



Stéphane MAGRON  
Ingénieur Process Forge  
Cetim Grand Est

# Forgeage Multidirectionnel

## Introduction

La recherche de réduction des poids de mise en œuvre des produits forgés a amené les industriels à considérer de nouveaux procédés de forgeage innovants. L'une des solutions proposées est le forgeage multidirectionnel qui consiste à apporter des mouvements transversaux aux outillages durant les opérations de forgeage, ceci dans le but d'obtenir des préformes bien plus complexes et une répartition de volumes bien plus en adéquation avec celle de la pièce forgée. Une autre application possible à ce procédé consisterait à venir mettre en forme des parties de pièce en contredépouilles permettant ainsi un allègement de la pièce finie ou de faciliter les opérations d'usinage.

Les industriels de la commission Forge du Cetim ont ainsi validé le lancement d'une étude sur le forgeage multidirectionnel. Après un premier d'état de l'art de la technologie, mené en 2016, un groupe de travail a été constitué en 2017 dans le but d'avancer sur le développement d'un démonstrateur basé sur un cas industriel.

Afin d'appréhender cette nouvelle technologie et de définir plus précisément le programme d'étude, le groupe a souhaité qu'une première phase d'échange avec IPH (Integrierte Produktion Hannover) soit initiée. En effet, l'institut IPH est un acteur important dans le développement de la technologie de forgeage multidirectionnel qui a débuté ses travaux il y a une dizaine d'années et a pu nous faire bénéficier de leur retour d'expérience au travers d'une journée technique de présentation et d'échanges.

A l'issue de cette première phase dite de « Transfert de technologie » avec IPH, nous avons poursuivi notre démarche tout au long de l'année 2018 par la réalisation d'études de démonstrateurs numériques puis de cas industriels en vue d'aboutir à la réalisation d'un démonstrateur développé sur la plateforme Vulcain de l'ENSAM de Metz.

## Transfert de technologie IPH

Ce transfert de technologie s'est décomposé suivant les 4 parties ci-dessous :

- Présentation des règles de conception et de calculs des volumes
- Approche concrète de la méthode basée sur un cas concret d'étude
- Mode de gestion des défauts
- Retour d'expérience et problèmes rencontrés pendant le forgeage

Ces aspects ont ainsi été abordés par la présentation des projets collaboratifs sur lesquels IPH a mené des travaux. La principale morphologie de pièce étudiée fût le vilebrequin pour le secteur automobile qui se prêtait bien à la démarche de par un forgeage pouvant requérir jusqu'à 5 opérations avec un procédé traditionnelle (figure 1, page suivante).

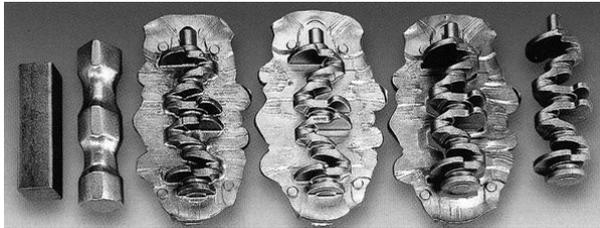


Figure 1 : Gamme de forgeage standard d'un vilebrequin  
Source: Doege, E., Behrens, B.-A., 2010, Handbuch Umformtechnik, 1st ed., Springer Verlag, Berlin ©

L'objectif des différents projets pilotés par IPH étant de viser un forgeage sans bavure, là où une gamme standard peut avoisiner jusqu'à 35 % de bavure pour obtenir la pièce finie.

La technologie employée par IPH pour forger dans plusieurs directions consiste à renvoyer l'effort vertical de la presse par l'intermédiaire de coins comme nous pouvons le voir sur le schéma de principe de la figure 2.

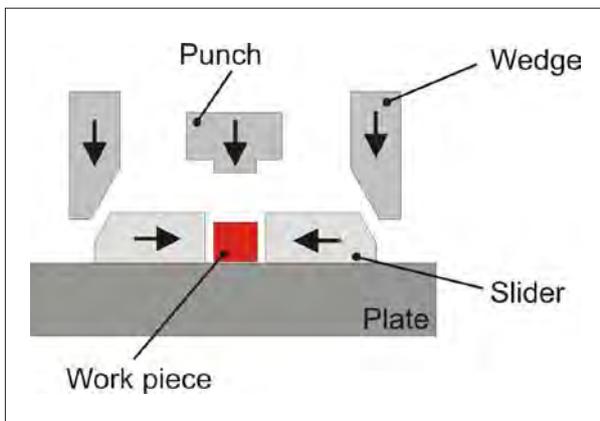


Figure 2 : Schéma de principe de forgeage multidirectionnel  
Source : IPH

Les principaux avantages de cette technologie étant :

- De renvoyer l'effort vertical de la presse en un effort horizontal qui permettra de venir forger dans un axe à 90°
- De réduire le nombre d'opérations par obtention des préformes plus approchantes de la forme finie
- De réduire la mise au mille par une meilleure répartition des volumes.

Les différents projets menés par IPH leur ont permis de concevoir des outillages permettant l'obtention de préformes aux répartitions de volumes très abouties tel qu'identifiés sur les photographies de la figure 3 caractérisant l'ébauche à chaque étape de la gamme.



Figure 3 : Gamme de forgeage multidirectionnel d'un vilebrequin 2 cylindres  
Source : IPH

L'obtention d'une telle préforme a pu être permise par définition d'une cinématique des outillages mettant en œuvre d'une succession de renvois par coins tout comme nous pouvons le voir sur les figures 4 & 5.

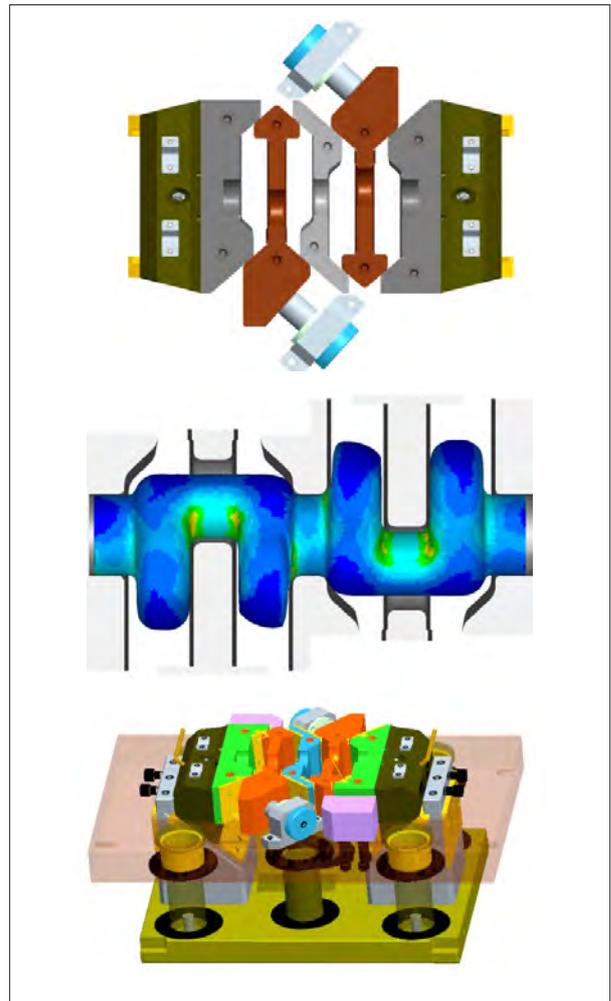


Figure 4 : Schéma de principe de forgeage multidirectionnel  
Source : IPH

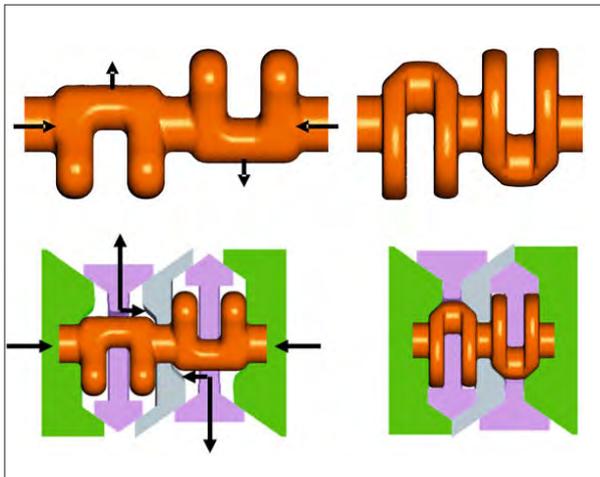


Figure 5 : Cinématique des outils pendant l'opération de forgeage  
Source : IPH

L'objectif d'IPH était bien évidemment de réduire le nombre d'opérations mais surtout d'optimiser le taux de bavure. Les résultats obtenus à l'issue de ces travaux fût une gamme en 4 opérations avec un taux de de l'ordre de 15 %. Malgré tout, leur objectif serait d'atteindre le « 0 » bavures et des actions sont toujours en cours actuellement au sein de l'institut allemand pour atteindre cet objectif mais aussi pour industrialiser la technologie.

Une autre application au forgeage multidirectionnel développée par IPH consiste à obtenir des formes en contredépouilles. Ils ont notamment travaillé sur un cas de piston pour lequel un outillage a pu être mise au point (figure 6).

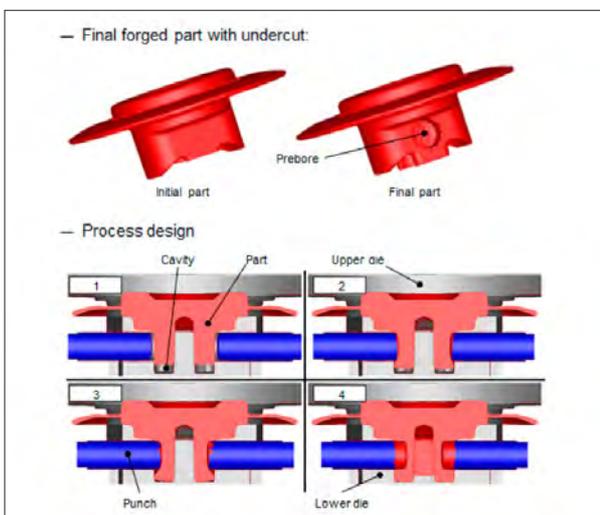


Figure 6 : Gamme de forgeage piston  
Source : IPH

Les présentations d'IPH ainsi que les différents échanges que nous avons pu avoir nous ont permis de bénéficier de leur retour expérience.

Nous pouvons voir ainsi que leur approche a consisté à viser un taux de bavure quasi nul par la mise en œuvre de mouvements multidirectionnels simultanés dont les cinématiques sont très complexes à mettre au point. Elles requerront de ce fait des phases de simulations numériques assez longues complétées par de nombreux essais permettant de valider un outillage également très complexes et pouvant contenir jusqu'à 750 éléments. Nous constaterons également que pour atteindre un niveau de bavure très faible, IPH a développé des gammes avec 4 à 5 opérations successives ayant pour effet d'augmenter considérablement les temps de cycle de production.

En conclusion, de nos échanges avec IPH, le forgeage multidirectionnel est une technologie prometteuse en termes de gain matière, confirmant ainsi la volonté des industriels à avancer vers cette technologie. Toutefois, les cinématiques outillages envisagées pour atteindre un taux de bavure quasi nul ne nous ont pas semblé suffisamment complétives aux vues de la complexité des outillages à mettre en œuvre pour susciter l'intérêt des industriels.

L'approche de l'étude menée par le Cetim a donc consisté à développer une gamme aux cinématiques séquentielles beaucoup plus simples à définir et permettant déjà d'atteindre un taux de bavure de l'ordre de 10 à 15 %, très favorable comparativement à la gamme actuelle.

## Etude de démonstrateurs numériques

Afin d'appréhender les mouvements de matière et envisager les différentes cinématiques outillages possibles, nous avons réalisé une étude préliminaire de démonstrateurs numériques basée sur des formes caractéristiques.

### → Cas d'un déplacement symétrique :

Ce premier cas d'étude avait pour objectif d'appréhender les déplacements de volumes par mise en œuvre de mouvement transversaux apportés grâce des couteaux positionnés en quinconce sur un lopin D.90 X L.400 et chauffé à 1280°C pris entre 2 tas plats tel que représentés sur les vues de la figure 7.

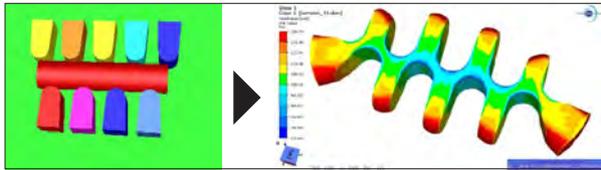


Figure 7 : Vues début et fin de forgeage du cas de déplacement symétrique Source : Cetim

Le déplacement de la matière telle une extrusion latérale initié par cette opération permet répartir les volumes assez précisément et requière un niveau d'effort d'environ 80T par couteau, ce qui serait tout à fait compatible avec les capacités d'une presse industrielle.

### → Cas du vilebrequin :

Très rapidement, le vilebrequin a été retenu dans le cadre de cette étude et il semblait donc intéressant d'intégrer l'étude d'une version simplifiée (figure8) dans ce programme.

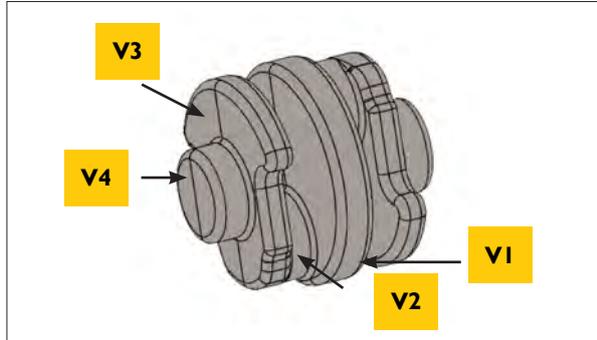


Figure 8 : Modèle du vilebrequin 2 cylindres simplifié Source : Cetim

La décomposition en volumes élémentaires associée à différentes itérations ont permis d'établir une opération de forgeage multidirectionnelle se décomposant en 2 étapes.

La gamme envisagée (figure 9) a consisté à réaliser une première opération de refoulement du lopin en matrice permettant de former les tétons localisés à chaque extrémité (volume V4 de la figure8). Le lopin ainsi obtenu après refoulement sera poinçonné grâce à des couteaux transversaux autorisant une répartition de volume appropriée. Le forgeage de l'ébauche résultant de l'opération de poinçonnage a pu être validé par réalisation de la simulation de matriçage final avec un taux de bavure de 15 %.

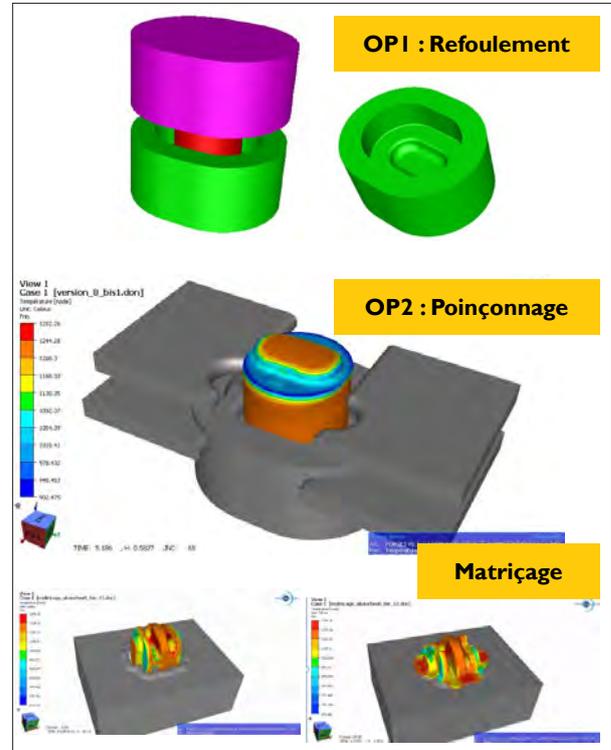


Figure 9 : Vue début et fin de forgeage du vilebrequin « simplifié » Source : Cetim

### Cas industriels :

Tout comme déjà évoqué, le vilebrequin est une typologie de pièce très propice au forgeage de multidirectionnel. La poursuite des travaux fût donc axée l'étude d'un vilebrequin 2 cylindres pour lequel la gamme de forgeage mais aussi l'outillage permettant d'assurer la cinématique imaginée ont été développé à partir de la pré-étude du cas numérique de vilebrequin simplifié vu précédemment.

L'objectif de ces étapes de l'étude fût d'appréhender les aspects ci-après :

- Gamme de forgeage & cinématique outillage (nombre opération, courses, direction de forgeage)
- Complexité des outillages (nombre d'éléments, encombrement)
- Aspects thermiques en fonction de l'échelle retenue
- Définition de besoins machine pour assurer le forgeage

Dans cette version industrielle, la pièce présente toutefois des différences de géométries significatives impactant la gamme de forgeage générale tout comme identifié sur la figure 10, page suivante.

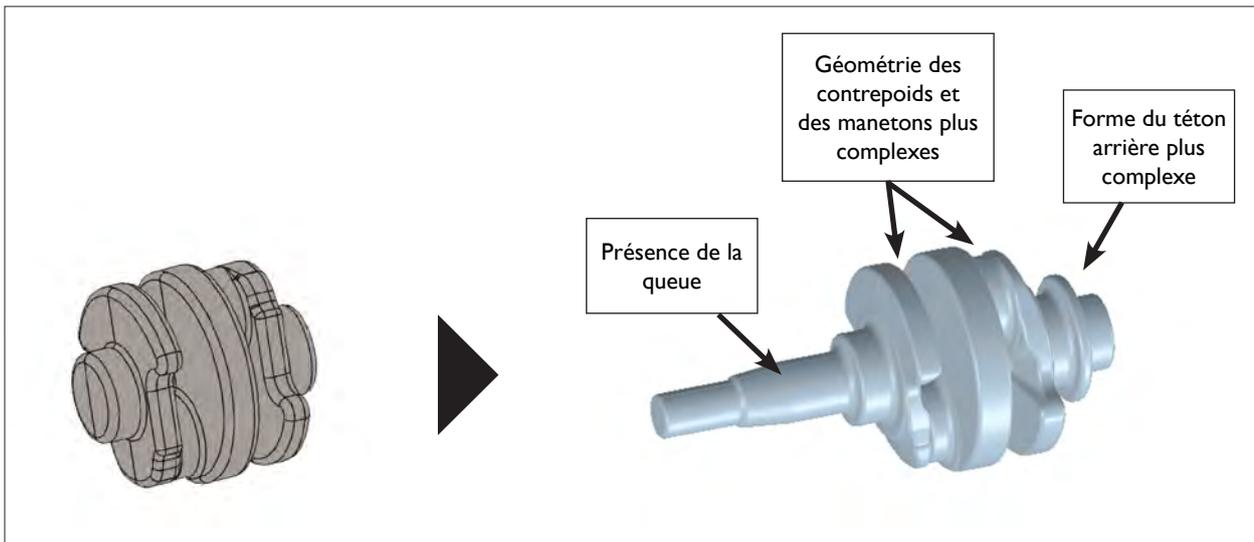


Figure 10 :Vues comparatives entre le Cas industriel et sa version simplifiée Source : Cetim / Forges de Courcelles

Afin de rester cohérents vis-à-vis des contraintes industrielles et ce notamment en termes de capacités machine et de dimensions de table, nous nous sommes basés sur les capacités que l'on retrouve typiquement dans l'industrie.

A ce jour, les gammes de forgeage de ce type de pièce prévoient trois opérations soit :

- Répartition
- Forgeage Ebauche
- Forgeage Finition

Dans le cadre d'une préforme réalisée par forgeage multidirectionnel, l'opération de forgeage finition subsisterait en l'état, laissant l'encombrement occupé par les 2 premières opérations pour positionner le ou les outillages multiaxes tel que schématisé sur le figure 11.

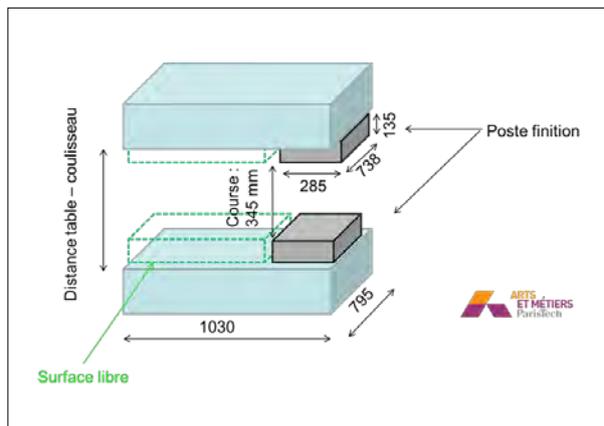


Figure 11 : Schématisation de l'encombrement machine : Source : ENSAM Metz (AM-Valor)

Aux vues de la complexité de la préforme à obtenir pour garantir une bonne répartition des volumes et en se basant sur le retour d'expérience d'IPH, le forgeage de cette pièce a été envisagé en 3 opérations tel que détaillé sur la figure 12.

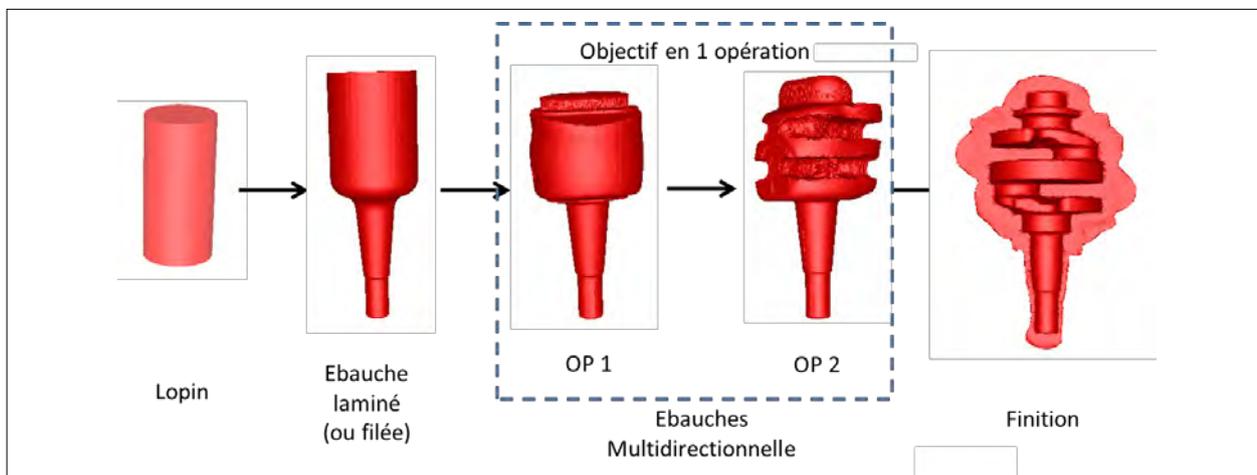


Figure 12 : Gamme de forgeage du cas industriel Source : Cetim

En effet, la queue présente sur la pièce ne pourra être obtenue au moment de l'opération de forgeage multidirectionnel mais par réalisation d'une opération de préparation préalable.

La cinématique générale retenue pour l'étape de forgeage multidirectionnelle s'articule toujours autour des 2 mêmes opérations soit :

- Refoulement
- Poinçonnage

Nos travaux de simulations nous ont conduits à une géométrie d'ébauche permettant de garantir un bon positionnement en matrice et un remplissage complet de la pièce finie. Les parties actives des outillages ainsi que les cinématiques de déplacement des outillages ont ensuite pu être déterminé (figure 13).

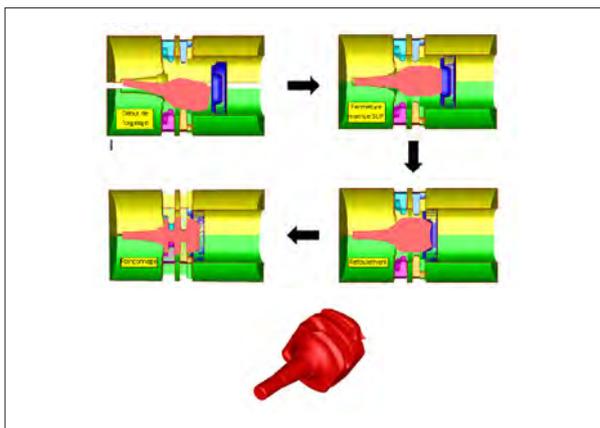


Figure 13 : Vues en coupe des étapes de forgeage multidirectionnel Source : Cetim

Au terme des différentes itérations engagées, nous avons pu confirmer l'atteinte d'un matricage de la pièce avec un taux de bavure de 14% (figure 14) en accord avec l'objectif de 15% fixé et avons ainsi pu lever les verrous technologiques permettant de démontrer la faisabilité de la technologie.

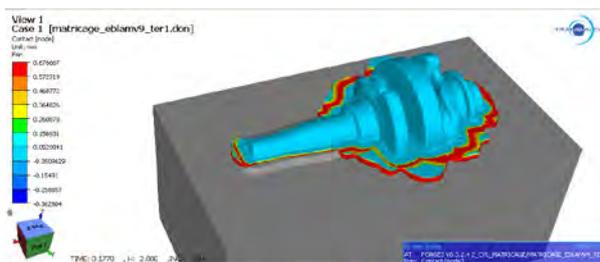
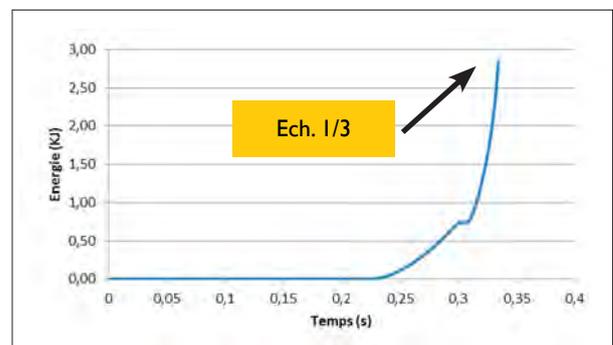
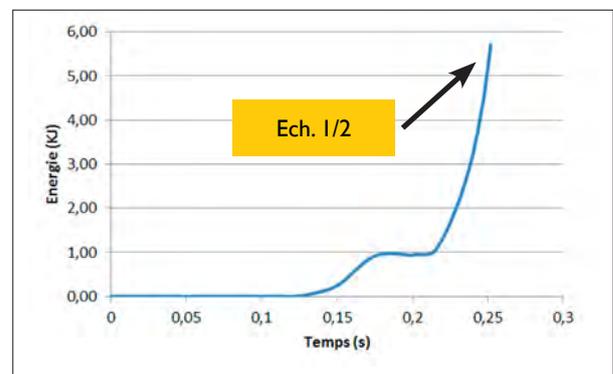


Figure 14 : Vue fin de matricage de l'ébauche à 14 % de bavure Source : Cetim

A l'issue de cette phase de détermination de la gamme de forgeage, un nouvelle phase de conception a été entamée en partenariat avec l'ENSAM Metz (AM-Valor). La première étape de conception a consisté à fixer une échelle de pièce en adéquation avec les capacités des presses de plateforme Vulcain de l'ENSAM de Metz sur lesquelles nous réaliserons nos essais.

Initialement envisagée à l'échelle 1/2 pour des aspects de dimensionnement, le bilan énergétique de l'opération de forgeage multidirectionnel nous a amené à retenir une échelle 1/3. En effet, au delà de l'énergie nécessaire au forgeage, le déploiement de ressorts à gaz dans l'outillage est également consommateur d'énergie. La machine retenue pour le forgeage de ce cas industriel est une presse à vis de 400T disposant d'une énergie maximum de 31,5 KJ. Dans l'hypothèse d'une échelle 1/2, le dimensionnement des ressorts à gaz ainsi que les courses de travail impliqueraient une consommation en énergie de 26,5 KJ et une énergie de forgeage estimée à 5,5KJ. Dans le cas d'une échelle 1/3, l'énergie consommée par les ressorts à gaz ne serait plus que de 14,5 KJ et une énergie de forgeage estimée à moins de 3 KJ nous laissant plus de marge pour garantir le bon fonctionnement de l'outillage.



Courbe I : Evolution de l'énergie de forgeage du cas industriel en fonction de l'échelle de pièce

Ces données ont donc permis d’initier une phase de conception de l’outillage en partenariat avec l’ENSAM Metz (AM-Valor), basée sur la cinématique validée lors de l’étude de simulations (figure 15).

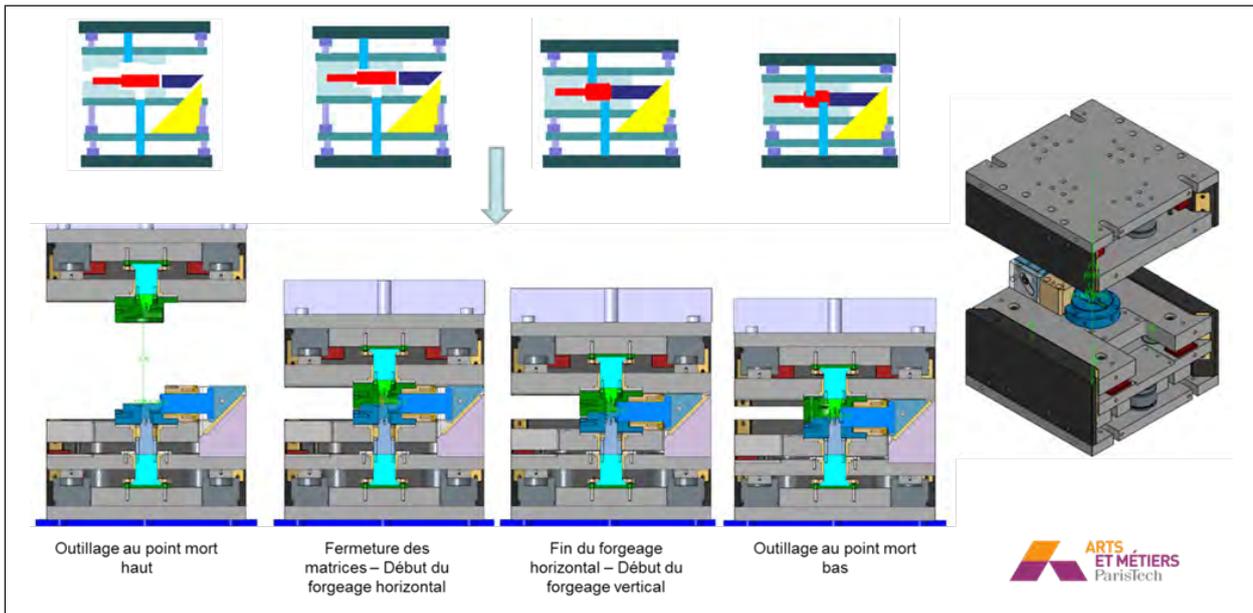


Figure 15 :Vues de la cinématique de l’outillage Source : ENSAM Metz (AM-Valor)

### Etude de poinçonnage de zones en contredépouilles

L’une des autres applications potentielles du forgeage multidirectionnel consiste à venir mettre en forme à chaud des parties de pièces en contredépouilles. Nous parlerons ici encore de gain matière, toutefois celui-ci ne sera plus permis par une réduction du taux de bavure mais par un allègement de pièce brute de forge. Au-delà du poids matière première, le forgeage de contredépouille permettrait également de réduire les phases d’usinage et donc le coût global de la pièce finie.

Dans la continuité des travaux présentés précédemment, nous avons ainsi travaillé sur le même cas d’étude à savoir le vilebrequin 2 cylindres (figure16).

Dans ce cas de figure, l’ajout d’évidements en contredépouilles serait intéressant au niveau des manetons car il impliquerait également une réduction du poids au niveau des contrepoids pour maintenir l’équilibrage de la pièce en service, favorisant donc d’autant plus son allègement global. Nous avons donc imaginé intégrer des demi-lunes au niveau des manetons comme nous pouvons le voir sur la modélisation de la figure 16.

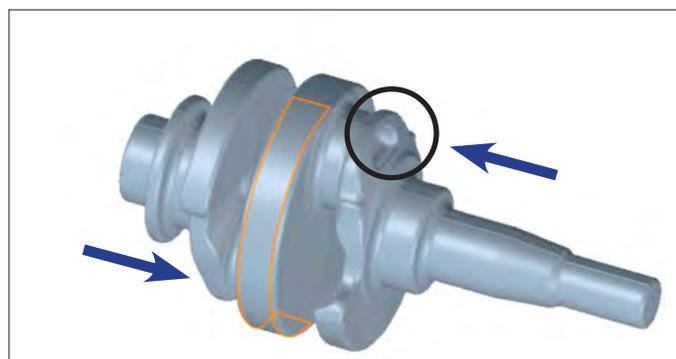


Figure 16 : Vue du cas d’étude de poinçonnage de formes en contredépouilles Source : Cetim

Les formes à obtenir étant positionnées au niveau du plan de joint de la pièce, celles-ci devront être mises en forme après l'opération d'ébavurage. Les matrices de poinçonnement ont ainsi été dimensionnées au niveau des formes à obtenir par intégration d'une compensation de volume permettant les déplacements de matière (figure 17).

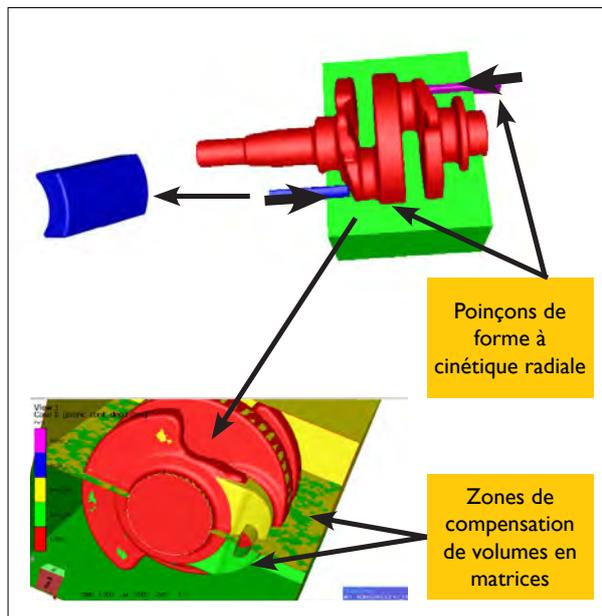


Figure 17 : Conception de l'outillage de poinçonnement  
Source : Cetim

Le comportement de l'ébauche lors du poinçonnement de la forme imaginée a ainsi pu être évalué par simulation pour lequel le résultat obtenu est représenté sur la figure 18.

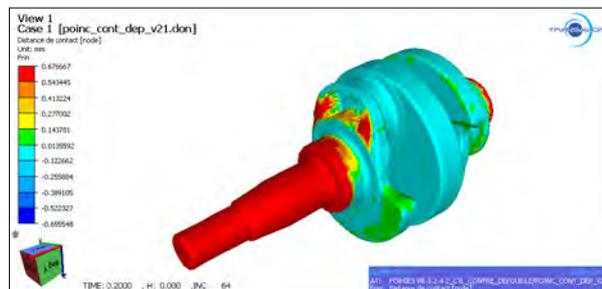
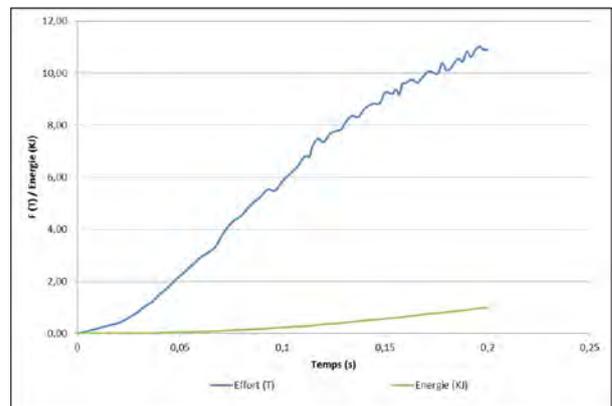


Figure 18 : Vue fin de poinçonnage  
Source : Cetim

Avec un effort d'environ 11 tonnes et une énergie d'à peine 1 KJ (voir courbe 2), l'opération pourrait aisément être réalisée sur une presse industrielle standard.



Courbe 2 : Bilan Efforts / Energies du poinçonnage

## Bilan et perspectives

Le bilan que nous pouvons dresser sur les trois parties de l'étude sur le forgeage multidirectionnel est :

### ➔ Transfert des connaissances IPH

Cette partie nous a permis de profiter d'un retour d'expérience d'une dizaine d'année de travaux engrangés par IPH. Même si l'objectif du « 0 bavure » d'IPH mettant en œuvre des outillages aux cinématiques très complexes, nous avons pu appréhender la technologie et faire le lien avec notre besoin de réduction de bavure autorisée par des mouvements multidirectionnels beaucoup moins complexes.

### ➔ Etude de démonstrateurs numériques

L'étude de démonstrateurs numériques fut très importante car elle nous a permis d'appréhender des cinématiques probables en se basant sur des cas de pièces aux volumes, certes simplifiés mais impliquant un positionnement déjà bien précis. Le bilan de cette partie fût d'estimer un objectif de bavure de l'ordre de 15%, qui s'est révélée être une étape de validation par les membres du groupe et qui nous a donc permis d'initier l'étude de cas industriels.

### ➔ Etude de cas industriels :

L'étude du cas industriel retenu soit le vilebrequin 2 cylindres a pu être avancé suffisamment pour engager la phase de conception de l'outillage.

Un second axe de travail a également pu être exploré durant cette partie, il s'agit du forgeage de contredépouilles.

Les résultats obtenus ont permis d'appréhender la cinématique d'un outillage et de constater que le niveau d'effort et d'énergie nécessaire pour réaliser l'opération restent assez faibles.

A l'issue de cette première phase d'étude principalement axées sur la définition numérique des différents cas d'étude, nous avons bâti un programme de phase 2 visant à lancer l'outillage envisagé puis à réaliser des essais en modes prototypes et préséries.

Le programme de la phase 2 se décomposera suivant les trois lots ci-après :

- ➔ **Lot 1 - Réalisation outillage**
- ➔ **Lot 2 - Réalisation des prototypes sur la plateforme Vulcain**
- ➔ **Lot 3 - Qualification série**

## Conclusion

Les trois lots de cette première phase d'étude sur le forgeage multidirectionnel qu'ont été le transfert de connaissance par IPH, les études de cas numériques et enfin les études de cas industriels nous ont permis de mieux appréhender la technologie de forgeage multidirectionnel, de confirmer sa faisabilité et enfin de définir clairement notre besoin.

Nous avons ainsi pu voir qu'un objectif de 15% semble atteignable pour la typologie de pièce envisagée et ce par la mise en œuvre de déplacements séquentiels impliquant des cinématiques moins complexes que celles développées par IPH mais probablement plus industrielles.

Tous ces aspects ont été traités de façon numérique au travers de cette phase. Il nous faut désormais passer à une phase plus concrète « d'essais » qui seront menés sur la plateforme Vulcain dans le cadre d'une phase d'étude validée par la commission Forge en décembre dernier.

## FORMING THE FUTURE



Le marteau réinventé –  
le forgeage de précision  
grâce à la technologie servo.

**POSITIONNEMENT PRÉCIS, EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE, FLEXIBILITÉ ET DIMINUTION DES TEMPS DE CYCLE SONT SES PRINCIPAUX ATOUTS.**

Les nouveaux pilons électriques de Schuler permettent, grâce à leur moteur linéaire, un forgeage plus précis et jusqu'à 20% d'économie d'énergie. C'est un axe de positionnement électrique, dont la course peut être adaptée à la production, et qui vous permettra d'automatiser et d'optimiser au mieux votre cellule de forgeage. N'hésitez pas à nous contacter pour en savoir plus. La transformation d'un équipement existant étant également possible. Nous offrons également à nos clients une aide de qualité, une disponibilité rapide des pièces de rechange ainsi que des services innovants, et ce pour chaque phase du cycle de vie.



[www.schulergroup.com/forging\\_fr](http://www.schulergroup.com/forging_fr)

**SCHULER**   
Member of the ANDRITZ GROUP