelle. Des travaux particuliers concernant la métrologie des pignons ont permis de prendre en compte en particulier les spécificités des pignons forgés par rapport aux pignons taillés [BAU01] [BAU01a]. Cela permet notamment au concepteur de disposer d'informations plus précises sur le dimensionnement des futurs pignons (tolérances, calcul de durée de vie,...) afin d'augmenter encore la performance en termes de durée de vie et de qualité d'engrènement des futurs pignons conçus.

Dans la situation initiale décrite sur la figure III.3.3-2 les contrôles spécifiques des pignons série ou non étaient destinés essentiellement à valider la production, ou la future production dans le cas des prototypes ou échantillons initiaux (E.I.). Le contrôle de la qualité d'engrènement consistait à vérifier visuellement les portées, c'est-à-dire les zones en contact au cours de l'engrènement avec un couple mécanique très réduit. Ce contrôle très qualitatif peut permettre uniquement de détecter des grosses anomalies d'engrènement comme par exemple des interférences de fonctionnement ou un bombé de très mauvaise qualité. En effet, nous avons utilisé cette méthode afin de tenter de comparer plusieurs engrènements de pignons forgés de même référence et avec des défauts de positionnement volontaires. Nous avons alors constaté que d'un point de vue comparatif la méthode n'est pas suffisamment sensible. Nous détaillerons les aspects liés aux erreurs d'engrènement au paragraphe IV.2.2.

Nous avons choisi d'instrumenter la machine d'essai d'engrènement avec deux codeurs rotatifs de précision afin de pouvoir quantifier très finement les défauts d'engrènement générés par les pignons forgés et ainsi qualifier leur qualité d'engrènement. La figure III.3.3-3 qui présente la nouvelle activité de contrôle pour laquelle nous avons noté en support de l'activité A41 « *machine d'essai d'engrènement instrumentée* ». Toujours dans la situation initiale, les contrôles de durée de vie en fatigue sur le banc d'essai se faisaient sans connaissance de la géométrie réelle. Nous avons donc décidé de coupler chaque essai de fatigue à des mesures préalables en métrologie tridimensionnelle et en erreurs d'engrènement. L'activité A42 figure III.3.3-3 concernant le contrôle par métrologie tridimensionnelle (support de l'activité MMT, Machine à Mesurer Tridimensionnelle) a été ajoutée au niveau de l'activité A4. La métrologie tridimensionnelle était bien sûr déjà utilisée chez notre partenaire mais essentiellement en contrôle de production, donc avec un dépouillement des mesures très succinct ne permettant pas d'exploiter assez finement ces mesures dans notre contexte. De plus, comme précisé plus haut, des travaux spécifiques à la métrologie ont été réalisés afin d'obtenir des gammes de contrôle beaucoup plus performantes vis-à-vis de la géométrie des pignons forgés.

Au niveau de l'essai de fatigue, (activité A43 de la nouvelle activité A4 figure III.3.3-3) nous avons réalisé plusieurs expertises visant à qualifier ce banc d'essai en particulier au niveau de la répétabilité des essais. Ces expertises sont présentées au paragraphe IV.2.1.

Les informations de sortie de la nouvelle activité A4 sont de deux natures et symbolisées par deux flèches de sortie sur la figure III.3.3-3. Une flèche intitulée « informations de validation des pignons fabriqués (série ou non) » qui montre qu'à partir des rapports de contrôle la sous activité A44 permet de valider soit la mise en route de la fabrication en série, soit une éventuelle partie de la production en série avant expédition au client. L'autre flèche intitulée « rapports de contrôle et mesures : engrènement, géométrie et fatigue » montre que l'ensemble des informations issues des trois types de contrôles effectués est transmis à

l'activité A5 de la figure III.3.3-1 afin de disposer d'un maximum d'informations permettant d'améliorer la connaissance du dimensionnement des pignons.

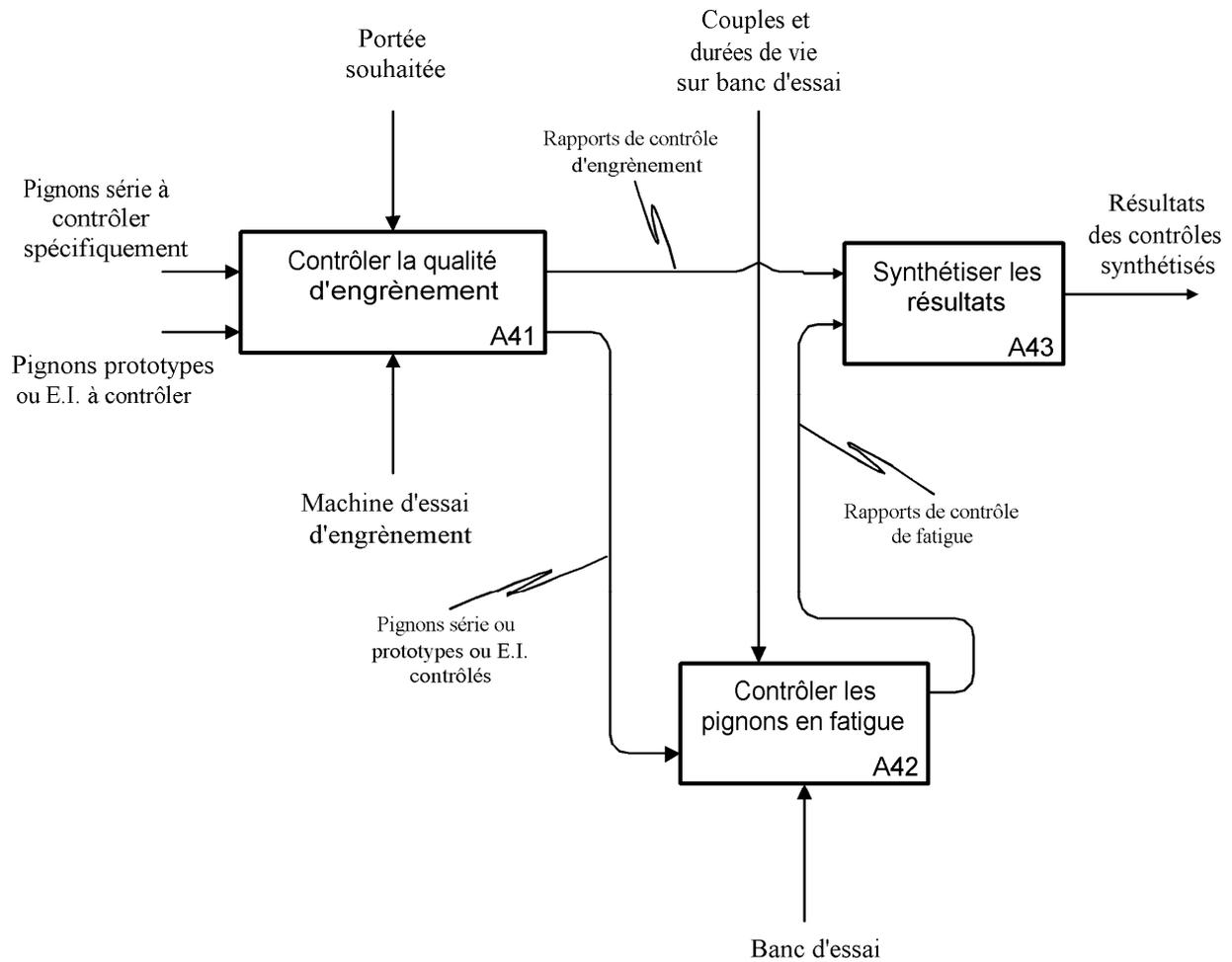


Figure III.3.3-2 : décomposition de l'activité A4 avant modification

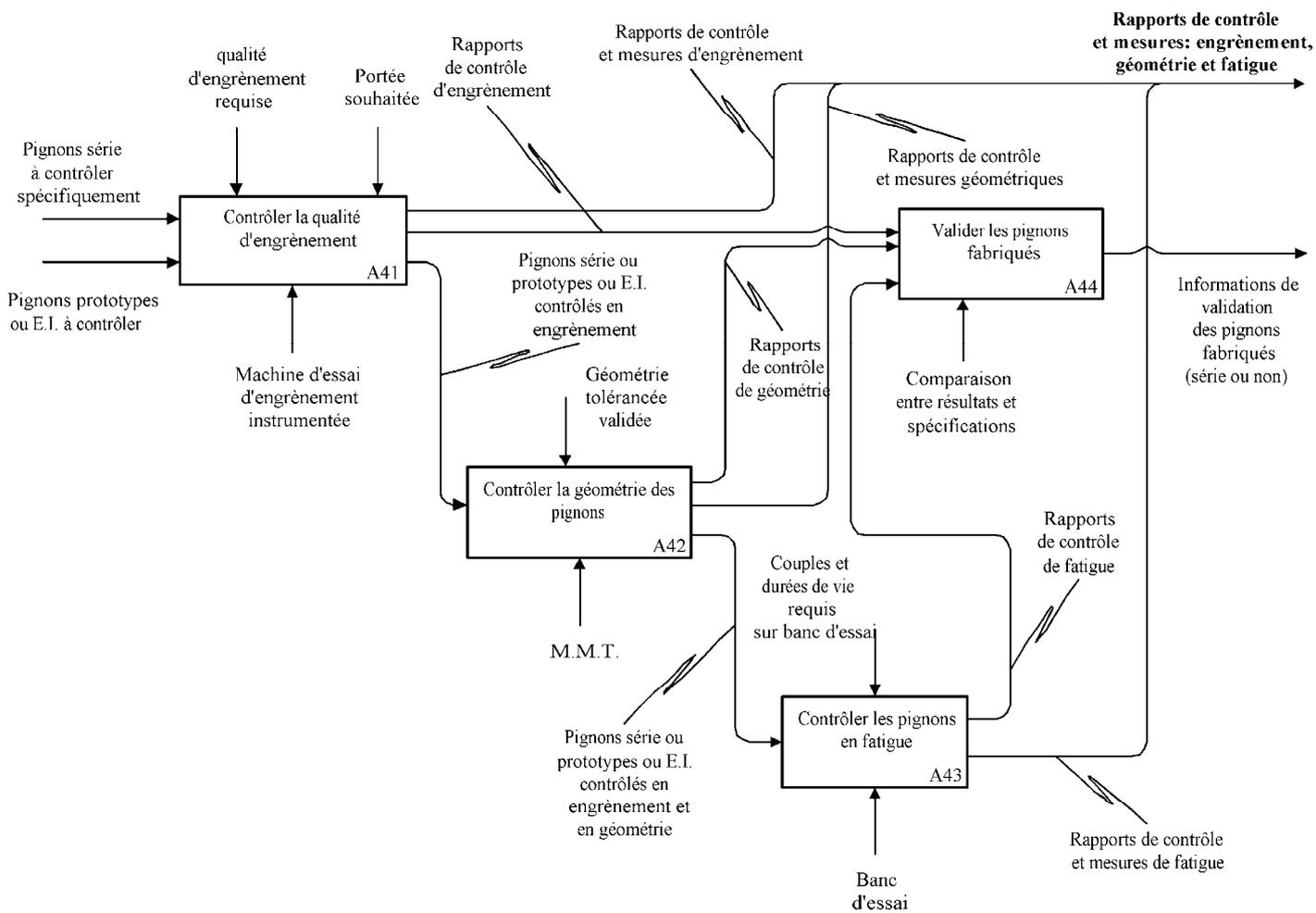


Figure III.3.3-3 : décomposition de l'activité A4 après modification

III.3.4 Entités liées aux pièces du produit différentiel

On constate donc sur le diagramme IDEFØ précédent que la conception et réalisation de ces pignons font appel à des activités très diverses correspondant aussi à des métiers différents (conception, forge, usinage, traitement thermique, métrologie, ...). Comme expliqué au paragraphe II.2.3, nous avons choisi une approche par entités afin de décrire l'ensemble des caractéristiques des pièces, nécessaires et suffisantes au fonctionnement de chaque activité [BAUpp]. Nous présentons ici le résultat d'une réflexion commune à des points de vue différents (conception, fabrication, métrologie) qui ne se veut pas exhaustive mais qui permet de fixer des bases. En effet chaque point de vue doit pouvoir s'exprimer et pouvoir accéder aux informations pertinentes à travers cette modélisation.

D'autre part, la nature des données et informations technologiques caractérisants un produit varie considérablement en fonction de l'état de connaissance du produit. Par exemple, sur la figure III.3.3-1 présentant le niveau A Ø de l'activité « *concevoir et fabriquer des pignons forgés net shape de différentiels* », l'état de connaissance du produit change à la sortie de chaque activité du cycle de conception – fabrication. Il part de l'état de données initiales (données du cahier des charges ici) et évolue jusqu'à l'état de données du produit qualifié (le produit avec les procédés, processus et ressources associés complètement définis).

Cette approche par entités doit permettre de décrire l'ensemble du produit *différentiel*. Les différentes architectures existantes (voir partie II paragraphe 1) doivent être prises en compte dans la définition des entités.

III.3.4.a Mise en place des entités

La figure III.3.4-1 montre un exemple de modélisation générale partielle des pignons forgés de différentiel sous forme d'entités [BER03]. On appelle ici macro-entité toutes entités décomposables en macro-entités ou entités élémentaires. Les entités de la macro entité "Pignon" représentées sur cette figure concernent uniquement la denture du pignon et le matériau. Les autres entités géométriques telles que par exemple les surfaces d'appui du pignon sur le boîtier, l'alésage ou les cannelures, etc. ne sont donc pas présentées ici.

La macro entité *pignon* est constituée des macro entités *matériau*, *denture* et des surfaces d'assemblage avec le boîtier qui sont, sur cet exemple, les entités *alésage* et *sphère*. La macro entité *denture* est décomposée sur cette figure en macro entité *dent* elle-même décomposée en quatre entités *surface de tête*, *flanc droit*, *surface de pied* et *flanc gauche* (voir définitions Figure III.3.4-2 et annexe IV.2.1.b-3).

Dans ce modèle les entités de la macro entité "Pignon" évoluent en fonction de la valeur de sa caractéristique "état". Dans l'état "données initiales" par exemple, dans les instances correspondantes du modèle seules les données du cahier des charges du différentiel seront quantifiées (caractéristique "Durée de vie banc spécifiée" pour ce qui concerne le pignon). Dans l'état "géométrie tolérancée", l'ensemble des attributs des entités géométriques sont quantifiés par une valeur nominale complétée par les valeurs numériques des tolérances associées (figure III.3.4-3). Au niveau de l'activité A3 "Fabriquer des pignons" (voir figure III.3.3-1), l'attribut "état" de la macro entité "Pignon" peut être caractérisé par plusieurs valeurs puisque la fabrication des pignons fait appel à plusieurs procédés. On pourrait par exemple avoir l'état "forgé", l'état "usiné" ou encore l'état "traité thermiquement". Mais en réalité les gammes sont généralement constituées de plusieurs opérations ce qui implique de considérer des caractéristiques "état" supplémentaires comme par exemple l'état "forgé à chaud" ou l'état "forgé calibré" etc. Un numéro de lot et un numéro d'outillage de forgeage au niveau de la macro entité "Pignon" permettent en particulier la traçabilité de la fabrication des pièces.

Un attribut “numéro de contrôle” de la macro entité “Pignon” est susceptible d’être affecté d’une valeur numérique lorsque l’attribut “état” est caractérisé par une étape de fabrication. Ce numéro de contrôle codifie le type de contrôle réalisé sur la pièce concernée ainsi que l’étape de fabrication correspondante (par exemple contrôle métrologique de denture après calibrage, contrôle de dureté après traitement thermique, test d’endurance sur pièce finie, etc.). Il permet alors d’affecter des valeurs numériques aux caractéristiques des entités concernées par ces contrôles (figure III.3.4-4). L’affectation de ces valeurs numériques de contrôle permet de décrire à l’aide d’un même modèle chaque pignon mesuré.

Avant chaque étape du processus de conception-réalisation-contrôle, l’intervenant peut extraire un certain nombre de renseignements, faire son calcul et/ou sa mise en œuvre. Une fois l’étape terminée, il renseignera les caractéristiques qu’il a obtenues et mentionnera la nouvelle valeur de la caractéristique "Etat" dans lequel se trouve le pignon (géométrie initiale, ébauché à chaud, calibré, traité thermiquement, ...). Plusieurs étapes peuvent avoir lieu en parallèle, chacun pouvant effectuer sa tâche lorsque les données dont il a besoin sont disponibles.

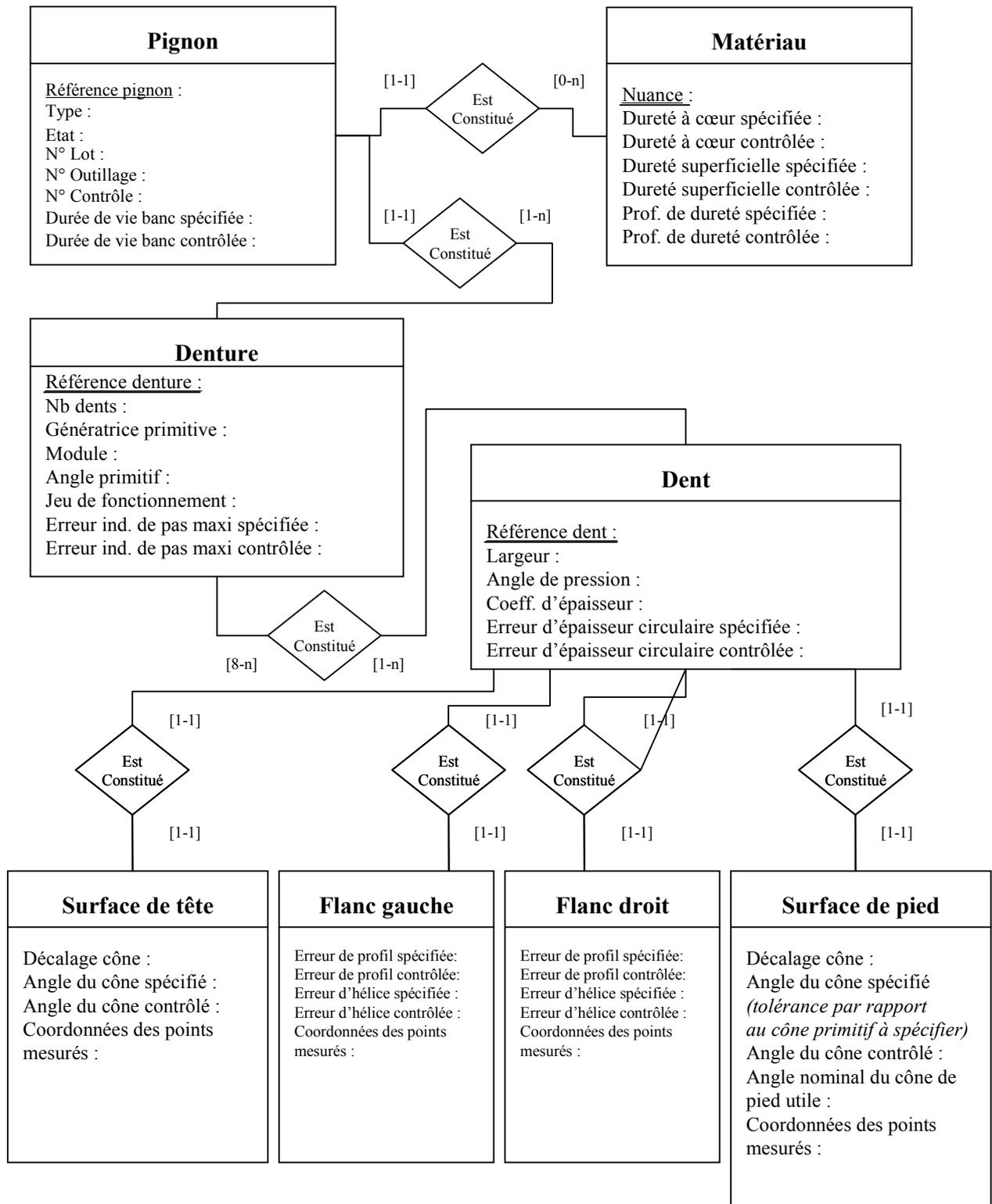


Figure III.3.4-1: Décomposition d'un pignon sous forme d'entités

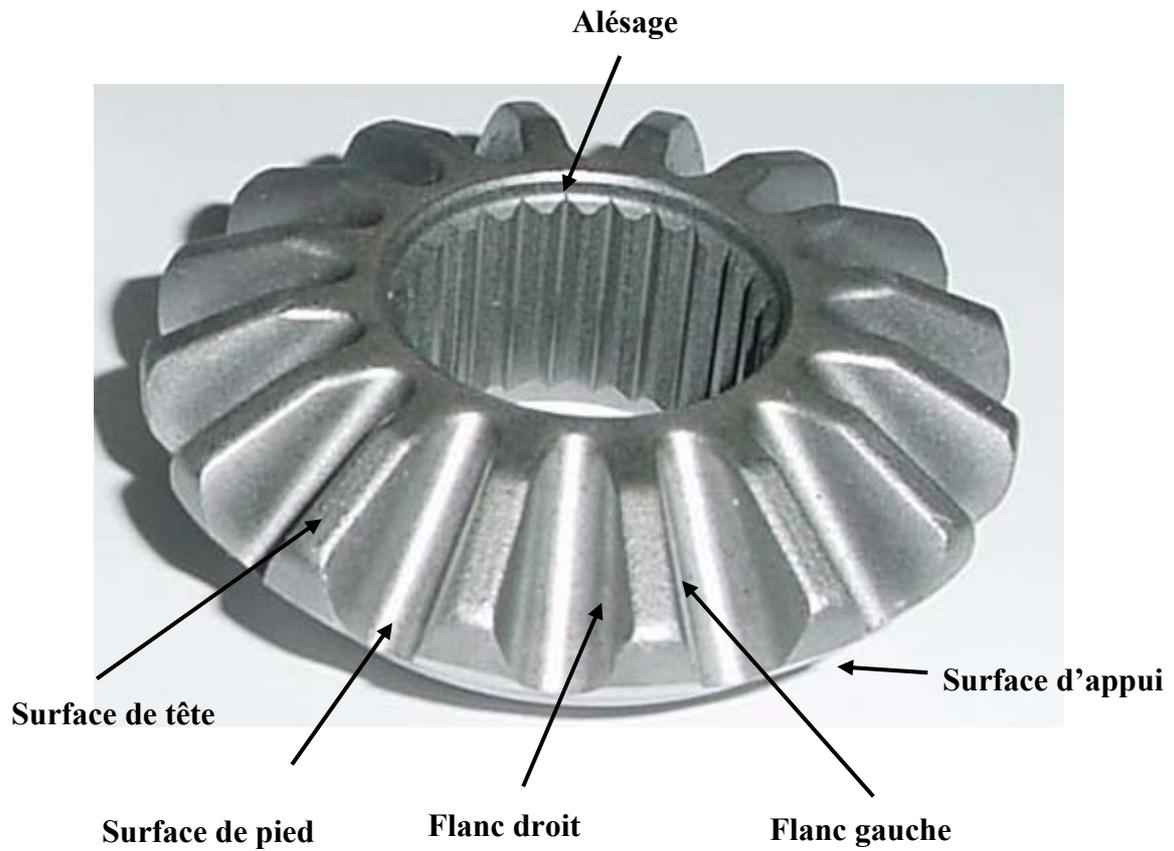


Figure III.3.4-2 : Principales entités géométriques associées aux pignons coniques forgés

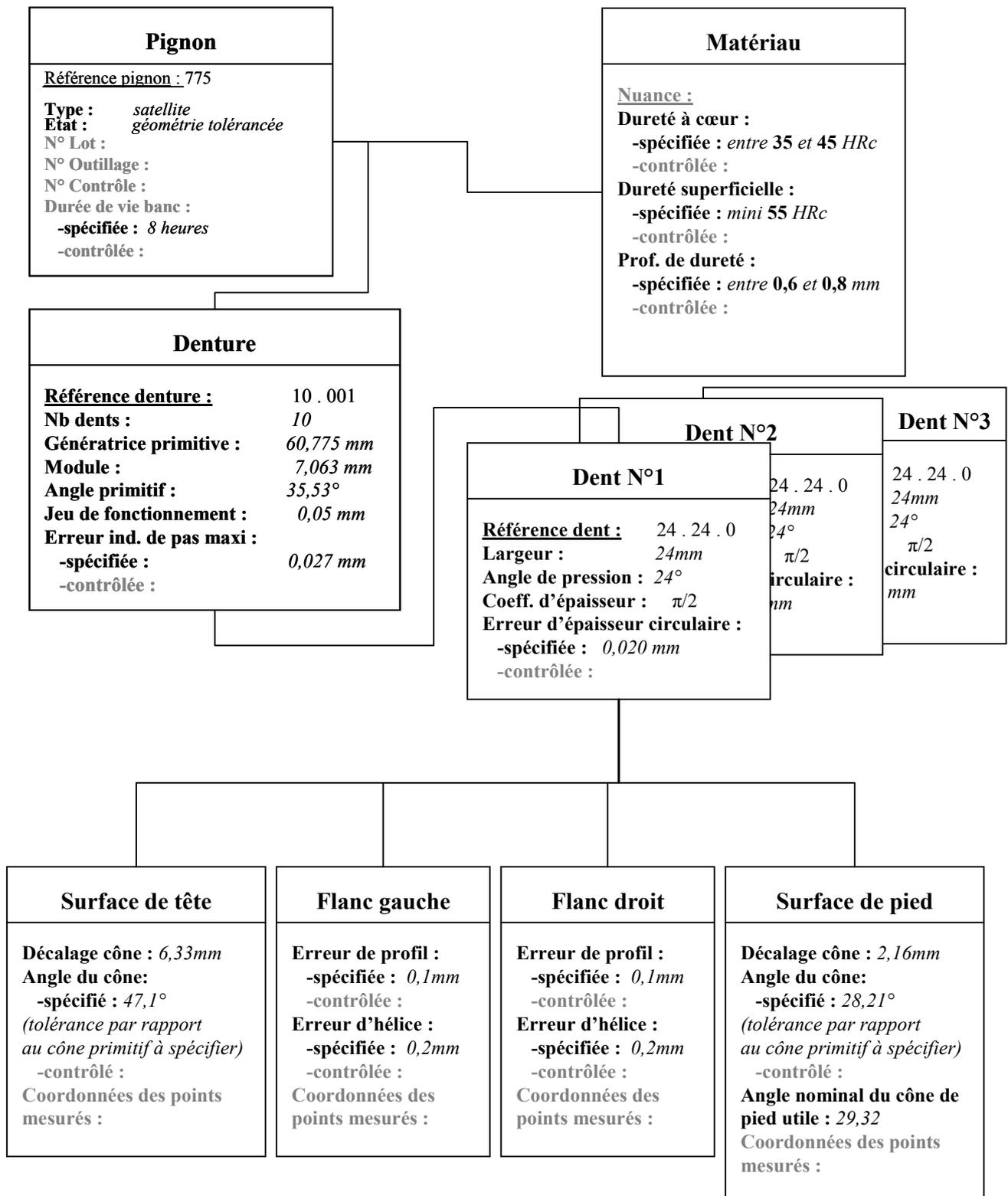


Figure III.3.4-3 : modélisation partielle du pignon (ici : une instance à l'état *géométrie tolérancée*)

(Certaines valeurs numériques sont volontairement non représentatives d'un pignon forgé net shape)

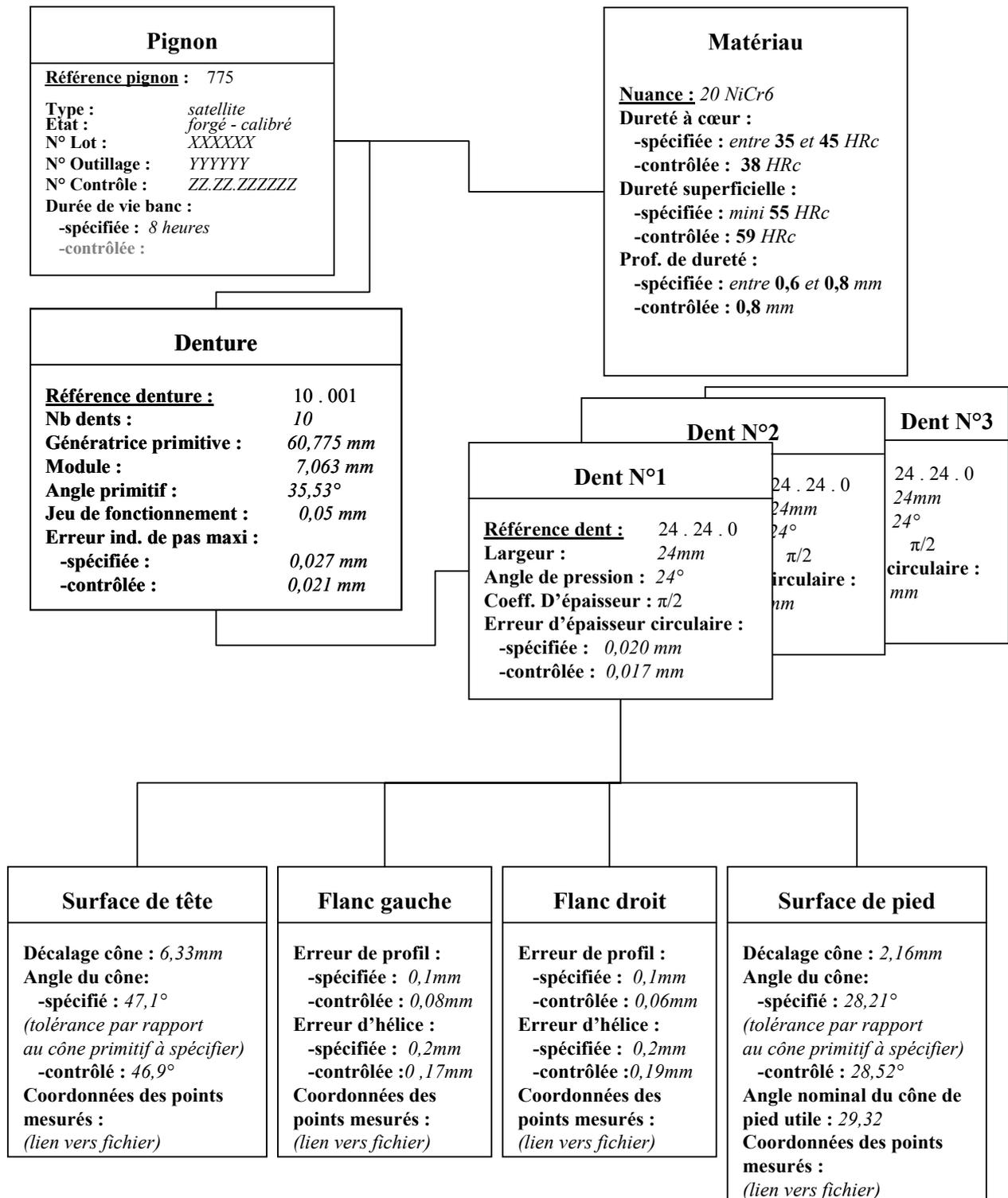


Figure III.3.4-4 : modélisation partielle du pignon (ici : une instance à l'état *forgé – calibré et contrôlé en métrologie*

(Certaines valeurs numériques sont volontairement non représentatives d'un pignon forgé net shape)

III.3.4.b Mise en œuvre des entités

Lorsque le travail d'identification des données, informations et connaissances technologiques pertinentes a été réalisé et formalisé, grâce à la notion d'entité, il est alors possible d'intégrer l'ensemble dans un système de gestion des données techniques (SGDT) afin de proposer à chaque acteur du cycle de vie du produit une aide efficace et mise à jour.

Voici un exemple de choix technologique qui peut être remis en cause de manière « automatique » par la mise à jour des données dans le SGDT et la consultation du modèle produit :

L'épaisseur de tête de dent minimale pour le forgeage à froid d'un pignon est, par hypothèse, de 5 mm pour des raisons d'usure des matrices. Si l'on forge à mi-chaud cette épaisseur minimale passe, par hypothèse, à 3 mm, la contrainte première étant dans ce cas le diamètre de la plus petite fraise disponible pour l'usinage des matrices. Si la technologie évolue, par exemple ici la possibilité d'utiliser une fraise de diamètre 1,5 mm, la mise à jour dans la base SGDT suffira à informer l'ensemble des acteurs de la possibilité de concevoir et fabriquer des pignons avec des épaisseurs de dent inférieures à 3 mm en forgeage à mi chaud. On voit donc bien sur cet exemple que cela n'est possible qu'avec une connaissance des raisons des choix technologiques, c'est à dire qu'il faut développer des compétences en lien avec les procédés de mise en œuvre [HOFpp].

III.3.5 Illustration du processus de conception et fabrication sur un exemple d'information

Le nombre d'informations associé à la conception et la fabrication d'un pignon forgé étant très important, nous avons choisi un exemple d'information pour lequel nous allons décrire les évolutions entre le cahier des charges et jusqu'au contrôle du pignon fabriqué (figure III.3.3-1).

Nous prenons l'exemple de l'épaisseur circulaire d'une dent de pignon conique. Celle-ci est représentée sur la figure III.3.5-1 et pour une géométrie théorique parfaite est identique pour toutes les dents.

Au niveau du cahier des charges, cette épaisseur sera sensible surtout à deux des quatre données du cahier des charges qui sont le couple appliqué sur le pignon concerné et l'encombrement disponible (imposant essentiellement le diamètre primitif des pignons).

A partir du choix de l'architecture du différentiel (concernant ici surtout le nombre de satellites qui peut couramment être de deux, trois ou quatre) les méthodes de dimensionnement d'engrenages vont permettre de préciser l'épaisseur circulaire minimale nécessaire (activité A11 « pré-dimensionner les pignons du différentiel » figure III.3.2.d-1). A cela se rajoute les caractéristiques matériau (traduits ici en une contrainte limite en rupture pied de dent et en pression superficielle) qui sont considérées comme un des résultats des méthodes de dimensionnement mais qui sont bien sûr à comparer avec les caractéristiques des matériaux existants d'une part et disponibles à un coût maîtrisable d'autre part. L'activité A11 figure III.3.2.d-1 consiste également à définir une partie de la géométrie des pignons afin de vérifier le plus tôt possible dans le cycle si les épaisseurs minimales en sommet des dents seront compatibles avec le forgeage.

Lorsque l'ensemble des éléments du différentiel a été pré-dimensionné l'activité A12 figure III.3.2.d-1 « Définir la géométrie nominale complète des pignons » permet de modéliser les pignons conçus en définissant notamment les renforts, les surfaces de raccordement entre dents et les divers arrondis afin d'intégrer les potentialités ainsi que les contraintes du forgeage. La mise en place d'un bombé sur le flanc des dents et d'un jeu de fonctionnement de l'engrenage se fait également à ce niveau et modifie légèrement l'épaisseur circulaire.

Cette définition complète de la géométrie permet alors d'effectuer l'activité A13 « Vérifier la qualité d'engrènement nominale » afin de vérifier qu'aucune erreur de définition géométrique n'a été commise et l'activité A14 « Calculer les dents en éléments finis » afin d'affiner le pré-dimensionnement mécanique en particulier de cette épaisseur circulaire en tenant compte de la géométrie complète.

Au niveau de l'activité A2 « Définir les gammes et méthodes de fabrication » (figure III.3.3-1) l'épaisseur circulaire va conditionner la gamme de forgeage puisqu'elle détermine l'épaisseur de tête qui est l'épaisseur la plus faible de la dent et donc la plus contraignante du point de vue remplissage de la matrice en forgeage. Une diminution de cette épaisseur de tête se traduit par une augmentation des contraintes sur les matrices.

Le choix de l'épaisseur circulaire concerne deux aspects : l'aspect « caractéristiques matériaux » et l'aspect « contraintes de forgeage ». Il est donc important que le concepteur puisse justifier le choix de la valeur finale afin de connaître l'aspect le plus contraignant, pour pouvoir ultérieurement adapter le choix dans le cas d'évolutions futures de ces aspects.

Lorsque le pignon est à l'état fabriqué, après l'activité A3 (figure III.3.3-1), l'épaisseur circulaire est variable d'une dent à l'autre du pignon. Ceci engendre en particulier des erreurs de pas du pignon qui influent sur la qualité d'engrènement et sur les efforts sur certaines dents en fonctionnement. Il est donc nécessaire de contrôler cette erreur de pas au niveau des contrôles spécifiques (activité A4 figure III.3.3-1). Il est important de contrôler les pignons en métrologie et en engrènement avant de les faire fonctionner sur le banc d'essai de fatigue afin de connaître l'influence des variations d'épaisseur circulaire sur la tenue en fatigue par exemple. Les activités d'expertise des résultats et d'amélioration de la connaissance du produit au niveau de A5, doivent ensuite permettre de tenir compte de ces aspects de pertinence des choix de conception associés au choix des méthodes de contrôle dans la conception des prochaines variantes de pignons de différentiel.

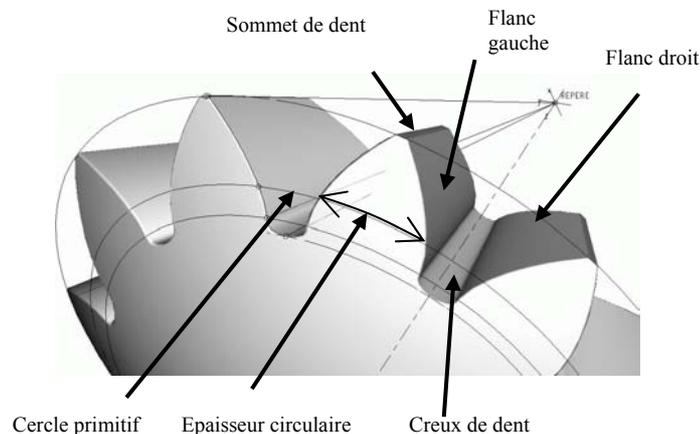


Figure III.3.5-1 : éléments de géométrie de pignon conique droit

IV Conclusions et perspectives

Dans le premier tome nous avons tout d'abord montré, à travers l'exemple de l'évolution des différentiels vers des produits forgés net shape, que les potentialités offertes par les procédés de mise en forme ne sont pas suffisamment exploitées aujourd'hui. La principale raison est le manque d'intégration des connaissances de fabrication dans la conception. Dans le cadre des évolutions des relations entre les grands donneurs d'ordre et leurs fournisseurs, l'activité de conception est de plus en plus demandée au fournisseur qui devient partenaire. Ceci offre d'intéressantes perspectives d'intégration à condition que le partenaire se donne les moyens d'acquérir les compétences nécessaires, qui ne font en général pas partie de son métier initial. Ces constatations nous ont conduit à mettre en place une approche de conception intégrée recouvrant les activités de conception, de fabrication et de contrôle de la fonctionnalité des produits. Cette approche se veut inductive car, selon nous, il est indispensable de baser ces travaux sur l'application afin de prendre en compte toutes ses spécificités. L'approche décrite dans ce tome peut être résumée en trois phases principales :

- Analyse des activités existantes,
- Identification et acquisition des connaissances et des compétences complémentaires nécessaires à l'amélioration des produits,
- Structuration et capitalisation des connaissances.

L'application de l'approche aux pignons forgés de différentiel nous a permis de proposer une géométrie d'engrenage originale et propre aux engrenages forgés. Nous avons également mis en évidence par cette approche la nécessité de développer un dimensionnement mécanique particulier. Nous avons ainsi montré que la conception en mise en forme doit intégrer le dimensionnement géométrique et mécanique.

Le tome 2 présente les expertises que nous avons conduites afin d'obtenir les connaissances complémentaires nécessaires pour l'amélioration de la conception des pignons coniques.

La détermination de certaines informations et connaissances nécessite de lever des verrous technologiques. Nous avons détaillé dans le tome 2 notre approche scientifique, appliquée à la conception des pignons forgés de différentiel, permettant de lever un certain nombre de ces verrous.

Nous avons effectué une expertise de différentiels existants afin d'obtenir des indicateurs de pré-dimensionnement mécanique pour une tenue en fatigue à faible nombre de cycles. Nous avons estimé les incertitudes dans la détermination des caractéristiques géométriques des pignons expertisés et avons ainsi constaté que les incertitudes sur les résultats des calculs de dimensionnement sont « raisonnables ».

Nous avons développé un outil de pré-dimensionnement permettant de prendre en compte conjointement les aspects géométriques et mécaniques. Cet outil permet au concepteur de choisir une géométrie, vérifiant la fonctionnalité d'engrènement et compatible avec le forgeage, ainsi que des caractéristiques matériau. Les calculs associés sont basés sur les théories existantes comportant des limites que nous avons mises en évidence. Ce pré-dimensionnement mécanique peut encore être affiné par des expériences complémentaires d'endurance de pignons. D'autres types d'essais, concernant la caractérisation mécanique des matériaux, permettraient d'améliorer la qualité des prédictions sur les durées de vie en fatigue à faibles nombres de cycle. Ces essais restent à définir.

Nous avons déterminé une nouvelle géométrie de pignon permettant d'intégrer les améliorations apportées par le procédé de forgeage net shape. Nous avons quantifié ces améliorations par des essais expérimentaux d'une part et par des simulations numériques par éléments finis d'autre part. Les résultats des simulations numériques peuvent être intégrés dans l'amélioration de la conception des produits au même titre que des essais expérimentaux.

Compte tenu des niveaux de chargement très élevés modélisés et des variations des propriétés du matériau à l'intérieur des pièces, les résultats de ces simulations ne sont valables que pour des comparaisons entre différentes géométries. Des simulations complémentaires sur un plus grand nombre de géométries sont nécessaires afin d'en tirer des conclusions pour le dimensionnement des pignons.

Nous présentons sur la figure VI.4-1 le modèle CAO d'un engrenage intégrant dans sa conception les connaissances de fabrication. Sa géométrie (nombre de dents, épaisseurs minimales des dents, ...) a été déterminée afin d'être compatible avec le processus de forgeage envisagé et afin d'obtenir une tenue en service optimale par rapport aux contraintes d'encombrement et de couple appliqué. La géométrie des pignons intègre les potentialités du procédé de forgeage au niveau des surfaces actives des dents d'une part et au niveau des renforts d'autre part. Ces renforts permettent de rigidifier les dents vis-à-vis de la flexion en fonctionnement sous charge et sont impossibles à obtenir en taillage de pignons de grande série.

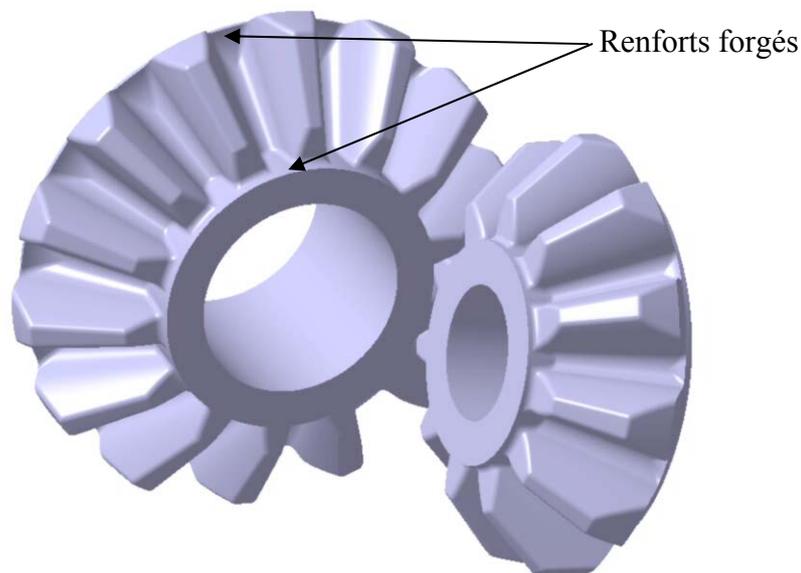


Figure VI.4-1 : modèle CAO d'un engrenage forgé

La partie V du tome 2 présente les premiers résultats obtenus par la mise en place de notre démarche sur des cas industriels étudiés avec notre partenaire.

Nous avons tout d'abord réalisé des nouveaux pignons « master » (usinés avec une qualité ISO 5) avec une géométrie basée sur des pignons existants mais avec des surfaces actives de denture spécifiques développées dans le cadre de nos travaux. Ces nouveaux « master » ainsi que les originaux ont été ensuite contrôlés sur une machine d'essai d'engrènement. Nous avons ainsi constaté que la qualité d'engrènement a été nettement améliorée aussi bien du point de vue de la localisation de la tache de contact que du point de vue de la diminution des erreurs d'engrènement.

La démarche de conception que nous avons mise en place a été appliquée sur deux cas de conception complète de différentiel :

- Un cas pour lequel le cahier des charges spécifie, en plus de la tenue en fatigue, une tenue au choc avec un couple d'entrée sur la couronne du différentiel quasiment deux fois plus élevé que le couple en fatigue sur banc d'essai.

- Un cas avec un cahier des charges plus « classique » imposant une tenue en fatigue sur banc d'essai avec un couple et un encombrement imposés.

Les outils que nous avons développés ont été utilisés industriellement afin de concevoir ces deux nouveaux différentiels. Les résultats au niveau de la géométrie ont été très positifs. Nos résultats de conception ont également mis en évidence l'intérêt, pour notre partenaire industriel, de développer une gamme dite à « mi-chaud » pour le forgeage des deux nouveaux différentiels évoqués. Les résultats des tests de fatigue et de résistance au « choc » des premiers prototypes forgés devraient permettre de valider l'ensemble de notre démarche.

Il serait intéressant d'intégrer ces outils et les informations associées au niveau industriel dans un système informatique de gestion du cycle de vie de produit (PLM : Product Lifecycle Management) afin notamment de faciliter la collaboration entre les différents acteurs et la mise à jour des informations relatives aux produits, aux processus et aux ressources.

Les travaux que nous avons effectués au niveau des contrôles de fonctionnalité doivent permettre de redéfinir le tolérancement géométrique des pièces afin de le rendre plus cohérent par rapport à la fonctionnalité du produit. Le développement et l'utilisation des contrôles d'erreur d'engrènement permettront également de déterminer les variations géométriques créées par les différentes étapes de fabrication des pièces comme par exemple le retour élastique des matrices lors du forgeage ou les déformations dues au traitement thermique. L'objectif visé est d'anticiper ces variations au niveau de la conception afin d'améliorer la géométrie des pièces fabriquées.

Une autre perspective importante est d'intégrer le plus tôt possible dans la conception l'aspect coût afin notamment de permettre à l'industriel de répondre rapidement et au plus juste aux consultations des constructeurs automobiles. Les coûts peuvent concerner le choix des nuances de matériaux (éléments d'addition des alliages d'acier), le poids de matière des pièces conçues, le choix des gammes de fabrication, etc. Ces différents paramètres n'étant pas indépendants du point de vue conception, cela augmente la difficulté de détermination de ces coûts.

Références bibliographiques

- [ALT97] T. Altan and V. Vazquez, "Status of process simulation using 2D and 3D finite element method. What is practical today? What can we expect in the future ?", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 71, pp. 49-63, 1997.
- [ALT01] T. Altan and B. Lilly, "Manufacturing of dies and molds," *Annals of the CIRP*, vol. 50, pp. 1-24, 2001.
- [BAL96] T. Balan, "Optimisation de forme des outils de forgeage par methode inverse," *Thèse, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris*, 1996.
- [BAU01] Baudouin, C., Leleu, S., Bigot, R., David, J. M., "De la pièce au produit. Exemple du contrôle dimensionnel des erreurs de pas d'un pignon forgé," *Téme Colloque sur la Conception Mécanique Intégrée, PRIMECA, La Plagne* pp 379-387, 2001, 2-4 avril.
- [BAU01a] Baudouin, C., Leleu, S., Coorevits, T., Bigot, R., "Characterisation of measurement uncertainties for gears measured on coordinate measuring machine," *10th international metrology congress, Saint Louis France*, **202**, pp 155, 2001, 22-25 octobre.
- [BAUpp] C. Baudouin, R. Bigot, S. Leleu, N. Muller, and P. Martin, "Gear geometric control software : approach by entities," *CIRP Journal of Manufacturing Systems*, in press.
- [BEL94] P. Belloy, « intégration de connaissances métiers dans la conception : un modèle pour les pièces mécaniques. Application à l'usinage et à l'estampage », thèse de l'université Joseph Fourier de Grenoble, 1994.
- [BER00] A. Bernard, "Modèles et approches pour la conception et la fabrication intégrées," *Journal européen des systèmes automatisés*, vol. 24, pp. 163-193, 2000.
- [BER03] L. BERVILLER, R. BIGOT, P. MARTIN. " Contribution à la mise en place de la traçabilité technologique. Illustration dans le cadre du processus de conception et fabrication de pignons forgés de différentiel.", 8ème Colloque sur la Conception Mécanique Intégrée, PRIMECA, La Plagne, 11 pages, 31 mars - 2 avril 2003.
- [BIG03] R. Bigot, P. Martin, and S. Leleu, "A contribution for technological data estimation for concurrent engineering using geometrical control of net shape forming parts," *IMEchE, Journal of Engineering Manufacture*, vol. 217, pp. 661-667, 2003
- [BLA96] E. Blanco, A. Jeantet, and J. F. Boujut, "COPEST de la construction à l'usage et vice-versa," *Design Sciences and Technology*, vol. 5, pp. 93-118, 1996.
- [BOU88] J. F. Boujut, "Un exemple d'intégration des fonctions métier dans le systèmes de CAO : La conception de pièces forgées tridimensionnelles," *Thèse, INPG Grenoble*, 1988.
- [BOU96] M. Bouaziz, « Contribution au contrôle des engrenages sur machine à mesurer tridimensionnelle », *Thèse de Doctorat d'Etat. Ecole Nationale Polytechnique d'Algérie*, 1996.

- [BRU05] J. Bruyère, «Transmission de puissance entre deux axes réputés orthogonaux», Thèse de Doctorat de l' ENSAM, CER de Metz, soutenance prévue en décembre 2005.
- [BRU05a] J. Buyère, L. Berviller « Géométrie des engrenages coniques », Document de formation interne pour Ascoforge Safe, SERAM, 2005.
- [CAP98] A. Caporalli, L. A. Gileno, and S. T. Button, "Expert system for hot forging design," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 80-81, pp. 131-135, 1998.
- [CHA64] A. Chamouard, "Statique appliquée aux déformations à chaud," *Estampage et Forge, Tome 1, Ed. DUNOD*, 1964.
- [CHA66] A. Chamouard, "Dynamique appliquées aux déformations à chaud par forgeage, filage et matriçage," *Estampage et Forge, Tome 2, Ed. DUNOD*, 1966.
- [CHA70] A. Chamouard, "Technologie générale de l'estampage," *Estampage et Forge, Tome 3, Ed. DUNOD*, 1970.
- [CHE02] J. L. Chenot and L. Fourment, "Numerical modelling of the forging process in industry," 17th International Forging Congress, Cologne / Dusseldorf pp 57-68, 2002, June 6-12.
- [CHI94] G. Chiarmetta and L. Zanardi, "Production of structural components by thixoforming aluminium alloys," Proceeding of the 3rd international conference on semi-solid processing of alloys and composites, pp. 235-244, 1994.
- [CHI96] G. Chiarmetta, "Thixoforming of automobile components," Proceeding of the 4th international conference on semi-solid processing of alloys and composites, Sheffield, pp. 204-207, 1996.
- [COL93] G. J. Colquhoun, R. W. Baines, and R. Crossley, "A state of the art review of IDEFØ," *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 6, pp. 252-264, 1993.
- [COP02] C. Coppens, "Les outils KBE : une approche chez PSA Peugeot Citroën", 4th *International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, IDMME 2002*, Clermont Ferrand, France, May 14-16 2002.
- [COR03] J.P. Cordebois *et coll.*, « Fabrication par usinage », Industrie et technologies, Editions DUNOD, 2003.
- [DAN03] J.Y. Datan, J. Bruyère, R. Bigot, P. Martin, « Functional tolerancing of gear with Virtual Boundary Requirement », 3rd *International Conference on Integrated Design and Production*, CPI 2003, Meknes, Maroc, pp 58-4, 22-24 octobre 2003.
- [DEA00] Dean, T. A., "The net-shape forming of gears," *Materials & Design*, vol. 21, pp. 271-278, 2000.
- [DEG93] P. Degoul, « Le pouvoir de l'information avancée face au règne de la complexité », *Annales des mines*, Avril 1993

- [DOE92] E. Doege, K. H. Schomaker, and T. Brendel, "Sensors and diagnostic systems in forming machines," *Annals of the CIRP*, vol. 41, pp. 323-326, 1992.
- [DOE94] E. Doege and H. Nägele, "FE simulation of the precision forging process of bevel Gears," *Annals of the CIRP*, vol. 43, pp. 241-244, 1994.
- [DOE97] E. Doege and B.-A. Behrens, "Reduce process chains due to the precision forging of gears-effect on the conventional forging technology," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 71, pp. 14-17, 1997.
- [DOE98] E. Doege and B. Buchholz, "Computer aides draft of operational sequences for hot die forging," *Production Engineering*, vol. V, pp. 123-128, 1998.
- [DOE99] E. Doege and B. A. Behrens, "Developpement of an automated precision forging process with integrated quality assurance," *Production Engineering*, vol. VI, pp. 47-50, 1999.
- [DOE99a] E. Doege, M. Muckelbauer, and M. Michael, "Product development support for suppliers of forgings," *Annals of the CIRP*, vol. 48, pp. 171-174, 1999.
- [DOE00] E. Doege and R. Bohnsack, "Experimental studies on a precession forging process of gears," *Production Engineering*, vol. VII/I, pp. 17-20, 2000.
- [DOE00a] E. Doege and R. Bohnsack, "Closed die technologies for hot forging," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 98, pp. 165-170, 2000.
- [DOU00] R. Douglas and D. Kuhlmann, "Guidelines for precision hot forging with applications," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 98, pp. 182-188, 2000.
- [ESC96] S.K. Esche, S. Khamitkar, G.L. Kinzel , T Altan, « Process and die design for multi-step forming of round parts from sheet metal », *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 59, pp. 24-33, 1996.
- [ESN93] F. Esnault, "Construction mécanique, transmission de puissance, principes", *Editions DUNOD*, 1993.
- [EYN99] B. Eynard, "Modélisation du produit et des activités de conception; Contribution à la conduite et à la traçabilité du processus d'ingénierie", Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux, France, 1999.
- [FAL00] P. Fallböhrmer, C. A. Rodriguez, T. Özel, and T. Altan, "High-speed machining of cast iron and alloy steels for die and mold manufacturing," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 98, pp. 104-115, 2000.
- [FOU95] L. Fourment, T. Balan, and J. L. Chenot, "shape optimization for the forging process," *4th international conference on computational plasticity*, Barcelone, Spain pp 1369-1381, 1995, April 3-6.

- [FOU96] L. Fourment, T. Balan, and J. L. Chenot, "Optimal design for non-steady-state metal forming processes. II : application of shape optimization in forging," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 39, pp. 51-65, 1996.
- [FOU01] L. Fourment, T. Balan, and J. L. Chenot, "Optimal design techniques in non-steady-state metal forming processes," in *Computer-aided design, engineering, and manufacturing systems techniques and applications. Manufacturing systems processes*, VI, Ed. by C. Leondes. Published by CRC Press, London, New York, 2001, pp. 5.1-5.54.
- [GAM90] Groupe Gama, « *La gamme automatique en usinage* », Editions Hermès, 1990.
- [GAR99] M. Gardoni, "Maîtrise de l'information non structurée et capitalisation de savoir et savoir-faire en ingénierie intégrée. Cas d'étude Aéronautique," Université de Metz, France, 1999.
- [GRO00] J. Groenbaek and T. Birker, "Innovations in cold forging die design," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 98, pp. 155-161, 2000.
- [HEN99] G. Henriot, « Engrenages, conception, fabrication, mise en œuvre », Editions DUNOD, 1999, ISBN 2 10 003903 2.
- [HER 87] Hertz « Le mémoire de Hertz » (traduction en français de l'original) Publication scientifique et technique N°20 – ENSAM, 1987.
- [HOFpp] C. Hofmann and S. Orr, "Advanced manufacturing technology adoption - the German experience", *Technovation*, in press.
- [HOH02] B.-R. Höhn, « Modern Gear Calculation », International Conference on Gears, München, March 2002, VDI-Berichte, ISBN 3-18-091665-6.
- [JIR00] S. Jiratharanat, V. Vazquez, C. A. Rodriguez, and T. Altan, "Virtual processing - application of rapid prototyping for visualization of metal forming processes," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 98, pp. 116-124, 2000.
- [JOA02] F. Joachim, N. Kurtz, B. Glatthaar, « Influence of coatings and surface improvements on the lifetime of gears », International Conference on Gears, München, March 2002, VDI-Berichte, ISBN 3-18-091665-6
- [KIM92] H. Kim, T. Altan, and K. Sevenler, "Computer-aided part and processing-sequence design in cold forging," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 33, pp. 57-74, 1992.
- [KIM96] H. Kim and Altan, "Cold forging of steel - practical examples of computerized part and process design," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 59, pp. 122-131, 1996.
- [LAB03] M. Labrousse, A. Bernard, and P. Véron, "Modèle FBS enrichi pour la modélisation du processus d'entreprise," 3rd International Conference Integrated Design and Production, CPI 2003, Meknes, Maroc, **165**, pp 2003, October 22-24.

- [LAB04] M. Labrousse, « Proposition d'un modèle conceptuel unifié pour la gestion dynamique des connaissances d'entreprises », Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes et Université de Nantes, 2004
- [LAC67] K. Lacy, "Hot forged gears to fine tolerances," *Metalworking production*, 1967.
- [LAN04] L. Langlois, R. Bigot, S. Ettaqi, and D. Bonin, "Bi-Material die manufactured from a Bi-Material Sheet obtained by Explosion Cladding," 2nd International Conference on Tribology in Manufacturing Processes, Nyborg, Denmark pp 2004, June 16-18.
- [LAU00] P. Laureillard, « Conception intégrée dans l'usage, mise en œuvre d'un dispositif d'intégration produit-process dans une filière de conception de pièces forgées », Thèse de Doctorat de l'INPG, Grenoble, 2000
- [MAM96] A. G. Mamalis, D. E. Manolakos, and A. K. Baldoukas, "Simulation of the precision forging of bevel gears using implicit and explicit FE techniques," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 57, pp. 164-171, 1996
- [MAR94] P. Marin, J. F. Boujut, and S. Tichkiewitch, "Fast simulation system for axisymmetrical stamped-parts deformation," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 45, pp. 43-50, 1994.
- [MAR96] P. Marin and S. Tichkiewitch, "Forgerond, un nouvel outil pour la simulation rapide en estampage," *Revue de CFAO et d'informatique graphique*, vol. 11, pp. 165-184, 1996.
- [MAY92] R.J. Mayer, T.P. Cullinane, P.S. DeWitte, W.B. Knappenberger, B. Perakath, M.S. Wells, IDEF3 process description capture Method, *Information Integration for Concurrent Engineering – Compendium Methods Report*, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, USA, 1992
- [MIC01] H. Michaud, « Méthode de caractérisation de contraintes résiduelles par diffraction X appliquée aux pièces forgées », *Bulletin La Forge n°6*, 2001.
- [NIE89] G. Niemann, H. Winter, « Maschinenelemente, Band 3 » Springer-Verlag 1989
- [PAN02] P. Panjan, I. Urankar, B. Navinsek, M. Tercelj, R. Turk, M. Cekada, and V. Leskovsek, "Improvement of hot forging tools with duplex treatment," *Surface and Coatings Technology*, vol. 151-152, pp. 505-509, 2002.
- [PUN85] L. Pun, Systèmes industriels d'intelligence artificielle : outils de productique, Editest ed, 2eme Edition, Paris, 1985.
- [REI03] S. Reinsch, B. Mussig, B. Schmidt, and K. Tracht, "Advanced manufacturing system for forging products," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 138, pp. 16-21, 2003.
- [ROB03] M. Robelet, « Veille technologique automobile », n° 2004-033, Document interne ASCOMETAL, 2003.

- [SAI01] H. Saiki, Y. Marumo, A. Minami, and T. Sono, "Effect of the surface structure on the resistance to plastic deformation of a hot forging tool," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 113, pp. 22-27, 2001.
- [SAU97] A. Saucier, "Un modèle multivues du produit pour le développement et l'utilisation de systèmes d'aide à la conception en ingénierie mécanique", Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure de Cachan, France, 1997.
- [SHA94] J.J. Shah, Y. Shen, A. Shirur, « Determination of machining volumes from extensible sets of design features », *Advances in Feature Based Manufacturing*, Chapter 7, pp 129-157, J.J. Shah, M. Mäntylä and D.S. Nau editors, Elsevier Science publisher, 1994.
- [SLA02] W. Slagter and M. Winter, "Simulation - Partnership Solutions," 17th International Forging Congress, Cologne / Dusseldorf pp 45-56, 2002, June 6-12.
- [SPE72] D. B. Spencer, R. Mehrabian, and M. C. Flemings, "Rheological behavior of Sn-15 pct Pb in the crystallization range," *Metallurgical Transactions*, vol. 3, pp. 1925-1932, 1972.
- [TET99] R. Teti, A. Langella, and D. D'addona, "An intelligent computation approach to process planning in multiple-step cold forging," *Annals of the CIRP*, vol. 48, pp. 175-178, 1999.
- [TIC92] S. Tichkiewitch and J. F. Boujut, "Designing to avoid potential defects : Simulation of the temperature effect on closing pressure during stamping," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 32, pp. 399-406, 1992.
- [TIC96] S. Tichkiewitch, « Specifications on integrated design methodology using a multi-view product model », PD-Vol. 80, ESDA Proceedings of the 1996 Engineering Design and Analysis Conference, editors : B. A. Ovunc, S. Tichkiewitch and A.C. Anakara, Book n°G00998, 1996.
- [TIC97] S. Tichkiewitch, M. Véron, « Methodology and Product Model for Integrated Design Using a Multiview System », *Annals of the CIRP Vol. 46/1/1997*.
- [TIC98] S. Tichkiewitch, M. Véron, « Integration of Manufacturing Processes in Design », *Annals of the CIRP Vol. 47/1/1998*.
- [TIC99] S. Tichkiewitch, D. Brissaud, « Divers Aspects of Tolerancing on an Integrated Design Context », *Annals of the CIRP Vol. 48/1/1999*.
- [TOL98] Sous la direction de M. Tollenaere, « *Dynamique et évolution des métiers dans la conception, Conception de produits mécaniques* », Editions Hermès (1998), chapitre 14.
- [VAR95] C. Vargas, "Modélisation du processus de conception en ingénierie des systèmes mécaniques. Mise en oeuvre basée sur la propagation de contraintes. Application à la conception d'une culasse automobile", Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure de Cachan, France, 1995.

[VAZ00] V. Vazquez and T. Altan, "New concepts in die design -- physical and computer modeling applications," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 98, pp. 212-223, 2000.

[VAZ00a] V. Vazquez and T. Altan, "Die design for flashless forging of complex parts", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 98, pp. 81-89, 2000.

[VER96] F. Vernadat, Enterprise modelling and integration : principles and appliaction, Chapman & Hall, London, 1996.

[WRI97] D.H Wright, « General durability testing of gears », Testing Automotive materials and components, ED by Society of automotive engineers (1997).

[XUE99] D. Xue, S. Yadav, and D. H. Norrie, "Knowledge base and database representation for intelligent concurrent design," *Computer-Aided Design*, vol. 31, pp. 131-145, 1999.

[ZHA04] X. Zhang, Y. Peng, and X. Ruan, "A web-based cold forging process generation system," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 145, pp. 1-6, 2004.

CONCEPTION ET FABRICATION INTEGREES DE PRODUITS FORGES

« NET SHAPE » : APPLICATION AUX DIFFERENTIELS FORGES

RESUME :

Les travaux présentés concernent le domaine de la conception intégrée de produits mécaniques en grande série. La démarche de conception - fabrication concerne la reconception de produits dans le but d'en améliorer les performances. Le contexte général de cette étude se situe d'une part en pleine évolution des relations entre donneurs d'ordres et sous traitants dont une conséquence est notamment le transfert de la partie conception vers les sous traitants et d'autre part dans une évolution industrielle du métier de la forge, du secteur automobile en particulier, vers des produits forgés de hautes qualités dimensionnelles type « net shape ». Notre analyse de la conception des pièces en mise en forme montre que les potentialités offertes par les procédés de mise en forme ne sont pas suffisamment exploitées aujourd'hui. La principale raison est le manque d'intégration des connaissances de fabrication dans la conception. Ces constatations nous ont conduit à mettre en place une approche de conception intégrée recouvrant les activités de conception, de fabrication et de contrôle de la fonctionnalité des produits. Cette approche se veut inductive car, selon nous, il est indispensable de baser ces travaux sur l'application afin de prendre en compte toutes ses spécificités. L'approche décrite peut être résumée en trois phases principales : analyse des activités existantes, identification et acquisition des connaissances et des compétences complémentaires nécessaires à l'amélioration des produits, structuration et capitalisation des connaissances.

L'application de l'approche aux pignons forgés de différentiel nous a permis de proposer une géométrie d'engrenage originale et propre aux engrenages forgés. Nous avons également mis en évidence par cette approche, la nécessité de développer un dimensionnement mécanique particulier. Nous avons conduit des expertises, dont les détails sont présentés dans le tome 2 classé confidentiel, afin d'obtenir les connaissances complémentaires nécessaires pour l'amélioration de la conception des pignons coniques. La démarche de conception que nous avons mise en place a été appliquée sur deux cas industriels de conception complète de différentiels. Les résultats d'essais d'engrènement ont permis de quantifier les améliorations obtenues au niveau de la géométrie nominale. Des essais de résistance mécanique sur banc d'essai permettront de valider l'ensemble de notre démarche.

Mots-clés : *conception intégrée, transmission mécanique, forgeage de précision, pignon conique, bancs de tests*

ABSTRACT:

The work showed in this paper concern the integrated design of high series mechanicals products. The aim of this project is to increase products performances. To reach this goal, it is important to understand the context of this study. First of all, relations between the customer and the supplier are moving. The main consequence of this change is the transfer of the design step from the customer to the supplier. Moreover, we can observe an evolution of the forge process with the development of high dimensional quality forged components ("Net Shape") for automotive industry. Our design analyse of forged parts shows the potentialities of those new process are not completely exploited today. The principal reason is the bad integration of manufacture knowledge during the design step. This observation led us to create an integrated design approach including manufacture and product functionality control. This one is intuitive because, we think it is essential to adapt our work to the application. Thus, the method can be summarized in three main steps: the analyse of existing activities, the identification and knowledge acquisition to improve products and to finish, the structuring and the capitalization of those knowledge.

We have applied the approach to differential forged gears. Thanks to this method, we have created an original gear geometry taking in consideration forge process constraints and potentialities. Moreover, we have highlighted the necessity to develop a specific mechanical dimensioning. In parallel, we have realised appraisals (showed in a confidential report) to collect the essential knowledge to optimize the conical gear design.

The method we have created was tested on two industrial project of differential design. Some test results on gear meshing have allowed to quantify the improvement on the nominal geometry. Today, we are making some mechanical resistance tests to end the validation of the method.

Keywords: *integrated design, gear transmission, precision forging, bevel gear, tests beds*

