

Le système à convertisseur de couple

Dr.-Ing. **Volker Middelmann**

Dipl.-Ing. **Uwe Wagner**

Introduction

Depuis son apparition, qui remonte aux années 40, le convertisseur de couple s'est révélé être un élément de couplage efficace entre un moteur et une boîte de vitesses automatique. Les avantages qu'il présente, et qui sont liés au principe de transfert hydrodynamique de puissance, sont tout à fait remarquables: La surélévation de couple a pour effet d'augmenter l'effort de tirage et de diminuer les pertes d'énergie au décollage. Le glissement inhérent au système permet de filtrer les excitations vibratoires provenant du moteur, d'éviter les chocs au réattelage et d'obtenir un changement de rapports particulièrement confortable. Afin de minimiser les pertes au niveau du convertisseur, on utilise des systèmes de pontage, dits 'lock up', équipés d'amortisseurs.

Contrairement aux boîtes automatiques, dont la fonctionnalité a été régulièrement et constamment améliorée au cours de leur évolution, la conception même du convertisseur n'a pas connu de changement notable au cours des vingt dernières années, et ce malgré l'apparition dans les années 70 de système de pontage à convertisseur. Or on sait que c'est justement dans le cas des boîtes automatiques étagées que l'optimisation du système convertisseur + système de pontage + boîte de vitesses est susceptible d'amener les améliorations les plus importantes en termes de performance et de consommation de carburant.

Lors de son dernier colloque, en 1994, LuK a déjà présenté un concept global de pontage de convertisseur, le système TorCon LuK. Il permet non seulement de tirer pleinement parti des avantages du convertisseur, mais aussi d'en réduire les inconvénients, et ce grâce à un système de pontage à haute performance. Ce système a d'ores et déjà permis d'obtenir, dans le cadre d'essais comparatifs, des améliorations substantielles en termes de performances, de consommation et d'émissions polluantes. On a pu, de surcroît, réaliser avec une boîte étagée à 4 vitesses des performances équivalentes à celles d'une boîte étagée à 5 vitesses classique. La tendance étant toujours à la réduction de la consommation et à l'amélioration des performances, il est indispensable de poursuivre l'optimisation du système. Il convient pour cela d'accorder autant d'importance au choix et à la mise au point de la stratégie de commande, qu'au développement conceptuel des trois éléments du système que constituent

le système de pontage, l'amortisseur et la circulation du flux de convertisseur. En réalité, seule une approche globale du système peut permettre d'exploiter l'ensemble du potentiel que représentent le convertisseur et le système de pontage.

Fidèle à ce principe, LuK a développé ces dernières années des systèmes de convertisseurs permettant, pour un poids et un encombrement moindres, et des coûts de fabrication comparables, une fonctionnalité plus étendue et une plus grande flexibilité, ainsi que des performances plus élevées pour une consommation et des émissions polluantes considérablement réduites.

Chez LuK Inc., notre filiale de Wooster, aux Etats-Unis, où fut ouvert ces dernières années un second centre d'étude consacré aux convertisseurs, on produit également en série, depuis fin 1997, des convertisseurs de différentes tailles pour le fabricant de boîtes de vitesses "Allison Transmission". Les convertisseurs MD et HD (Medium & Heavy Duty) sont montés sur les boîtes WT ("World Transmission") de chez Allison. La figure 1 montre la construction du convertisseur de la série MD, lequel bénéficie également de l'avantage d'être couplé à un système de pontage.

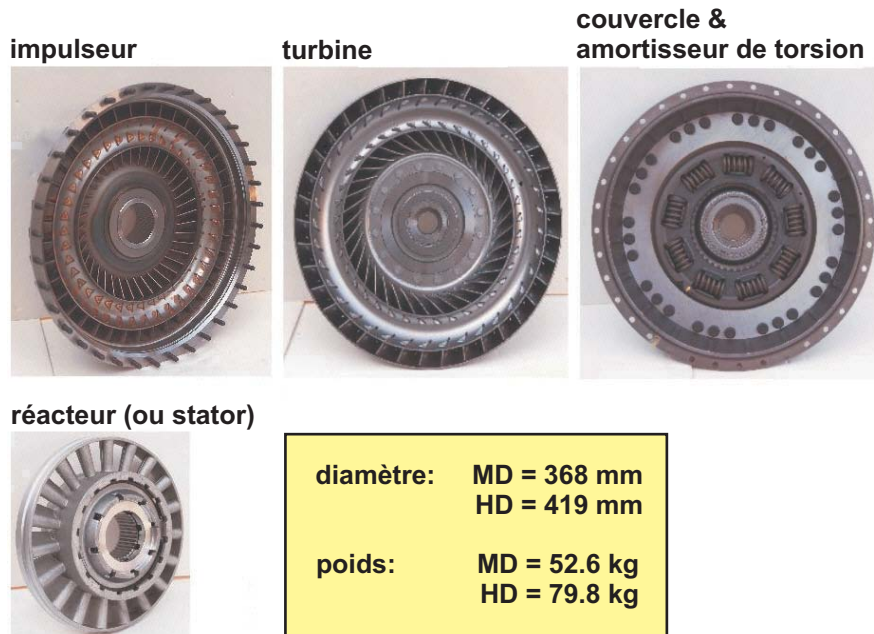


Figure 1: Composants du convertisseur de la série MD

Les enseignements de l'histoire et de l'évolution générale des boîtes automatiques pour l'élaboration de nouveaux concepts de convertisseurs

Dès 1940, le constructeur automobile "Oldsmobile" présentait la première boîte entièrement automatique à rapports étagés pour voitures particulières.



1940

Oldsmobile introduit
la première transmission
entièrement automatiquée

objectif

- confort
- commodité

Figure 2: Les débuts de la boîte automatique

A l'époque, il s'agissait surtout d'améliorer le confort, notamment celui du conducteur. On n'accordait pas encore beaucoup d'importance aux inconvénients qui en résultaient en matière de performances et de consommation de carburant. La boîte standard était alors la boîte automatique à 2 vitesses, d'une ouverture moyenne de 1,8 (fig.3) Pour compenser cette faible ouverture, on a utilisé des convertisseurs capables d'une conversion de couple de l'ordre de 3 à 4,5 au maximum. On obtenait ainsi un grand confort de conduite, sans éviter toutefois des pertes d'énergie importantes. Dans l'ensemble, les convertisseurs utilisés à l'époque étaient, au niveau de chacun de leurs composants fonctionnels, d'une conception particulièrement complexe. On trouvait des modèles équipés de stators à pales orientables, de turbines et de stators à flux variables, ou intégrant des fonctions de boîte de vitesses. On n'utilisait pas encore de système de pontage à convertisseur.

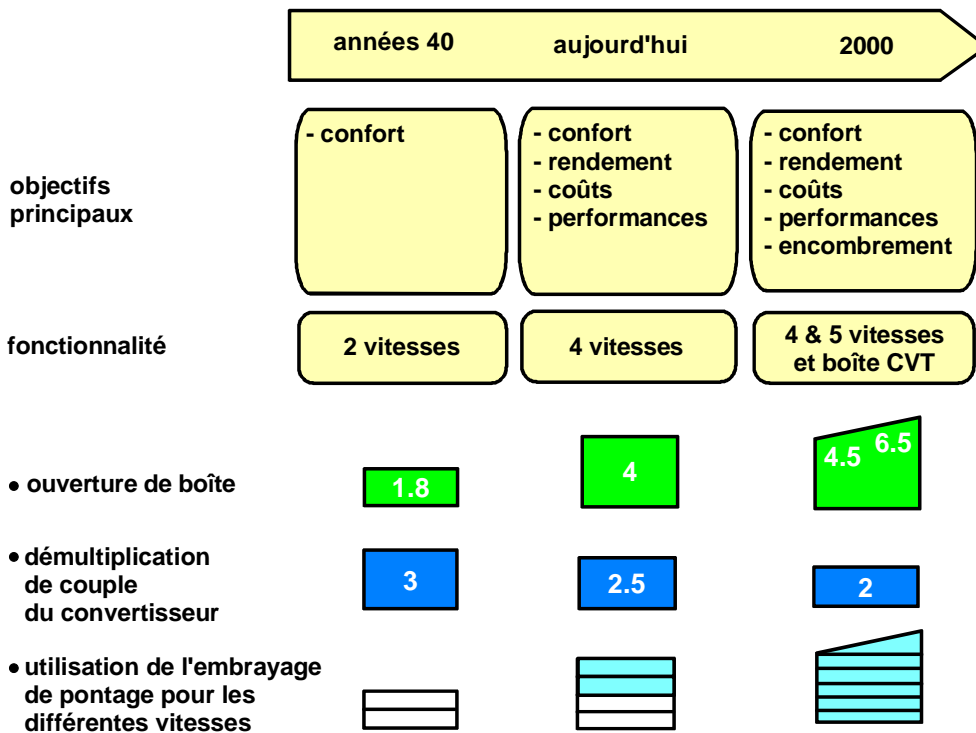


Figure 3: Schéma d'ensemble de l'évolution des boîtes automatiques

Au fil des années, il a fallu, pour réduire les pertes, concevoir des convertisseurs plus durs, ce qui du même coup limitait la conversion de couple. Pour pallier cet inconvénient, on a commencé à utiliser des boîtes à plus grande ouverture et à augmenter le nombre de rapports. Dans les années 70, c'est la boîte automatique à 3 vitesses (ouverture d'environ 2,5) qui était la plus répandue. Du fait de la crise pétrolière, il a fallu penser à réduire les pertes au niveau du convertisseur, et c'est ainsi qu'apparut un système de pontage, lequel n'intervenait cependant que pour le rapport supérieur et à grande vitesse. Si bien que les spécifications du système de pontage quant à sa capacité de refroidissement et celles de l'amortisseur en termes d'isolation vibratoire étaient particulièrement réduites (fig.3).

La boîte standard des années 90 (env. 80% des parts de marché) est une boîte automatique à 4 vitesses avec une ouverture de 4 à 4,5. 75% de ces boîtes de vitesses sont équipées d'un système de commande entièrement électronique et on approchera les 100% d'ici l'an 2000. Le système de pontage actuel couvre en fonctionnement un champ plus étendu que le système des années 70. En règle générale, en troisième et en quatrième, à partir de régimes situés entre 1100 1/mn et 1700 1/mn, le couplage s'effectue en partie par pontage glissant, ceci afin de réduire la consommation de carburant. Lors des changements de rapports ou de chocs au réattelage (p.ex. "tip-in"*), le pontage s'effectue également par glissement (modulation) (fig.3).

Une étude générale de l'évolution des boîtes automatiques au cours de leur histoire permet donc de retenir quelques tendances fondamentales, à savoir:

- La fonctionnalité de la boîte automatique (nombre de rapports et ouverture de boîte) est plus étendue.
- Les phases de fonctionnement à convertisseur déponté sont de plus en plus restreintes.
- Les phases de fonctionnement à convertisseur ponté (pontage glissant ou non) sont de plus en plus étendues.

Au-delà de ces tendances générales, on peut sans doute s'attendre à ce que l'augmentation du prix des carburants et le souci de plus en plus affirmé de préserver l'environnement obligent à réduire encore la consommation des véhicules. A ceci s'ajoute la nécessité de réduire également les coûts de production. Le volume actuellement disponible pour l'installation du convertisseur et du système de pontage est appelé à diminuer, notamment dans le cas des véhicules à traction avant, ou équipés de boîtes automatiques 5 vitesses et de CVT.

La figure 4 résume en un tableau les tendances générales observées et les objectifs à poursuivre pour le développement du système convertisseur + embrayage de pontage.

tendances observées	objectifs
<ul style="list-style-type: none">• fonctionnalité plus étendue de la boîte automatique	<ul style="list-style-type: none">• diminution de la consommation
<ul style="list-style-type: none">• part d'intervention du convertisseur en diminution sur l'ensemble des phases de conduite	<ul style="list-style-type: none">• amélioration des performances du véhicule
<ul style="list-style-type: none">• part d'intervention du système de pontage en augmentation sur l'ensemble des phases de conduite	<ul style="list-style-type: none">• réduction du poids et du volume d'encombrement
	<ul style="list-style-type: none">• diminution des coûts de fabrication
	<ul style="list-style-type: none">• bon agrément de conduite
	<ul style="list-style-type: none">• grand confort

Figure 4: Tendances générales observées et objectifs de développement système convertisseur-système de pontage.

Élément-clé de la réalisation des objectifs: La stratégie de commande du système de pontage

La conception, les caractéristiques, la construction même des trois composants du système à convertisseur, à savoir le système de pontage, l'amortisseur et la circulation hydrodynamique du flux de convertisseur, dépendent de la stratégie retenue pour la commande du système de pontage. Cette dernière constitue l'articulation centrale des éléments mécaniques, détermine les spécifications concernant les différents modes de fonctionnement, ainsi donc que la réalisation des différents composants (fig.5).

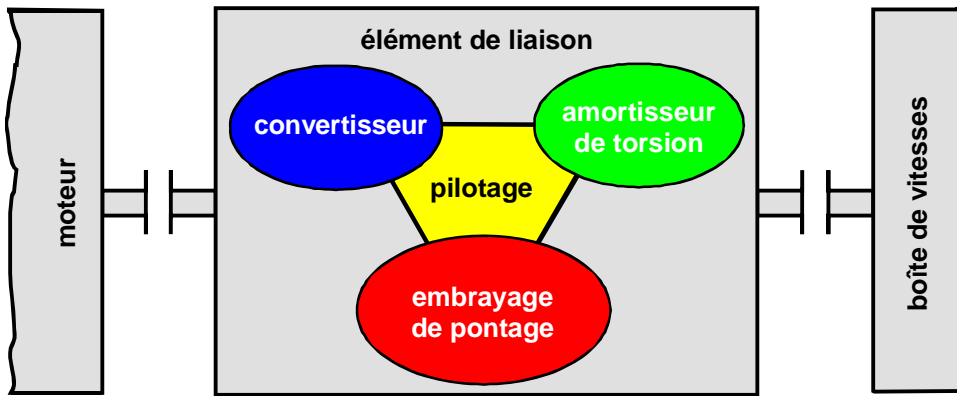


Figure 5: Schéma d'ensemble du système convertisseur-embrayage de pontage-amortisseur, avec stratégie de pontage

Une stratégie de pontage adéquate peut être différente selon le véhicule concerné et se détermine aussi bien par rapport à la fonctionnalité recherchée dans le véhicule qu'en fonction des objectifs fixés en matière de consommation, de performances, d'agrément de conduite et de confort. C'est le système tel qu'il se présente dans son ensemble qui définit la stratégie de commande, laquelle à son tour détermine les spécifications concernant la construction et la réalisation des composants mécaniques.

Pour le choix de la meilleure stratégie de commande, l'ouverture de boîte constitue un paramètre tout à fait approprié. Compte tenu de l'état actuel de la technique et de l'évolution probable des boîtes automatiques et des CVT, on peut proposer une répartition telle qu'elle est présentée figure 6.

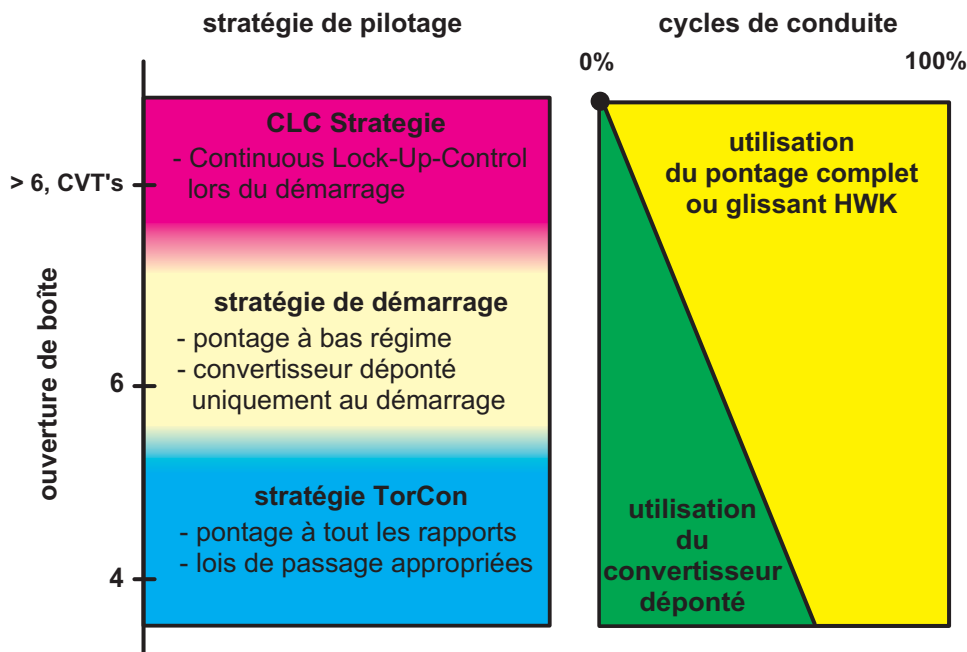


Figure 6: Stratégies de pontage (HWK = convertisseur + embrayage de pontage performants)

Le système TorCon convient particulièrement pour les boîtes présentant une ouverture de l'ordre de 4 à 4,5. Dans ce cas, afin de réduire la consommation et d'augmenter les performances, le pontage s'effectue à tous les rapports et pour des gammes de régimes très étendues (jusqu'à env. 900 1/min). Pour garantir une isolation vibratoire suffisante à un régime aussi bas et éviter une trop forte sollicitation du moteur, il est nécessaire d'avoir un glissement relativement important au niveau du système de pontage. L'utilisation d'un amortisseur particulièrement performant peut permettre d'améliorer l'isolation vibratoire et donc de limiter le glissement nécessaire. Les pertes de puissance provoquées par ce glissement important au niveau du système de pontage peuvent générer des températures trop élevées sur la surface de frottement. Ces pics de température provoquent la détérioration de l'huile de boîte (AFT) et de la garniture. Il en résulte un profil descendant du coefficient de friction rapporté au glissement, ce qui génère du broutement et peut conduire à une défaillance de la boîte de vitesses. Si l'on veut abaisser le niveau de ces pics de température, il faut utiliser un système de pontage à grande capacité de refroidissement. C'est ce que propose LuK avec ses systèmes de pontage à convertisseurs à hautes performances (cf. page 139).

Etant donné que dans le cas du système "TorCon" les phases de fonctionnement à convertisseur dépointé sont seulement restreintes et non pas totalement éliminées, il convient de se demander quelle devra être la caractéristique du convertisseur. Les convertisseurs „mous“ réalisant une conversion importante au décollage et présentant un régime élevé à l'arrêt freins bloqués (régime de calage) ont l'avantage, contrairement aux convertisseurs „durs“, de limiter les pertes d'énergie à l'arrêt et d'avoir une grande capacité d'accélération. Cela permet en outre de raccourcir la phase d'échauffement du moteur et donc de réduire les émissions polluantes. On observe toutefois, à certaines phases de fonctionnement, des pertes trop élevées au niveau du convertisseur. C'est pourquoi il est indispensable que le pontage des convertisseurs mous s'effectue relativement tôt, ce qui est prévu dans le cas du système TorCon et possible également par ailleurs avec les pièces mécaniques développées par LuK.

La figure 7 présente une comparaison entre un convertisseur dur et un convertisseur mou, respectivement équipés d'un système de pontage classique et du système TorCon.

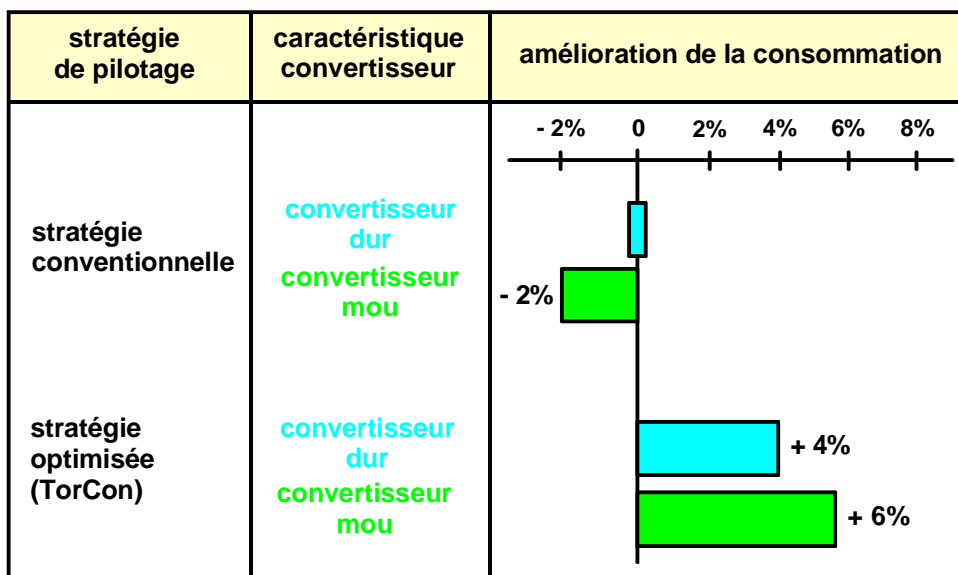


Figure 7: Influence de la caractéristique du convertisseur (dur/mou) et de la stratégie de pontage sur la consommation (simulation)

Pour ce qui est de l'influence du système sur la consommation, il convient de retenir les observations suivantes:

- Si l'on utilise un système de pontage classique, le convertisseur dur est plus avantageux que le convertisseur mou.
- Si l'on utilise le système "TorCon", c'est le convertisseur mou qui est le plus avantageux.
- C'est d'abord l'influence de la stratégie de pontage qui est déterminante, la caractéristique du convertisseur intervient en deuxième lieu.
- En combinant un convertisseur mou au système "TorCon", on peut réaliser selon les cas d'utilisation un gain de consommation de l'ordre de 5 à 10%, comparativement à l'utilisation d'un convertisseur dur combiné à une commande de pontage classique.

L'observation des performances conduit aux mêmes constatations.

Plus l'ouverture de la boîte est grande (>5), plus l'impact de la caractéristique du convertisseur (dur/mou, niveau de conversion au décollage, rendement maximal, etc.) sur les performances et la consommation est faible. En effet, la grande ouverture de boîte et le nombre élevé de rapports permet en général de trouver pour chaque état de charge un point de fonctionnement possible à convertisseur ponté, dont le rendement est nécessairement supérieur à tout point de fonctionnement avec convertisseur déponté, que ce soit en termes de consommation ou de force de tirage. Le dépontage ne se justifie donc pas techniquement et n'est pas non plus souhaitable sur le plan du confort. Le convertisseur perd donc de son importance, sa fonction se réduit à un supplément de confort en phase de décollage, phase après laquelle il est ponté en permanence.

C'est pourquoi, pour ces modèles de boîtes, il ne s'agit plus de concevoir le convertisseur en recherchant la caractéristique adéquate, son rendement maximal ou le niveau de conversion au décollage. Seuls importent aujourd'hui les critères suivants:

- L'encombrement
- Le coût de fabrication

et quelques critères hérités de la conception classique et qui restent toujours valables:

- Le profil de charge rapporté à la conversion de régime
- La position du point d'embrayage (cf. également page 151)

LuK a donc développé un convertisseur extrêmement étroit, d'un encombrement axial réduit de 45% en comparaison des modèles

circulaires classiques, et qui combiné aux systèmes de pontage et de commande est tout aussi performant (cf. également page 151). La figure 8 présente à titre d'illustration l'exemple d'une comparaison entre la consommation et les performances d'un convertisseur classique de forme circulaire et celles du convertisseur étroit de LuK.

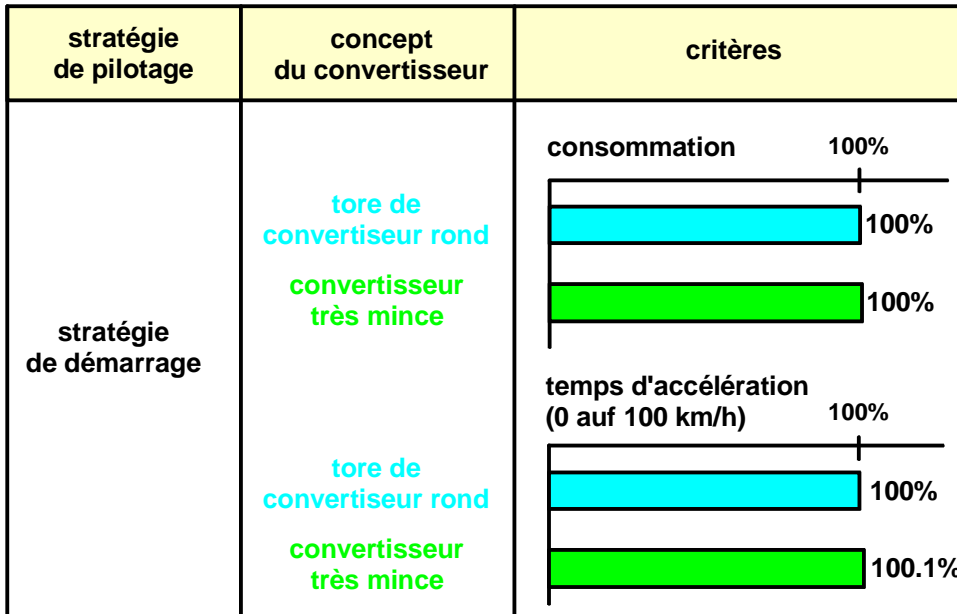


Figure 8: La construction du convertisseur et son influence sur la consommation et les performances (simulation)

Dans le cas d'utilisations combinées avec la CVT, on peut même imaginer pour le système de pontage une stratégie de commande impliquant non pas le passage de paliers successifs, mais un système à variation continue; Il s'agit en l'occurrence du système de commande CLC ("Continuous Lock-up Control") qui consiste à amorcer le pontage dès qu'on relâche le frein, avant même que le véhicule ait décollé, et ce pour un couple minimal d' env. 10 Nm (couple de glissement), après quoi le pontage s'effectue de façon progressive pendant toute la phase de décollage jusqu'au changement de démultiplication. Aucun dépontage n'est prévu pendant toute la phase de conduite. Une telle stratégie représente un gain de confort évident (Le système de pontage ne change pas de rapport durant la phase de décollage). En raison cependant des pertes générées au niveau du système de pontage, ce système requiert une plus grande capacité de refroidissement et éventuellement une modification du

mécanisme de refroidissement. A l'heure actuelle, LuK a entrepris une première série d'études visant à développer un projet de ce type.

A partir des stratégies de commande que nous venons de présenter, des simulations réalisées pour l'évaluation des performances et de la consommation, ainsi que des tendances observées dans l'évolution des systèmes, il est possible de définir quantitativement les objectifs de développement de l'ensemble du système convertisseur + embrayage de pontage (HWK) + amortisseur + commande de pontage tels qu'ils sont résumés à la figure 9.

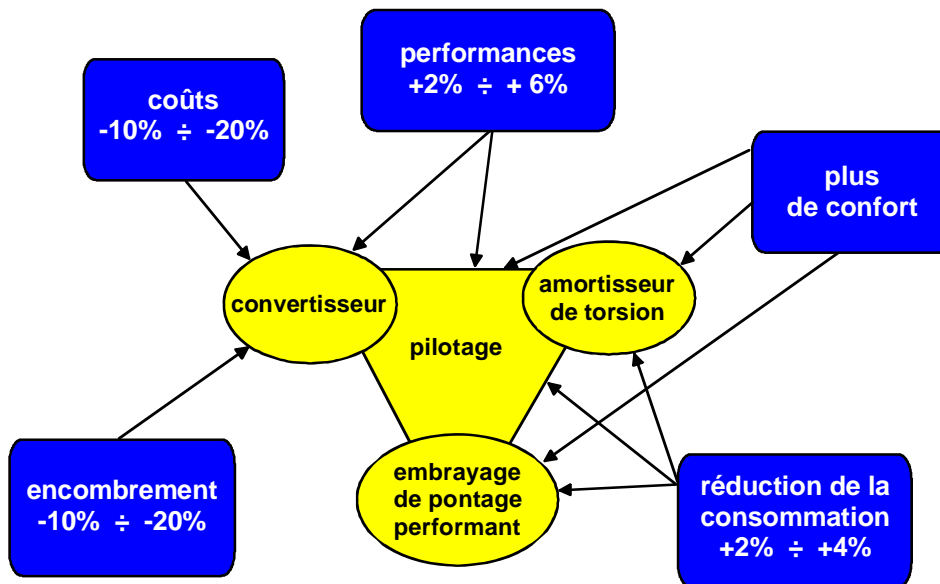


Figure 9: Objectifs de développement de l'ensemble du système convertisseur + embrayage de pontage + amortisseur + commande de pontage

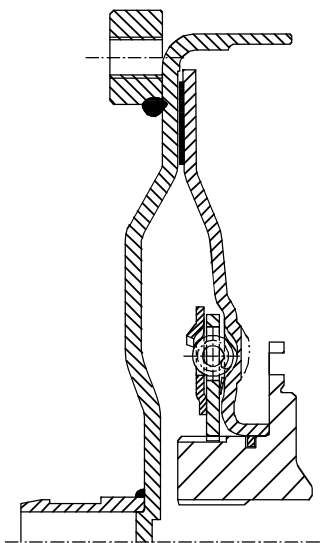
Les composants du système

Le système de pontage de convertisseur à haute performance

C'est le niveau élevé des spécifications du système de pontage en matière de fonctionnalité qui a déterminé dans tous les cas le choix des stratégies de commande précédemment décrites. Si la capacité du système à transmettre le couple de façon optimale est un critère important, il convient également d'accorder une attention particulière à deux autres critères, qui sont la capacité de refroidissement et la flexibilité de la stratégie de commande.

Objectifs:

- Capacité suffisante à transmettre le couple
- Capacité de refroidissement suffisante
- Bonne flexibilité de la stratégie de commande
- Changements de rapports progressifs
- Comportement neutre au tirage et en retro
- Temps de réaction court et constant
- Coefficient de friction ascendant rapporté au glissement



objectifs :

- **capacité suffisante à transmettre le couple**
- **capacité de refroidissement suffisante**
- **bonne flexibilité de la stratégie de commande**
 - **changement de rapports progressifs**
 - **comportement neutre au tirage et en rétro**
 - **temps de réaction court et constant**
 - **coefficient de friction ascendant rapporté au glissement**

Figure 10: Spécifications du système de pontage à convertisseur à haute performance

La bonne transmission du couple

La capacité du système à bien transmettre le couple est avant tout fonction de la pression surfacique admissible au niveau de la garniture, laquelle à son tour est déterminée par la pression exercée sur le piston de l'embrayage et la surface de garniture effectivement concernée. Cette surface est déterminée par la déformation mécanique et thermique du piston et du couvercle, de même que par les tolérances de fabrication de ces deux pièces. La valeur nominale de la surface de garniture n'a donc la plupart du temps qu'une importance secondaire. LuK a déjà donné dans ces publications (1) et (2) une description exhaustive de ces mécanismes, et on dispose aujourd'hui d'une vaste expérience pratique dans ce domaine. LuK propose selon les cas d'utilisation des modèles HKW plats (fig.10), côniques (fig.26), des modèles HKW plats à double surface de frottement (fig.25) ainsi qu'à surfaces de frottements multiples*.

La flexibilité de la stratégie de commande

La mise en oeuvre du système HKW s'opère en trois phases:

- Phase de commutation
- Phase de pontage
- Phase de montée en couple

Il est souhaitable pour bien faire que le volume de flux nécessaire au pontage soit réduit au minimum. C'est effectivement le cas si premièrement le système n'oppose qu'une faible résistance au pontage, et deuxièmement si le jeu entre le piston et le couvercle est assez étroit pour générer une différence de pression suffisamment importante, même pour de faibles volumes de flux. Un flux trop important provoque un saut de couple après la prise d'appui du piston, étant donné que l'énergie cinétique du flux hydraulique de pontage se convertit alors en force de pression. Un faible jeu entre le couvercle et le piston présente donc un avantage. Il convient en outre de faire en sorte que la résistance hydraulique entre le couvercle et le piston, ou si l'on préfère entre le couvercle et le moyeu de la turbine, soit faible. On a pu à l'aide de calculs numériques étudier le comportement des flux et optimiser en ce sens la forme du piston, du couvercle et du moyeu de la turbine.

Pour la phase d'amorce du pontage il est important que les rainures de refroidissement de la garniture ne produisent pas d'effet de collage. Des études empiriques ont permis d'optimiser la forme de ces rainures et d'obtenir ainsi un comportement neutre aussi bien au tirage qu'en rétro. Pour un contrôle de couple optimal, une mise au point précise de la

transmission du couple par le système et un gradient de coefficient de friction positif sont indispensables.

La capacité de refroidissement

La capacité de refroidissement du système HKW est d'une importance primordiale. Le glissement permanent est nécessaire à une bonne isolation vibratoire, le glissement momentané apportant un surcroit de confort, la souplesse de fonctionnement du système de pontage-dépontage, tout cela exerce une contrainte thermique importante sur la garniture de frottement et l'huile. Les pertes d'énergie absorbées par la surface de la garniture peuvent entraîner des pics de température qui détruisent certains additifs de l'huile et, combinés à l'effet mécanique de cisaillement, peuvent briser la chaîne moléculaire. Il en résulte un profil descendant du coefficient de friction rapporté au glissement, provoquant du broutement et en dernier lieu la défaillance de la boîte de vitesses.

La sollicitation thermique du système HKW dépend essentiellement de la stratégie de pontage utilisée. Cette dernière détermine le niveau maximal des pertes générées de même que la somme d'énergie à absorber par la surface de frottement.

D'une manière générale, il faut retenir que:

- Plus le régime de pontage est élevé, plus il faudra un glissement important pour amortir les vibrations et plus les pertes d'énergie seront élevées.
- Plus le rapport enclenché est bas, plus le comportement au réattelage est critique. La figure 11 montre le déroulement d'un réattelage ("tip-in"). Immédiatement après le coup d'accélérateur, le système HKW entre en glissement, évitant ainsi l'effet de balancement habituel. D'où globalement un gain de confort. On note cependant une perte d'énergie momentanée mais importante au niveau du système HKW.

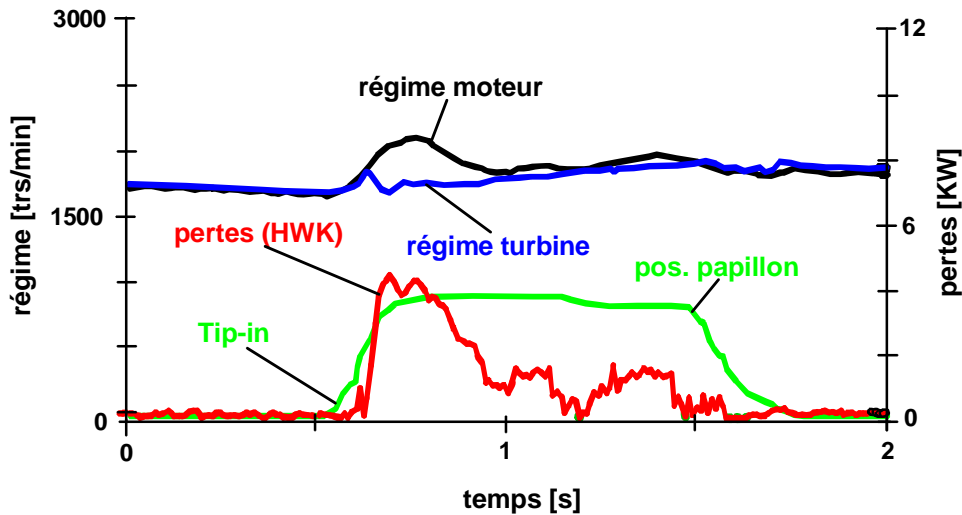


Figure 11: Sollicitation thermique du système HKW lors d'un réattelage ("tip-in")

Si le rapport enclenché est bas et que le pontage s'effectue à bas régime, le passage de rapports doit pour des raisons de confort durer d'autant longtemps. Et plus il dure longtemps, plus la somme d'énergie à absorber est importante. La figure 12 montre le déroulement d'un changement de rapports confortable. Lors de ce pontage pratiquement imperceptible par le conducteur, la perte maximale d'énergie au niveau du système HKW est tout de même de 7kW.

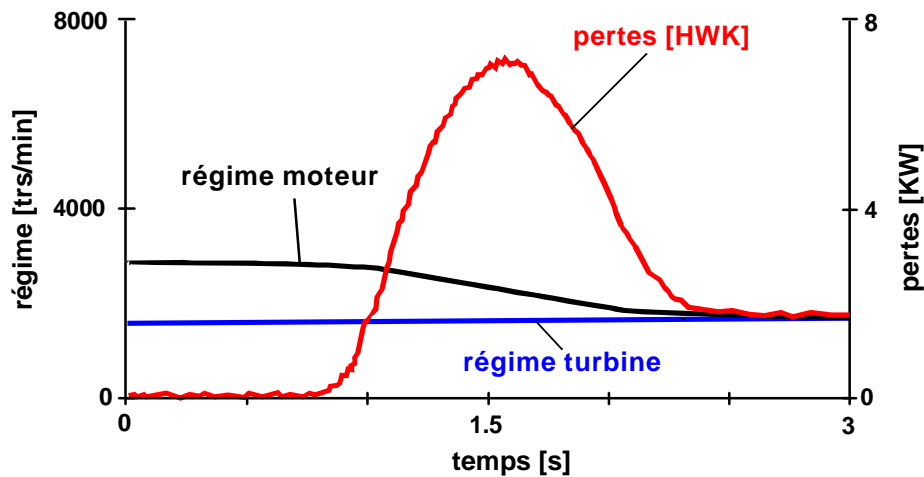


Figure 12: sollicitation thermique du système HKW pendant un changement de rapports

En quoi le système HKW de LuK se distingue-t-il d'un système de pontage classique, et pourquoi le niveau des pertes admissibles est-il dans ce cas supérieur? La réponse tient en trois points:

- Mise au point précise de chacun des composants en rapport avec l'ensemble du système.
- Utilisation de systèmes HKW côniques, extrêmement rigides au niveau des surfaces de frottement (fig.25), ou de systèmes HKW à double surface de frottement (fig.24) permettant des pertes encore plus importantes.
- Optimisation géométrique de la rainure de refroidissement de la garniture.

Pour la mise au point des composants, il convient de prendre en compte les observations suivantes:

1. Les facteurs déterminants pour la courbe de température au niveau de la surface de frottement sont d'une part l'énergie de frottement spécifique mise en oeuvre, elle-même produite de la pression surfacique exercée localement sur la garniture et du glissement, et d'autre part son profil temporel. Dans le cas des changements de rapports en particulier, c'est donc la perte d'énergie spécifique générée localement au niveau de la garniture qui constitue le critère d'optimisation le plus strict, et non pas la pression surfacique locale.

2. Pour calculer la répartition de la pression surfacique au niveau de la garniture, il convient de prendre en compte, en plus de la déformation élastique du couvercle et du piston engendrée par les pressions exercées, la déformation mécanique due à l'apport de chaleur. Elle peut à elle seule provoquer au niveau de la garniture une augmentation de la pression surfacique de l'ordre de 20%.
3. Pour les convertisseurs à double voies, il est préférable de coller la garniture sur le piston. Dans le cas des convertisseurs à triple voies, il vaut mieux la coller sur le couvercle.
4. La courbe de température est très différente selon qu'il s'agit d'un changement de rapports ou du mode de fonctionnement en glissement permanent.

Pour l'analyse du comportement thermique du système, LuK utilise un ensemble de logiciels spécialement conçu qui tient compte de la déformation mécanique et thermique du piston, des propriétés des matériaux constituant la garniture, aussi bien que du transfert de chaleur, très différent selon l'endroit, entre l'acier et l'huile d'une part, et l'acier et l'air d'autre part.

Les résultats des simulations sont ensuite comparés à des mesures de température effectuées au niveau de la pièce en rotation. La figure 13 montre la courbe de température telle qu'elle évolue à la surface de la garniture pendant un changement de rapport. La température surfacique atteint son maximum vers la fin du processus, dans la zone médiane de la surface de la garniture, bien qu'à cet endroit et à cet instant précis ni la pression surfacique ni la perte d'énergie spécifique n'ont atteint leur maximum.

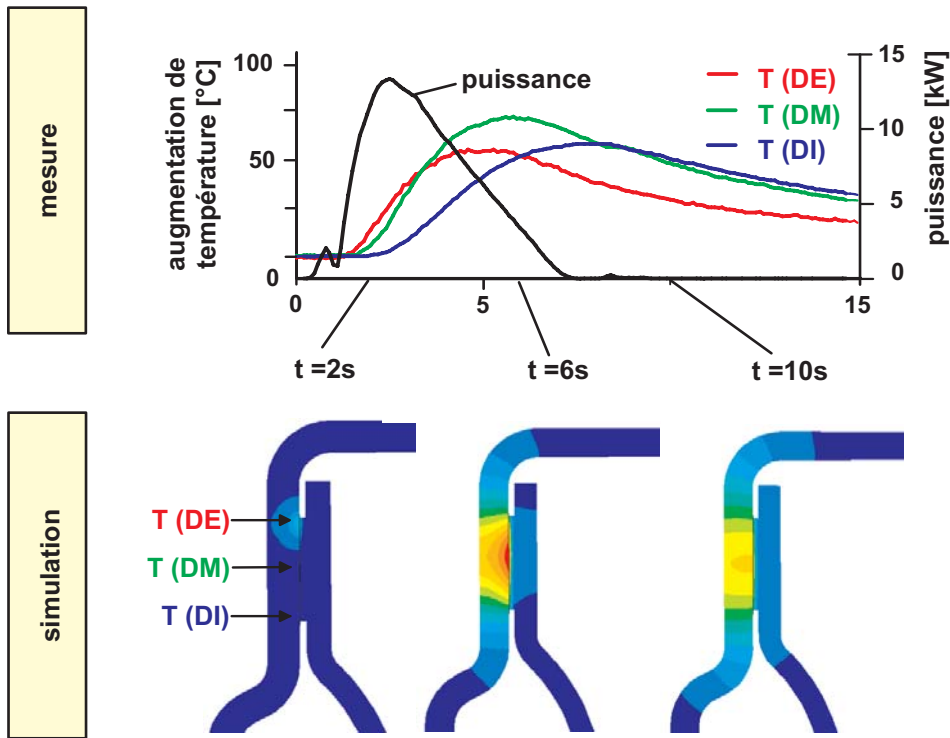


Figure 13: Elévation de la température au niveau de la surface de frottement lors d'un changement de rapport

Ces études nous ont permis de définir des directives de construction radicalement différentes de celles qu'on peut déduire de la seule observation de la pression surfacique et de sa répartition.

Le système HKW de LuK est doté d'un second élément de construction très important, à savoir la rainure de refroidissement: Sa forme, permet de réaliser un équilibre parfait entre le volume de flux et la résistance hydraulique et d'obtenir un coefficient de transfert de chaleur 4 fois meilleur comparé à celui d'une rainure habituelle. En outre, la rainure de refroidissement de LuK présente un comportement neutre relativement au coefficient de friction et donc à la montée en couple, et ce aussi bien au tirage qu'en rétro. On a représenté figure 14 la perte d'énergie spécifique admissible au niveau des garnitures dotées de la rainure de refroidissement LuK. On s'aperçoit qu'en mode de glissement permanent on peut aller jusqu'à 120% de perte admissible supplémentaire. Cette marge est plus réduite dans le cas de glissement momentanés.

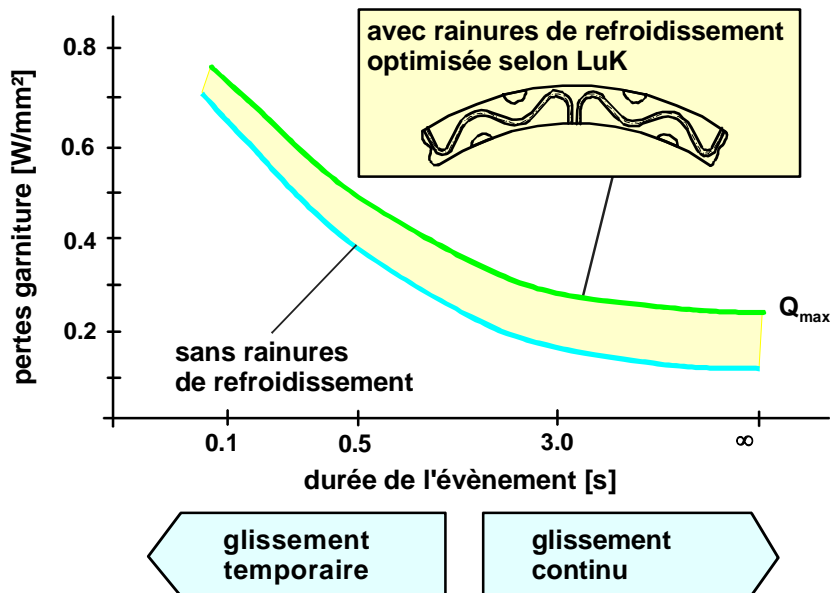


Figure 14: Perte d'énergie spécifique admissible au niveau de la garniture

Si l'on transpose sur un composant réel les pertes d'énergie spécifiques telles qu'elles sont représentées schématiquement à la figure 14, on obtient pour le niveau de perte d'énergie admissible les valeurs absolues représentées figure 15. On notera ici l'importance de l'influence spécifique des différents composants sur la capacité de refroidissement des modèles de système HKW concernés. Cela dépend en effet des différences de comportement en termes de déformation et des marges de tolérance à la fabrication. Le modèle HKW à piston cône présente ainsi la capacité spécifique de refroidissement la plus importante.

Ces modèles de système HKW permettent de mettre en oeuvre sans difficulté les stratégies de commande exposées plus haut. Il n'y a aucun danger de détérioration de l'huile.

Il convient pour les systèmes HKW d'accorder un soin particulier au choix du matériau destiné à supporter le frottement. Les critères suivants sont à retenir:

- Un coefficient de friction ascendant rapporté au régime de glissement.
- Une bonne adhérence et une bonne résistance à la compression.
- Une bonne résistance mécanique.
- Une bonne résistance à la fatigue.
- Une bonne résistance thermique.
- Un niveau élevé du coefficient de friction.

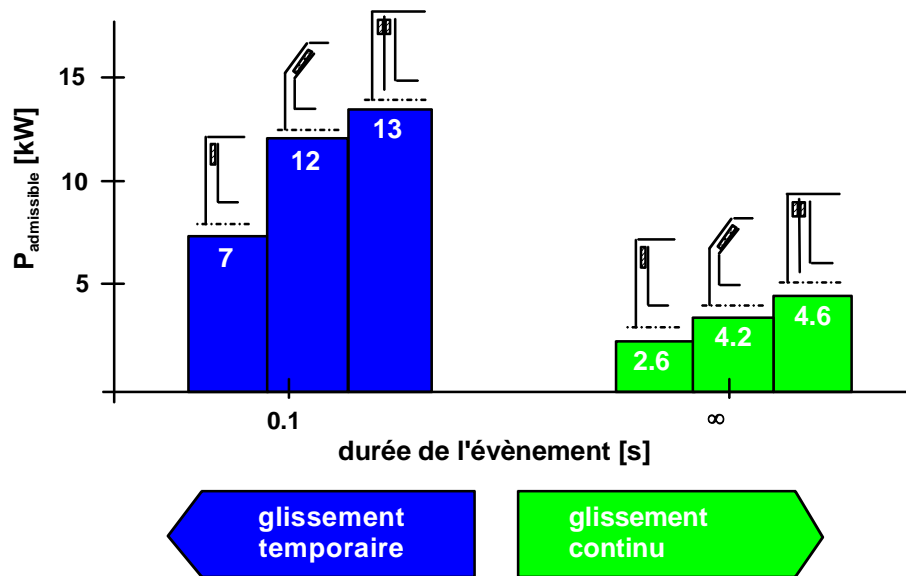


Figure 15: Pertes d'énergie admissibles dans le cas du système HKW (convertisseur 260 mm)

L'amortisseur

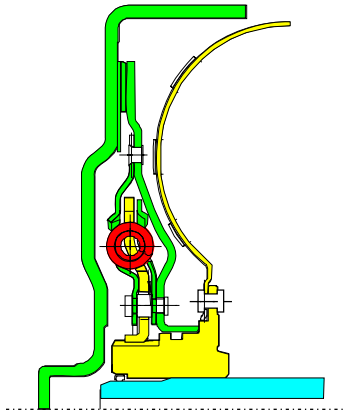
LuK produit chaque année environ 3 000 000 de système de pontage et amortisseurs commercialisés dans le monde entier sous les configurations les plus diverses. On a également lancé en 1996 la production en série d'un "amortisseur à deux voies". Ce concept particulièrement nouveau présente des avantages considérables dans certains cas, selon la chaîne cinématique et la motorisation.

Si l'on décrit les fréquences propres d'une chaîne cinématique à partir d'un modèle à quatre masses (moteur, turbine, boîte et véhicule), la vibration de la masse boîte de vitesses, ici troisième fréquence propre, est en relation avec celle du véhicule et de la turbine. C'est donc l'arbre d'entrée de boîte qui présente l'angle de torsion le plus important. Comparativement, l'angle de torsion de l'amortisseur est plus petit. Il suffit que cette fréquence propre se situe dans la zone de régime du véhicule, à savoir entre 900 1/mn et 2000 1/mn, pour que se produise parfois un bruit désagréable, le bourdonnement. Réduire la rigidité torsionnelle de l'amortisseur n'a pas de sens dans la mesure où l'angle de torsion de ce dernier est faible au départ. Un amortisseur à grand angle n'est donc pas la solution appropriée à ce problème.

Rendre l'arbre d'entrée de boîte plus souple serait en revanche une mesure efficace, mais cela n'est pas possible pour des raisons de solidité.

Pour résoudre ce problème, LuK a développé un amortisseur pour lequel la masse de la turbine est solidaire du piston du système de pontage et l'amortisseur est monté en série avec l'arbre d'entrée de boîte (fig.16).

concept d'amortisseur de torsion conventionnel



amortisseur de torsion LuK 2 modes

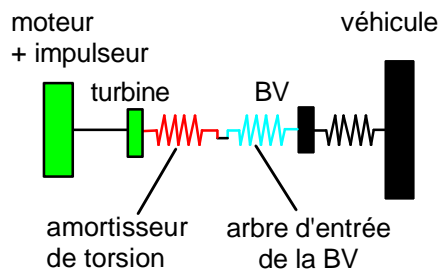
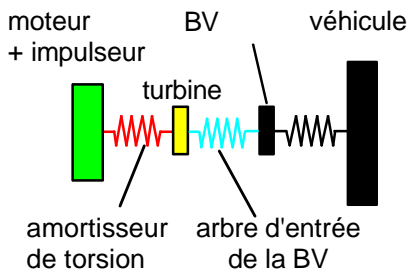
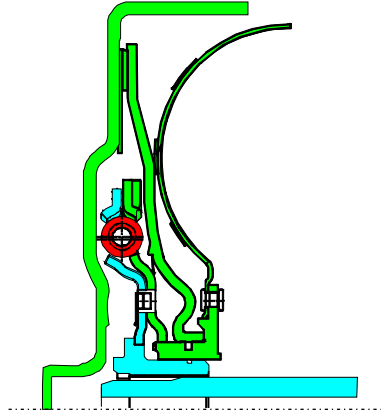


Figure 16: Mode de fonctionnement de l'amortisseur LuK à "bi-fonctions"

La construction de l'amortisseur LuK "à bi-fonctions" permet d'obtenir les résultats suivants:

- La rigidité de l'amortisseur étant montée en série avec celle de l'arbre d'entrée de boîte, il en résulte une caractéristique ressort très souple, ce qui était d'ailleurs l'objectif recherché.
- La turbine est solidaire du carter du convertisseur (pompe), et joue donc le rôle d'une masse tournante supplémentaire, ce qui limite les acyclismes de régime transmis à la chaîne cinématique.
- Le couplage rigide des masses d'inertie du moteur, de la pompe et de la turbine réduit d'une unité le degré de liberté de la chaîne cinématique.

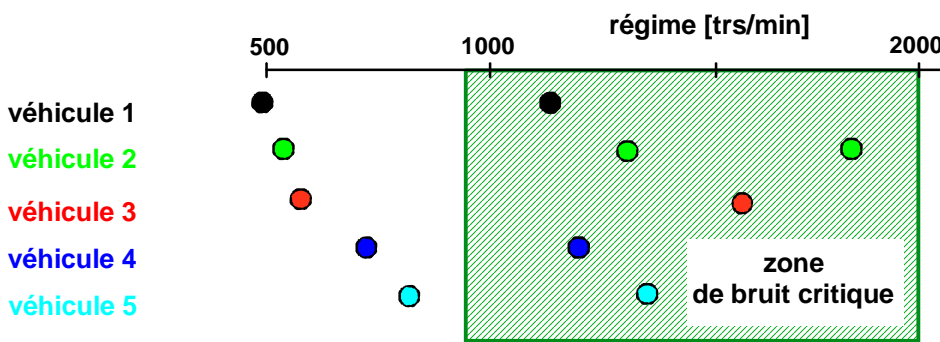
La troisième fréquence propre de la chaîne cinématique peut cependant toujours poser problème lorsqu'elle se situe dans la gamme de régime critique, à savoir entre 900 1/mn et 2000 1/mn. Des simulations effectuées à partir de valeurs standard pour la chaîne cinématique ont montré que

cela se produit sur des véhicules à traction avant équipés de moteurs à 8 et 10 cylindres, ainsi que sur des véhicules à propulsion arrière équipés de moteurs à 6 et 8 cylindres. Les premiers sont plutôt rares, les seconds par contre sont très courants. L'amortisseur "à deux voies" présente donc pour la plupart de ces véhicules des avantages indiscutables.

Afin d'éliminer la troisième fréquence propre, qui d'ordinaire pose problème, il est possible d'effectuer le pontage plus tôt, ce qui ne représente aucun inconvénient pour le confort de conduite et permet, dans le cas des véhicules considérés ici, de réaliser une économie de carburant de l'ordre de 6% dans certain cas.

A la figure 17 sont représentées les fréquences vibratoires propres de la chaîne cinématique sur différents véhicules à propulsion arrière, tous équipés de la même boîte automatique et du même convertisseur. Chaque point du diagramme correspond donc à un point de résonance dans la chaîne cinématique, potentiellement générateur de vibrations et de bruit. On compare les fréquences vibratoires propres telles qu'elles apparaissent avec un amortisseur classique d'une part, et avec un amortisseur "à deux voies" d'autre part. On s'aperçoit qu'avec l'amortisseur "à deux voies" un seul point de résonance apparaît dans toute la zone critique de régime, cette résonance restant d'ailleurs sans conséquence étant donnée la faible hystérésis de l'amortisseur. Notons également que l'amortisseur classique présente dès 15Nm/degré une caractéristique ressort beaucoup plus faible que l'amortisseur "à deux voies" à 45 Nm/degré. Cela implique un volume d'encombrement plus réduit pour l'amortisseur "à deux voies".

résonnances de la chaîne cinématique avec un amortisseur conventionnel
raideur: $c = 15 \text{ Nm/Grad}$



résonnances de la chaîne cinématique avec un amortisseur bi-fonctions
raideur: $c = 45 \text{ Nm/Grad}$

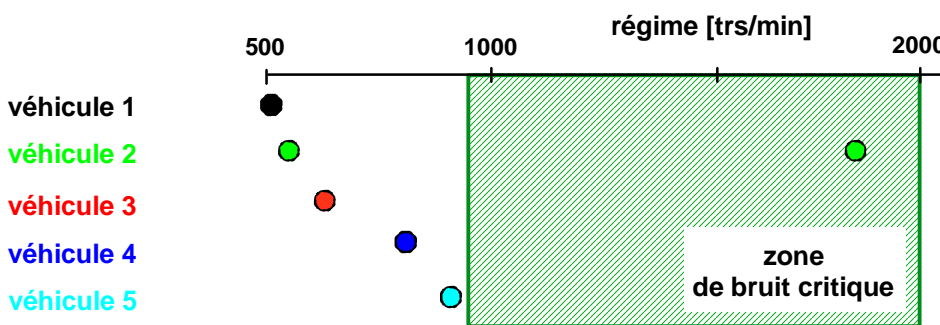
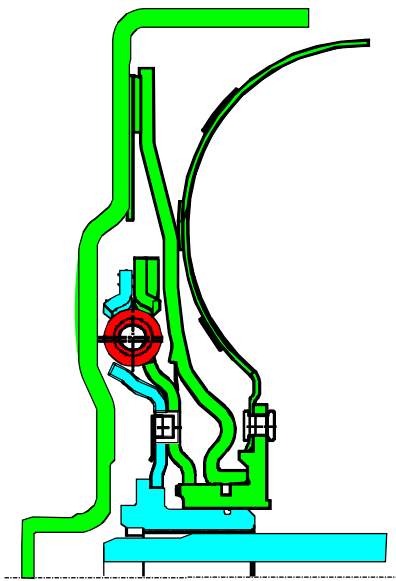


Figure 17: Elimination des résonnances critiques dans la chaîne cinématique grâce à l'amortisseur LuK à „bi-fonctions”

Il faut également tenir compte du fait que dans le cas de l'amortisseur “à deux voies”, le couple passe par l'amortisseur même lorsque le convertisseur est dépointé, si bien que là encore on dispose d'une isolation vibratoire supplémentaire. Ce n'est pas un avantage négligeable, étant donné que sur certains types de véhicules, à injection directe par exemple, un bourdonnement peut se produire alors que le convertisseur est dépointé.

Remarquons enfin que l'amortisseur LuK “à deux voies” se prête tout à fait à une utilisation combinée avec la CVT, et ce en raison de la répartition particulière des masses d'inertie dans ce cas.

Les avantages de l'amortisseur LuK "à deux voies" sont résumés figure 18.



avantages

- consommation réduite grâce à un pontage à bas régime
- meilleure isolation par élimination d'une fréquence propre
- en action en mode déponté

Figure 18: Avantages de l'amortisseur LuK à "bi-fonctions"

Le convertisseur à profil extrêmement mince

Nous l'avons dit au début de cet exposé, le futur convertisseur devra être plus petit, plus léger et coûter moins cher (fig.9).

Il n'existe pas de possibilité connue, ou alors très limitée, de réduire géométriquement le circuit de flux hydrodynamique sans procéder en même temps à une modification de la forme des pales. Les convertisseurs de ce type sont sujets à des phénomènes de cavitation ou ne présentent pas un profil de charge acceptable (capacité de transmission du couple) rapporté à la conversion de régime.

Il s'agit donc d'adapter les aubes de la pompe, de la turbine et du stator aux nouvelles données géométriques qu'implique un convertisseur à profil très étroit. Il convient en l'occurrence d'accorder une attention particulière non seulement aux phénomènes de cavitation, qui sont à éliminer, mais également au profil de charge:

- Pour ne pas avoir à augmenter, en valeur relative, le diamètre du profil du convertisseur, il faut disposer d'un niveau de charge suffisant.
- Pour réduire les pertes d'énergie à l'arrêt, le niveau de charge en mode de fonctionnement freins bloqués doit être le plus bas possible. Le pontage s'effectue en revanche plus confortablement et peut même se produire plus tôt si la charge est la plus élevée possible dans la zone du point d'embrayage. On réduit ainsi également la sollicitation thermique du système de pontage. De ces deux constatations on peut déduire que le rapport entre la charge au point de fonctionnement freins bloqués et la charge au point de couplage doit être le plus petit possible.

Cela est d'autant plus facilement réalisable que la conception du futur convertisseur, en combinaison avec la stratégie de pontage adéquate, n'est plus assujettie à des impératifs de consommation ou de performances. Des critères tels qu'un rendement maximal élevé ou un niveau élevé de conversion de couple, encore primordiaux pour les convertisseurs classiques, sont ici d'importance secondaire. On peut donc se concentrer plus efficacement sur l'objectif recherché. La figure 19 résume les spécifications du futur convertisseur.

objectifs principaux

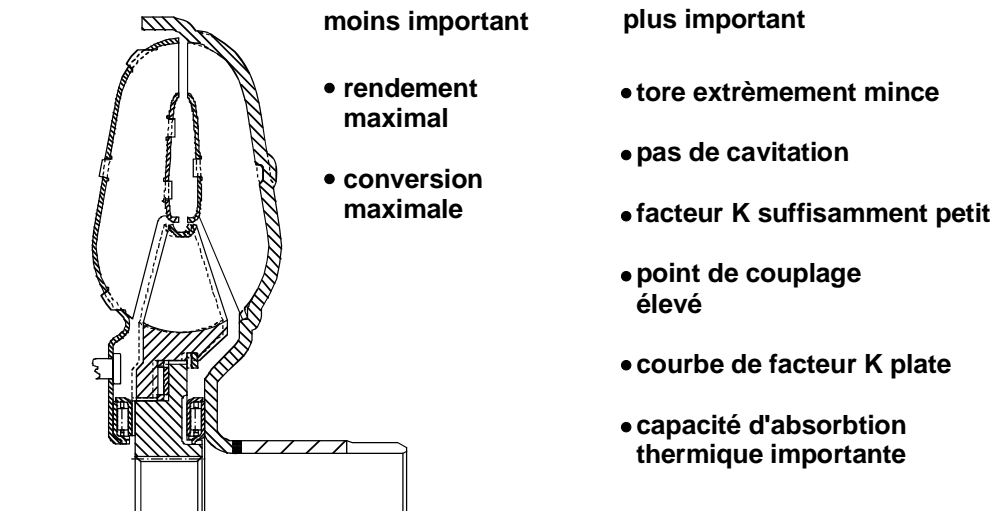


Figure 19: Spécifications du futur convertisseur

LuK a développé un convertisseur extrêmement étroit, d'un encombrement axial réduit de 45% en comparaison des modèles circulaires classiques. Le profil de charge rapporté à la conversion de régime est comparable à celui d'un convertisseur de coupe circulaire (cf. fig.24). Le développement d'un tel modèle n'aurait pas été possible sans le recours à des outils appropriés, tels que par exemple des logiciels puissants pour le calcul numérique du comportement du flux hydraulique à l'intérieur du convertisseur et la définition géométrique des pales, de même qu'un programme de conception rapide de prototypes qui nous a permis d'établir rapidement et à coût raisonnable la géométrie complexe des prototypes de turbines à aubes.

Le comportement du flux hydraulique à l'intérieur du convertisseur est particulièrement critique en régime de calage (freins bloqués) et lorsque la conversion de régime est faible. C'est là que le transfert d'énergie au niveau de la pompe et de la turbine, de même que l'inversion de flux au niveau du stator (changement d'impulsion) sont les plus importants. Pour simplifier, disons que c'est à ce moment là que les forces s'exerçant sur les particules de fluide sont les plus importantes. La situation devient nettement plus critique lorsque le flux hydraulique est "inutilement" poussé en volume ou subit des inversions de sens accélérées, qui peuvent être éventuellement ponctuelles sur son parcours, mais que les particules de fluide ne peuvent suivre en raison de leur inertie. Un convertisseur extrêmement étroit est susceptible de poser ce problème si l'on ne prend pas de mesure préventive au niveau de la construction.

La figure 20 présente une comparaison du comportement du flux hydraulique dans le circuit d'un ancien modèle de convertisseur (premier stade de développement) et dans celui du nouveau modèle optimisé. La coupe médiane du convertisseur ancien modèle présente déjà une forme en goutte d'eau. C'est le moyen de s'assurer que la coupe réelle du canal de circulation de flux restera à peu de chose près constante et d'éviter ainsi d'inutiles accélérations ou ralentissements du flux hydraulique. La cartographie de la vitesse révèle toutefois une importante zone de décrochage, qui part du bord d'entrée de la turbine et s'étend le long de toute la limite intérieure du canal de flux (coque interne).

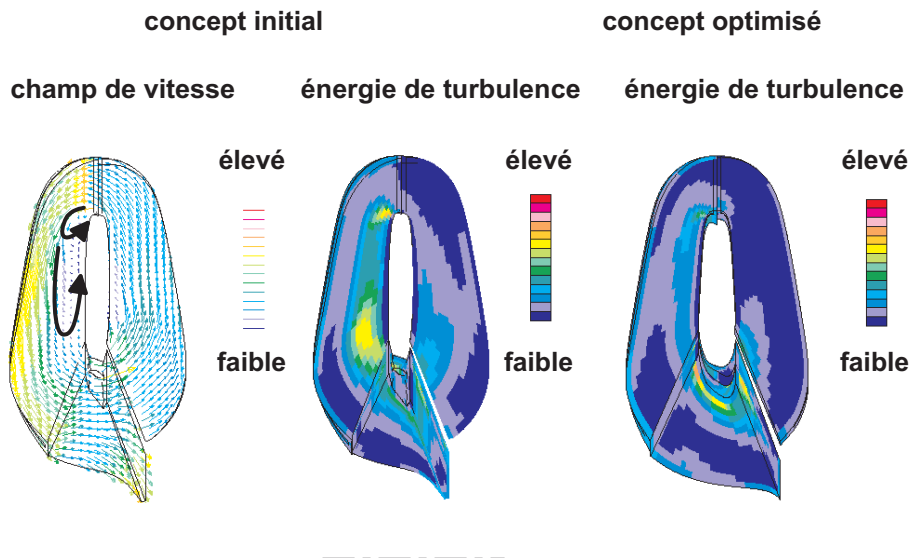


Figure 20: Construction optimisée de la turbine

Cette zone de décrochage resserre considérablement le canal de circulation de flux et entraîne une réduction du volume de flux hydraulique, réduisant ainsi la charge. Il se forme en outre une zone d'échange au niveau de laquelle s'effectue un transfert d'énergie du flux de circulation efficace vers le flux de circulation de la zone de décrochage, où cette énergie est dissipée à quasiment 100%. On peut tout à fait visualiser cette zone de perte particulièrement importante à l'aide de l'énergie des turbulences.

Pour optimiser le parcours du flux de circulation, on a réussi à réduire nettement la zone de décrochage et les pertes qu'elle engendre grâce à une forme étudiée de la coque interne et des pales, ce qui du même coup améliore considérablement la caractéristique de charge.

Mais la construction d'un convertisseur aussi étroit pose surtout un autre problème, autrement plus difficile à résoudre, à savoir le phénomène de cavitation. Il s'agit de la présence dans le flux hydraulique de cavités gazeuses qui apparaissent pour imploser ensuite.

Si la pression statique absolue du flux hydraulique est inférieure à la tension de la vapeur, il se forme des bulles de vapeur qui sont emportées par le flux. Ces cavités obturent le passage du canal et réduisent le volume de flux en circulation, provoquant ainsi une forte diminution de la charge et du rendement. Les bulles de vapeur implosent ensuite aux endroits où la pression statique est plus élevée. L'implosion est extrêmement rapide et les particules de fluide s'écrasent avec une très grande vitesse sur la paroi du canal ("jet-impact"), ce qui peut provoquer des dégâts mécaniques au niveau du rotor.

Dans le cas des convertisseurs, c'est dans la zone d'aspiration de la pompe, située entre la pompe et le stator, que la pression est la plus faible. Pour maintenir la pression statique à la sortie du stator au niveau le plus élevé possible, il faut réduire les pertes de profil au niveau du stator. La figure 21 illustre le comportement du flux hydraulique dans le canal d'un ancien modèle de stator (premier stade de développement). La coupe du cylindre fait nettement apparaître une zone de décrochage sur le dos de la pale du stator. On observe en outre de fortes turbulences de flux à la sortie du stator. Ces deux phénomènes font considérablement chuter la pression dans le canal et à la sortie du stator (cf fig.21 et fig.23). Dans le cas de cet ancien modèle, la présence de cavités dans la zone d'aspiration interdisait donc de faire fonctionner la pompe du convertisseur, à régime d'entraînement élevé, en-dessous d'un niveau de conversion de régime de $sr=0,5$.

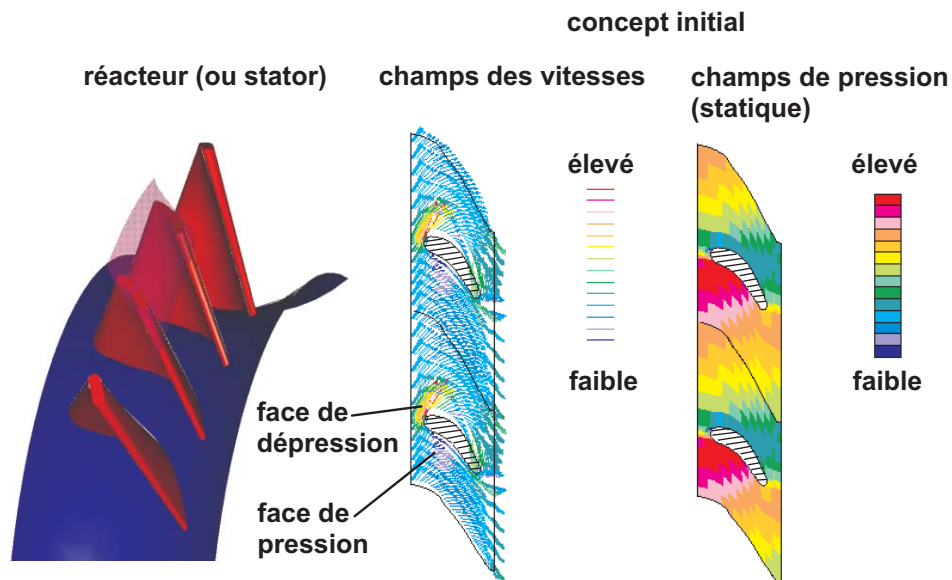


Figure 21: Cartographie du flux et zones de pression statique sur des pales de stator non optimisées

La figure 22 représente la cartographie de la vitesse et les zones de pression statique observées sur un stator de construction optimisée. La zone de décrochage apparaissant sur le dos de la pale du stator est nettement plus réduite que dans le cas de l'ancien modèle. De même, le flux à la sortie du stator ne subit quasiment aucune turbulence. On limite ainsi la chute de pression au niveau du stator et relève du même coup le niveau de la pression à l'entrée de la pompe.

Pour évaluer la qualité du transfert d'énergie, on propose à la figure 23 une cartographie générale comparative des zones de pression observées sur l'ancien modèle et sur le modèle optimisée. En comparant les coefficients de perte mesurés sur les deux profils, on constate que l'optimisation du stator permet de réduire de plus de 60% les pertes de profil.

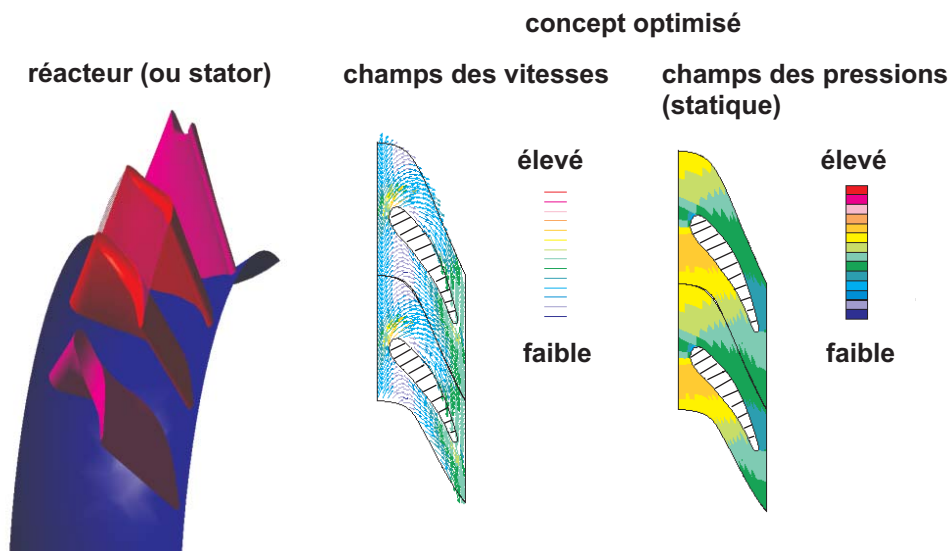


Figure 22: Cartographie de la circulation du flux hydraulique et des zones de pression statique sur des pales de stator après optimisation

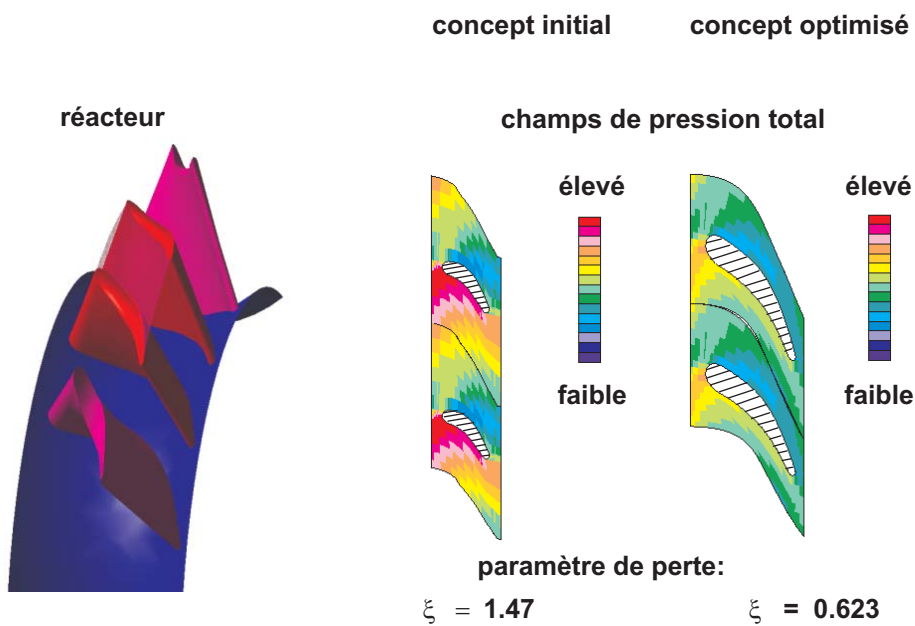


Figure 23: Etude comparative des pertes de profils; stator ancien modèle et modèle optimisé

La construction optimisée du convertisseur à profil étroit permet d'éliminer complètement le phénomène de cavitation. La qualité du transfert d'énergie est à peu de chose près équivalente à celle obtenue avec un convertisseur classique de coupe circulaire (fig.24). Sur le plan fonctionnel, l'utilisation de ce convertisseur à profil très étroit, combiné avec une stratégie de pontage adéquate, ne présente aucun inconvénient.

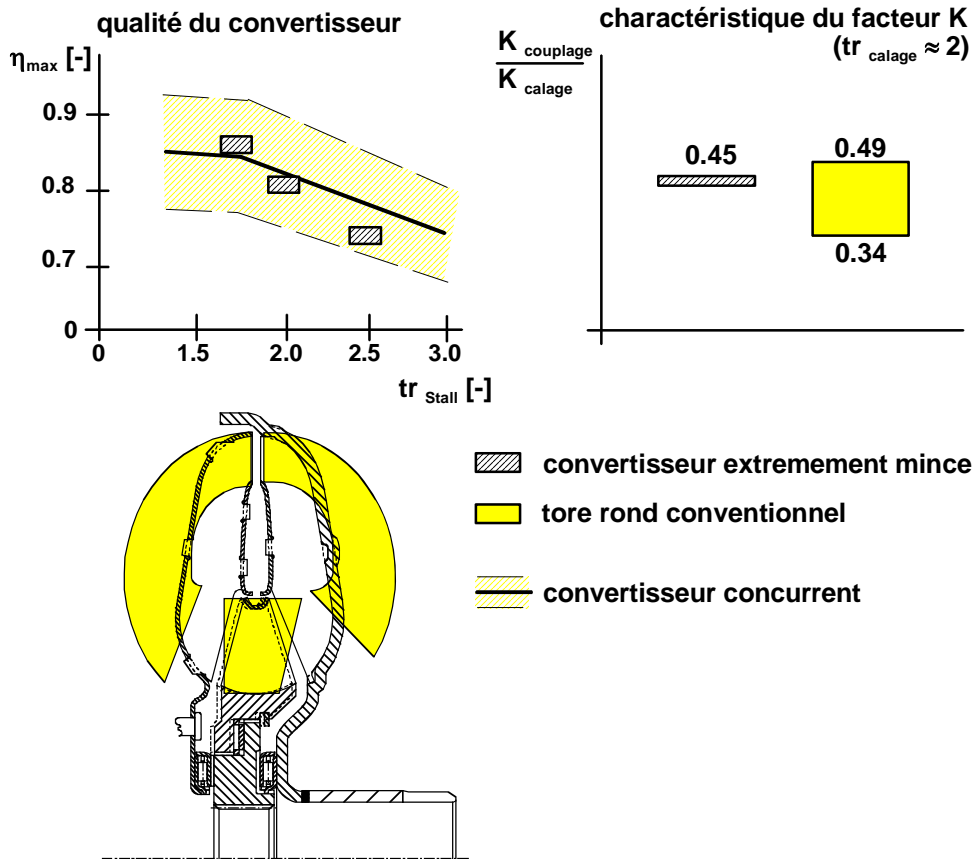


Figure 24: Etude comparative de la qualité du transfert d'énergie; convertisseur classique de coupe circulaire et convertisseur LuK à profil très mince

Le modèle optimisé à profil étroit permet en outre de réaliser, par rapport à l'ancien modèle de coupe circulaire, un gain de l'ordre de 20 à 25% en termes de poids et d'encombrement, selon le mode de mise en place et le type de système de pontage utilisé (fig.25 et 26). Le volume d'encombrement ainsi libéré peut être utilisé pour la construction de la

boîte de vitesses ou permettre de raccourcir la chaîne cinématique du véhicule.

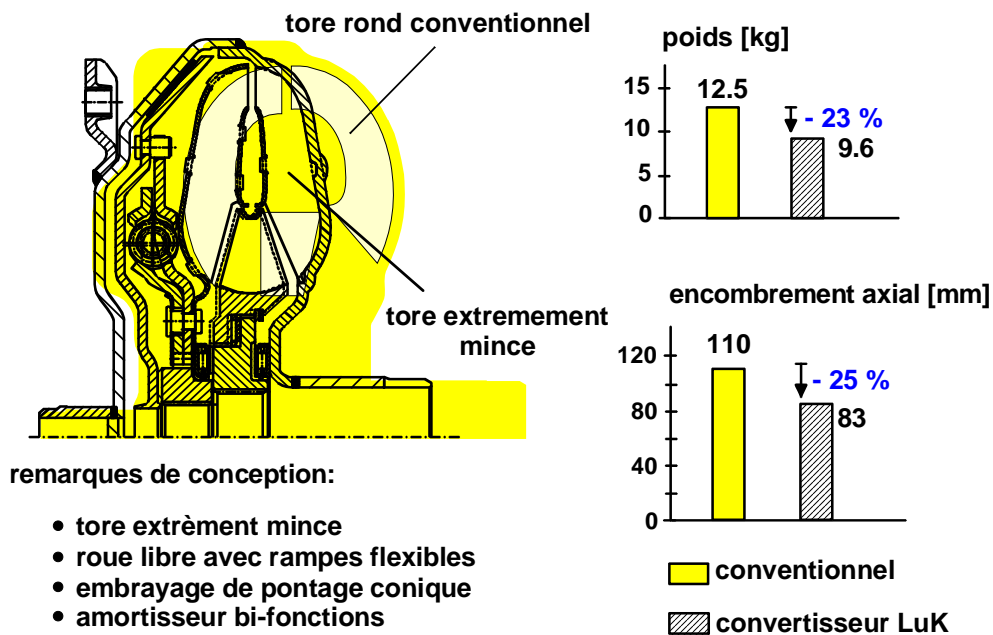


Figure 25: Etude comparative des volumes d'encombrement (2); convertisseur classique de coupe circulaire et convertisseur LuK à profil mince équipé d'un amortisseur à "bi-fonctions" et d'un système de pontage cône

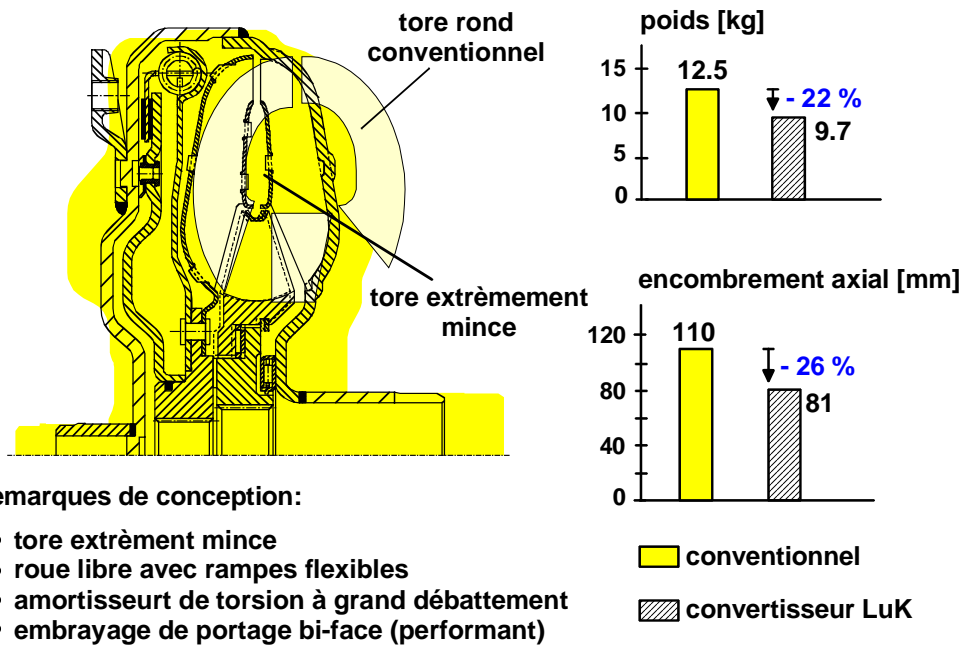


Figure 26: Etude comparative des volumes d'encombrement (1); convertisseur classique de coupe circulaire et convertisseur LuK à profil mince équipé d'un amortisseur grand angle et d'un embrayage à double surface de frottement

Afin de réduire les coûts de fabrication, LuK a poursuivi le développement du convertisseur et a amélioré quelques détails importants au niveau de la construction:

- Economie en matériaux du fait de l'utilisation d'un tore extrêmement étroit.
- Utilisation d'une roue libre axiale à rampes.
- Stators moulés par injection avec fonctions intégrées.
- Encoches étirées ou embouties pour la fixation des pales.
- Réduction du nombre de pales.
- Emploi de nouveaux procédés de fabrication
- Utilisation de moyeux frittés.
- Réduction des phases d'usinage.

Résumé

L'évolution des techniques modernes d'entraînement, la nécessité d'augmenter les performances, de réduire la consommation et les émissions polluantes, la diminution constante du volume d'encombrement disponible, obligent aujourd'hui, dans le cadre de la conception des nouveaux convertisseurs, à opter pour une approche radicalement différente.

Il convient en effet d'avoir une approche globale du convertisseur et de ses trois composants que sont le système de pontage, l'amortisseur et la circulation de flux hydrodynamique, et de considérer le système dans son ensemble. La stratégie de la commande de pontage, en tant qu'articulation essentielle entre ces trois éléments, doit faire l'objet d'une attention particulière. L'exploitation efficace du potentiel du système à convertisseur requiert une mise au point précise de la stratégie de commande en fonction des spécificités de chaque véhicule, ainsi que l'utilisation de pièces mécaniques répondant exactement aux spécifications définies pour chaque cas.

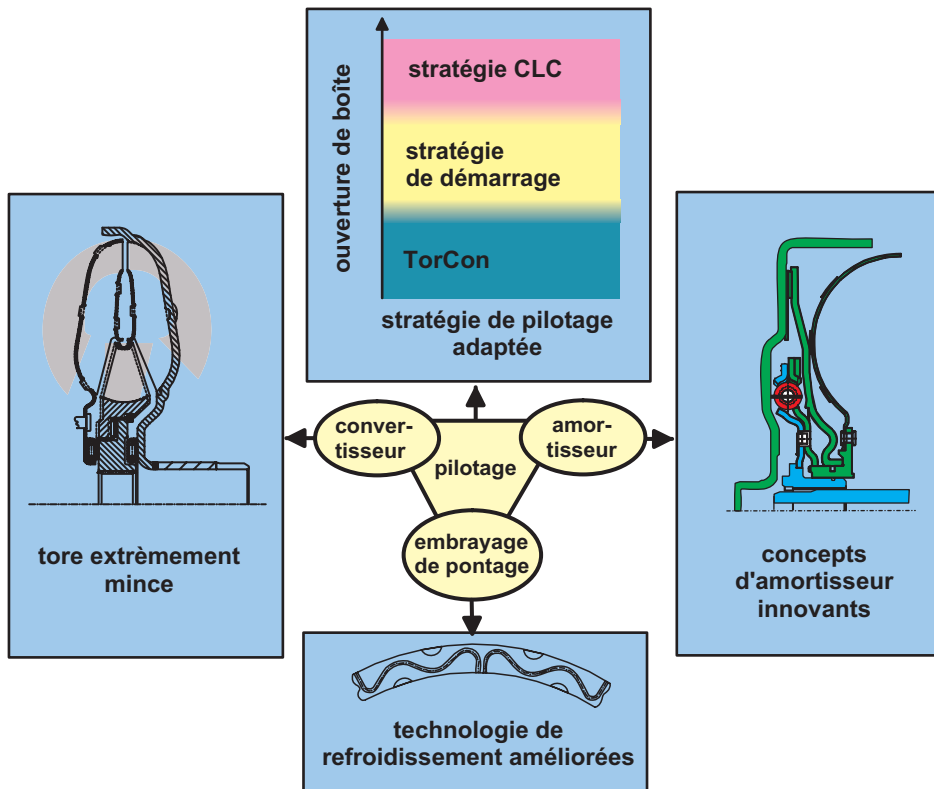


Figure 27: le système à convertisseur de couple - résumé

L'exploitation pertinente de ce potentiel permet selon les cas une diminution de la consommation et une amélioration des performances de l'ordre de 10%. Les modèles de convertisseurs développés par LuK (cf fig.27) permettent effectivement d'exploiter ce potentiel. On réalise en outre des économies substantielles en termes de coûts de fabrication, de poids et de volume d'encombrement.

Documentation

- [1]. Dr. tech. R. Fischer, Dipl.-Ing. D. Otto: Les systèmes de pontage à convertisseur; Quatrième colloque international LuK 1994, "Confort et économie", p 85 sq.
- [2]. Dr. techn. R. Fischer: Le système TorCon - un nouveau concept de système de pontage à convertisseur, pour une conduite économique et plus agréable; Publication VDI n° 1175, "Boîtes de vitesses pour véhicules 1995", p. 301 sq.
- [3]. Dave Piper: Automatic Transmissions - An American Perspective; Publication VDI n° 1175, "Boîtes de vitesses pour véhicules 1995", p. 25 sq.

