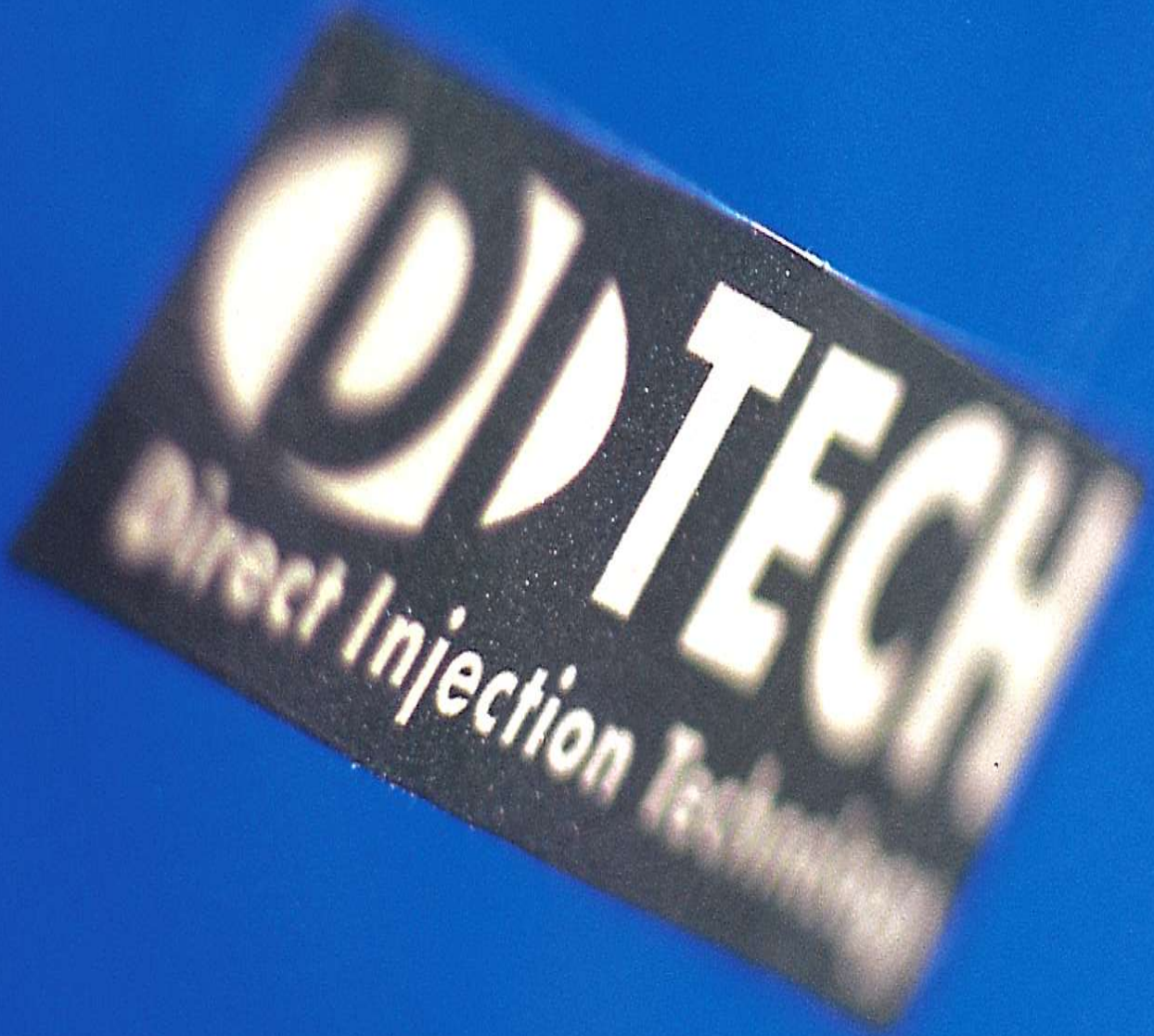




TPE 1°: **L'INJECTION DIRECTE SUR MOTEURS 2 TEMPS**

Quel système serait susceptible de relancer le moteur 2 temps?

I. Le moteur 2 temps

- 1/ Principe de fonctionnement
- 2/ Qualités
- 3/ Inconvénients

II. Comprendre les enjeux

- 1/ Notion de consommation spécifique
- 2/ Pourquoi l'injection directe sur moteur 2 temps?

III. Historique des recherches menées entre 1950 et 1980

- 1/ Les premières réalisations allemandes dans les années 50
 - a) Le contexte éco et les besoins qui en découlent
 - b) La technologie employée et les résultats obtenus
 - c) La crise économique met fin à toute recherche dans le domaine
- 2/ Le regain d'intérêt pour l'injection sur moteurs 2 temps dans les années 70
 - a) Motobécane précurseur
 - b) Les recherches internationales

IV. Le point sur les systèmes les plus aboutis

- 1/ Injection directe pneumo-assistée 1° partie: Le système Piaggio FAST
- 2/ Injection directe pneumo-assistée 2° partie: les systèmes IAPAC et SCIP
- 3/ L'injection directe impulsive: le système Ficht
- 4/ Le système Bimota
- 5/ Le système Orbital asDI

V. Vers la résurrection du moteur 2 temps?

- 1/ La frilosité des constructeurs
- 2/ La frilosité des consommateurs
- 3/ La nouvelle génération de moteurs 2T

VI. Annexe

- 1/ Le moteur 4T
- 2/ Les pots de détente
- 3/ Le diagramme de distribution

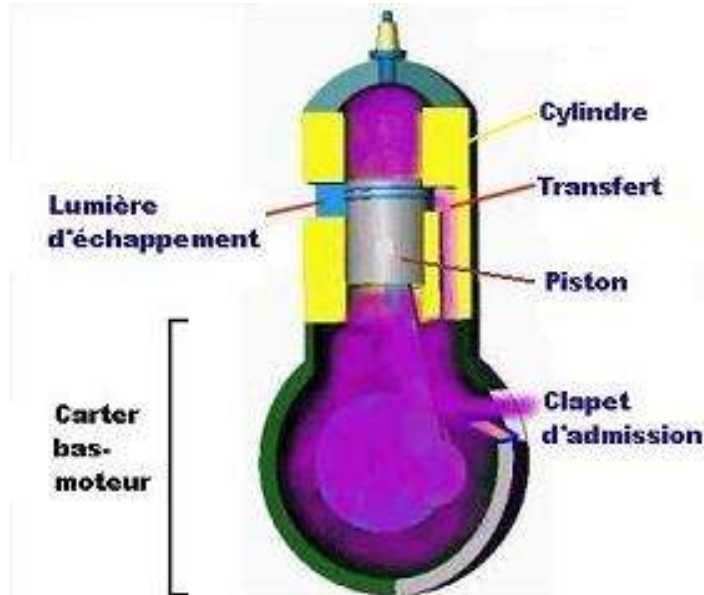
LE MOTEUR 2 TEMPS



PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Le moteur 2 temps fonctionne selon un cycle comparable à celui d'un moteur 4 temps (voir annexe 1): il comporte les mêmes phases que celui-ci, c'est à dire admission-compression-explosion-échappement, à la différence près qu'elles sont regroupées deux par deux.

Cela est rendu possible par l'utilisation à la fois de la face supérieure du piston, mais aussi de sa paroi inférieure.



Le premier temps moteur a lieu lors de l'ascension du piston dans le cylindre, tandis qu'un mélange air/essence a déjà été admis précédemment.

On distingue deux phases simultanées: l'admission et la compression.



Lors de sa course montante, le piston comprime le mélange admis lors du cycle précédent (action de la paroi supérieure du piston) tandis qu'il se crée une dépression dans le carter bas-moteur qui provoque l'ouverture du clapet d'admission (action de la paroi inférieure du piston). Les gaz frais sont donc admis dans le bas-moteur, et pour une part commencent à entrer dans les transferts: il y en a généralement trois ou cinq, mais un seul est représenté ici.

La combustion du mélange air/essence issu du cycle précédent entraîne une forte hausse de pression et de température à l'intérieur de la chambre de combustion, et la descente du piston dans le cylindre.



Le piston découvre d'abord la lumière d'échappement, par où s'engouffrent les gaz brûlés. De plus sa descente entraîne la compression des gaz admis dans le carter bas-moteur, et une fois les transferts découverts par le piston, ceux-ci entrent à leur tour dans le cylindre en «poussant» les gaz brûlés dans la lumière d'échappement, c'est le **balayage**. Le piston remonte ensuite, les gaz admis sont comprimés et de nouveaux entrent dans le carter, et le cycle recommence.

LES QUALITES DU MOTEUR 2 TEMPS

Ce type de motorisation présente bien des avantages: encombrement et poids réduits comparé à un 4 temps de même cylindrée, simplicité et donc coûts de fabrication réduits.

De plus la puissance et/ou le couple développés par un moteur 2 temps sont bien supérieures à ceux d'un 4 temps de même cylindrée.

Enfin, les sensations ressenties par le pilote sont bien plus grisantes qu'avec un 4 temps, grâce aux montées en régime très franches et l'arrivée soudaine de la puissance passé un certain seuil, rendent ce type de motorisation attachante.

SES INCONVENIENTS

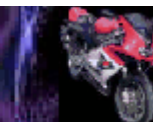
Un moteur 2 temps traditionnel pollue beaucoup plus qu'un moteur 4 temps de même puissance. Ceci est dû à la mauvaise combustion à bas régimes et au balayage qui a lieu lorsque la lumière d'échappement et les transferts sont découverts en même temps par le piston: pour pouvoir repousser tous les gaz brûlés, une partie des gaz frais partent également dans l'échappement. L'utilisation de pots de détente (voir annexe 2) et leur optimisation au cours de ces dernières années ont permis de réduire ces pertes, mais pas encore suffisamment. De plus le fait que l'huile de lubrification soit présente dans le mélange air-essence, et donc brûlée elle aussi, participe à la production de gaz polluants.

Sa consommation est aussi plus élevée que celle d'un moteur 4T de même puissance, car les rendements thermique et volumique sont inférieurs à ceux d'un 4 temps, respectivement à cause de pertes d'énergie sous forme de chaleur et le fait que le volume de gaz admis n'atteint jamais le volume total disponible dans le cylindre.

On peut aussi noter un ralenti peu stable, et une faible disponibilité à bas régimes.

Enfin, sur les moteurs 2 temps dont la puissance spécifique (c'est à dire celle que le moteur aurait si il cubait un litre) peut-être très élevée, avec environ 280ch/l pour un bon modèle routier et 420ch/l pour un moteur de compétition, soit environ deux fois plus que pour un moteur 4 temps, l'entretien doit être plus fréquent et la mécanique faire l'objet de plus de soins de la part de l'utilisateur. La présence de lumières entraîne une usure plus rapide des segments, les pièces métalliques assurant l'étanchéité piston/cylindre, qui viennent buter contre les arêtes des lumières.

L'objectif du développement de moteurs 2 temps à injection directe est de conserver les qualités de ce type de motorisation tout en réduisant fortement, voire en supprimant ses inconvénients.



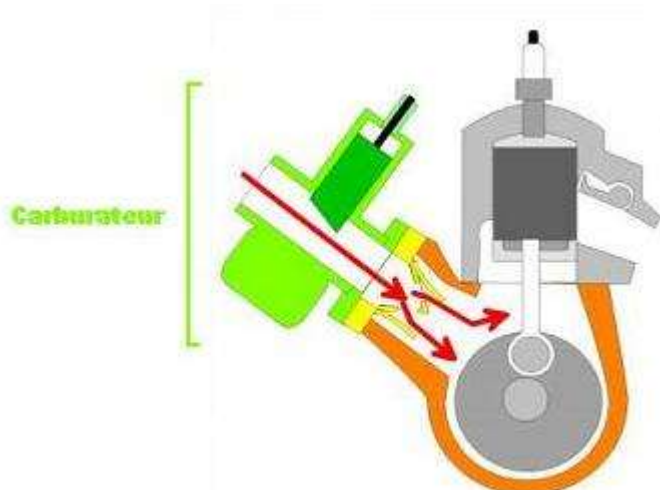
NOTION DE CONSOMMATION SPECIFIQUE

Il s'agit de la masse de carburant consommée par un moteur qui fournit une puissance d'un cheval pendant une heure. Elle s'exprime en g/cv.h. Un moteur 2 temps classique a presque toujours une consommation spécifique supérieure à 300g/cv.h.

POURQUOI L'INJECTION DIRECTE SUR MOTEURS 2 TEMPS ?

Pour commencer, il faut bien comprendre ce qu'est l'injection directe.

L'admission des gaz frais, en amont du clapet d'admission, se fait traditionnellement grâce à un carburateur.



L'air et l'essence sont donc déjà mélangés plus ou moins homogènement avant d'entrer dans le carter moteur, et à plus forte raison dans le cylindre.

A cela plusieurs avantages: si le carburateur, la pipe d'admission, le carter et les transferts (notamment leurs parois), sont bien étudiés, on obtient un mélange bien homogène dans le cylindre; on évite les petits «tas» d'essence qui brûlent mal, la combustion est plus efficace et au final la puissance délivrée par le moteur est optimale.

Par contre, tout se fait mécaniquement: la proportion d'essence dans l'air d'admission est déterminée par les réglages du carburateur, qui ne sont optimisés que pour diverses plages de régime et d'ouverture de la poignée de gaz (dans le cas d'une moto). De plus une fois arrivés dans le carter moteur, les gaz d'admission se heurtent au vilebrequin, à l'embiellage, souvent à la partie inférieure de la jupe du piston lorsque celui-ci est proche du PMB (point mort bas), puis suivant la conception du moteur, à divers obstacles venant de la forme du carter lui-même. Il n'est donc pas rare qu'une partie de l'essence contenue dans le mélange se dissocie de l'air et s'agglomère. Si elle finit par rejoindre le reste du mélange air/essence grâce aux nombreuses turbulences qui règnent dans le carter, c'est sous la forme de ces petits "tas" nuisibles à la combustion et qui, en brûlant mal, entraînent une hausse des émissions gazeuses nuisibles à l'environnement, en plus de nuire à l'efficacité du moteur.

Pour éviter ces désagréments, certains constructeurs ont recours à l'injection directe d'essence dans le haut moteur, grâce à un ou plusieurs injecteurs judicieusement placés dans le cylindre ou la culasse, comme sur le système Orbital:



L'injection directe permet de ne faire circuler que de l'air et souvent de l'huile dans le carter moteur, et ainsi d'effectuer le balayage sans perte d'essence imbrûlée dans l'échappement. Un système abouti permet de n'injecter que le strict nécessaire d'essence dans le cylindre, et ainsi d'avoir un contrôle total de la quantité d'essence admise ainsi que du rapport air/essence du mélange, réduisant ainsi la consommation. Il est possible de faire varier la quantité de gaz admis en fonction d'une foule de paramètres, comme la température moteur, la température extérieure, le régime de rotation, la pression atmosphérique et celle régnant dans la boîte à air, le rapport engagé, les émissions polluantes déjà émises, la consommation instantanée de carburant, etc...

En contrepartie, il devient plus difficile d'envoyer assez d'essence par rapport à la quantité d'air admise, notamment à des régimes de rotation élevés où les temps d'admission sont très courts. Nous verrons dans une prochaine partie les solutions trouvées par différents constructeurs ou bureaux d'étude...

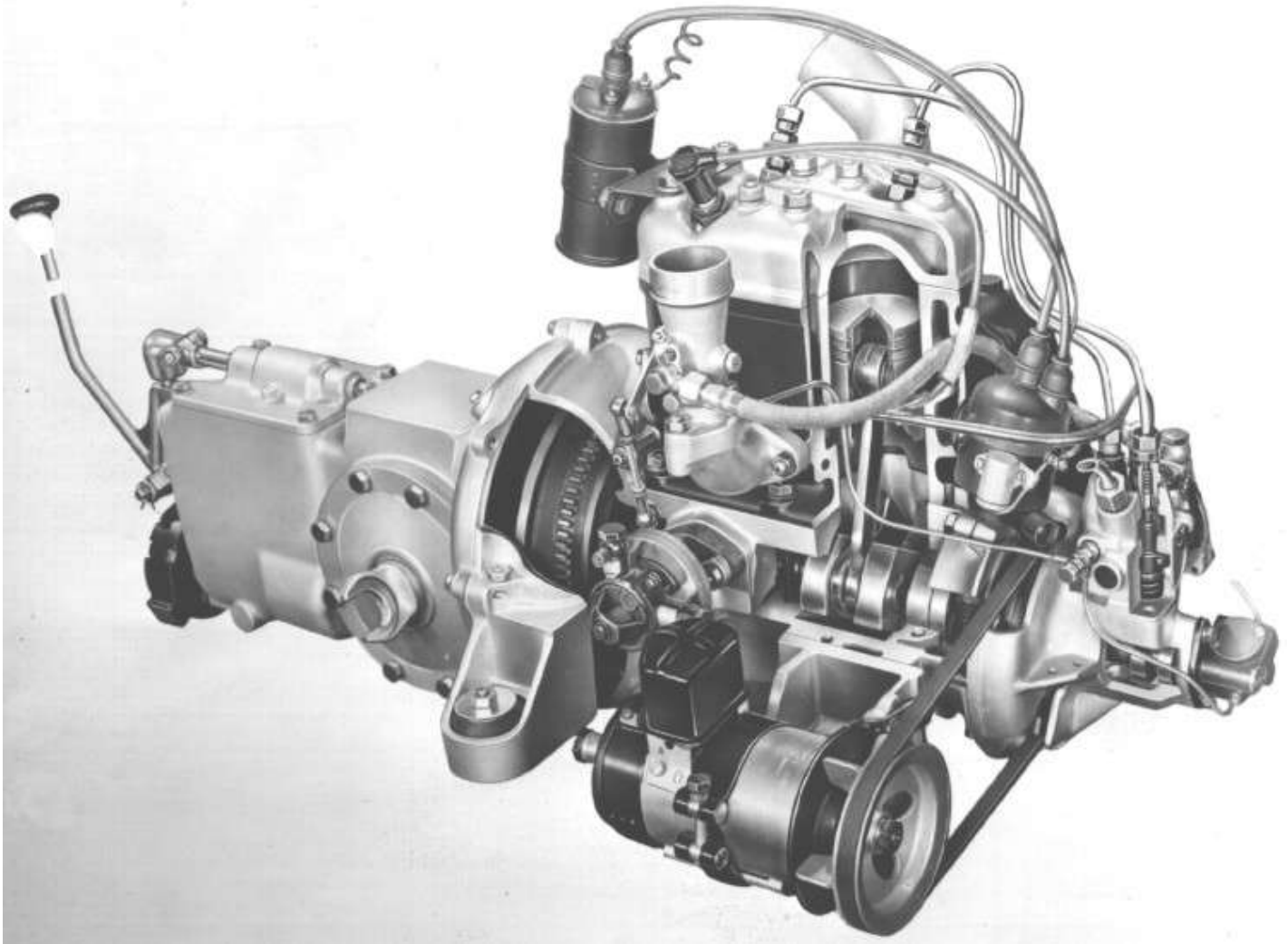
HISTORIQUE DES RECHERCHES MENEES

Les premières réalisations allemandes dans les années 50

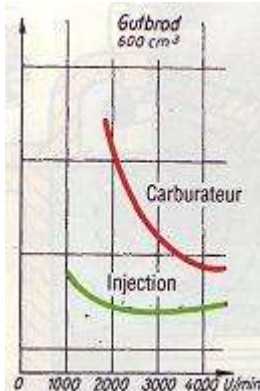
Suite à la deuxième guerre mondiale, l'Allemagne est appauvrie. Le besoin d'avoir des véhicules peu coûteux et à faible consommation se fait sentir. Le moteur 2 temps ayant un faible coût de production, mais sa consommation restant plutôt élevée, des recherches ont été menées afin de faire baisser la consommation d'essence.

En exploitant l'expérience acquise durant la seconde guerre mondiale lors de la conception de moteurs d'avions, quelques constructeurs ont développé des moteurs deux temps à injection directe adaptés aux automobiles, parmi lesquels Goliath et Gutbrod.

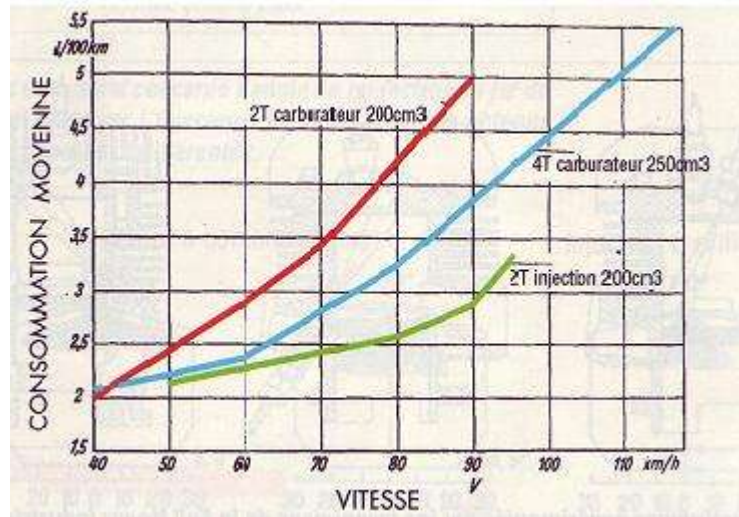
Il s'agissait de propulseurs avec des régimes de rotation faibles et des puissances spécifiques peu élevées. Toutefois le passage à l'injection permet aussi une augmentation de la puissance. Ainsi le bicylindre Gutbrod «Superior» de 600cc, vit sa puissance passer de 22 à 27CV, grâce à l'adoption de l'injection directe.



De plus sa consommation spécifique a grandement diminué :



Dans le domaine motocycliste, NSU a obtenu des résultats intéressants. On peut voir ici les graphes de consommation spécifique sur route de deux versions (à carburateur et à injection) du moteur NSU Lux à deux temps de 200cc et un de 250cc à quatre temps :



Malgré les résultats obtenus, la grave crise économique touchant l'Allemagne dans les années 50 fit s'effondrer les entreprises comme Gutbrod et Goliath, et mit fin à toute recherche dans le domaine, pendant une vingtaine d'années.

La reprise des recherches dans les années 70

Motobécane fut le précurseur de l'injection électronique appliquée à la moto : après avoir effectué des essais sur un monocylindre 2 temps de 125cc, ils développèrent un 3 cylindres 2 temps de 500cc à injection directe à basse pression dérivé d'un 350cc à carburateurs.

Les injecteurs étaient à solénoïde, c'est à dire qu'un petit piston venait percuter l'essence arrivant vers le cylindre pour l'envoyer efficacement, en face de la lumière d'échappement, et ainsi profiter d'un balayage mieux contrôlé qu'avec une admission classique par carburateurs. Même s'il ne s'agissait que d'un prototype, il consommait déjà entre 30 et 40% moins que la version 350cc à carburateurs, et l'émission d'hydrocarbures a été fortement réduite.

Malheureusement, le prototype équipé de ce moteur possédait un « trou » à l'accélération, entre 2000 et 3000tr/min, ce qui est peu agréable au quotidien, et inadmissible sur un moteur à injection qui devrait justement ne pas connaître ce type de désagréments, du fait du contrôle plus poussé de l'admission et de la combustion du mélange...



Le système de gestion de l'envoi de carburant était constitué d'un disque plastique à transparence variable, et d'un système de lecture optique.

De nombreuses expérimentations ont également été menées au Japon et en Allemagne dans les années 70, portant sur la position et le nombre d'injecteurs dans le cylindre, ainsi que la forme de la chambre de combustion.

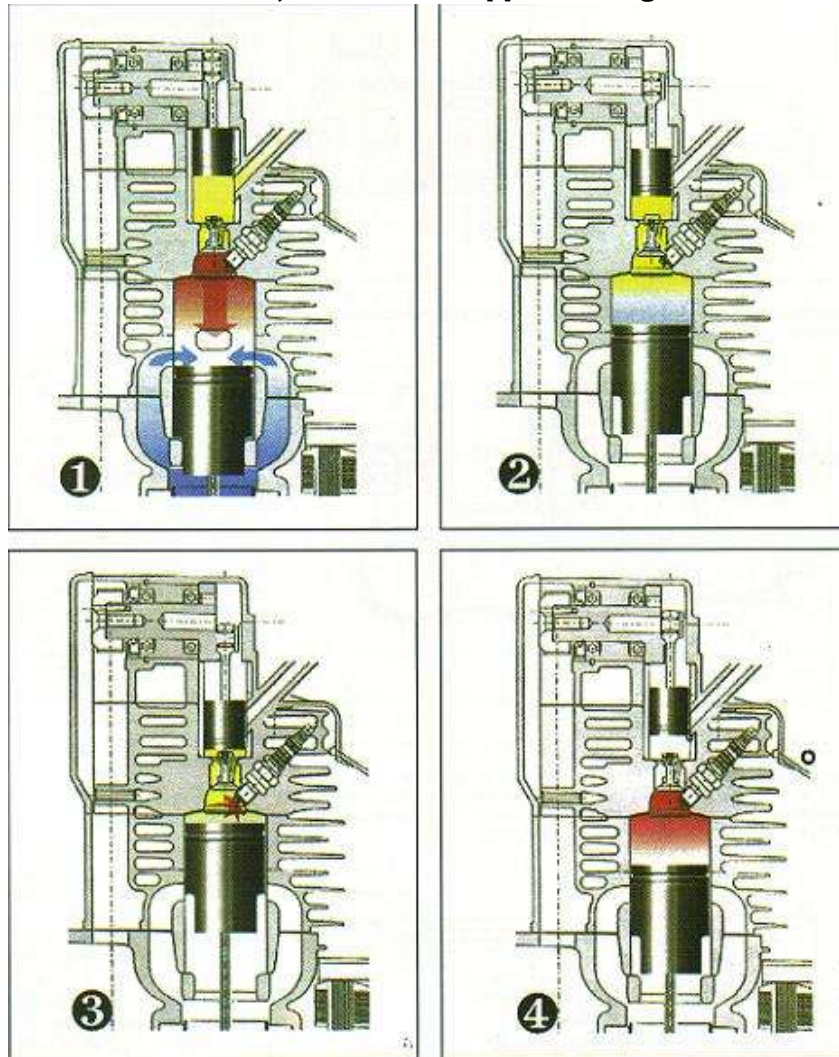
En Autriche, ce sont plutôt des systèmes d'injection indirecte qui ont été testés, avec l'injecteur placé dans le carter d'embiellage, dirigé vers l'intérieur du piston, permettant son refroidissement et la vaporisation de l'essence par échange thermique.

C'est également à cette période que d'importantes recherches ont été menées en Italie, chez Piaggio, comme nous allons le voir par la suite.



L'injection directe pneumo-assistée 1° partie : le système Piaggio FAST

Il s'agit d'un système dont le concept remonte aux années 70, et qui se caractérise par une simplicité de fonctionnement extrême, sans aucun appareil de gestion électronique.



On utilise un second ensemble piston-cylindre-villebrequin situé par-dessus le groupe propulseur pour injecter un mélange air-essence très riche dans le cylindre rempli d'air (admis de façon traditionnelle):

La "pompe" est entraînée par le villebrequin, et une soupape permet l'étanchéité entre les deux "chambres". Le mélange air-essence se fait par carburateur, l'électronique se limite donc à la gestion de l'avance à l'allumage...

S'il est clair que la conception et la fabrication d'un moteur de ce type sont peu coûteux (pas d'injecteur électronique ni de centrale de gestion, de capteurs dans tous les sens etc), le surpoids entraîné par l'ajout de la pompe, fait déjà perdre une qualité au 2 temps: sa légèreté. Toutefois les résultats obtenus au niveau de la consommation et des émissions polluantes compensent largement ce léger défaut, et sont au niveau de systèmes plus sophistiqués:

- 80% d'hydrocarbures émis**
- 35% de consommation en moins**

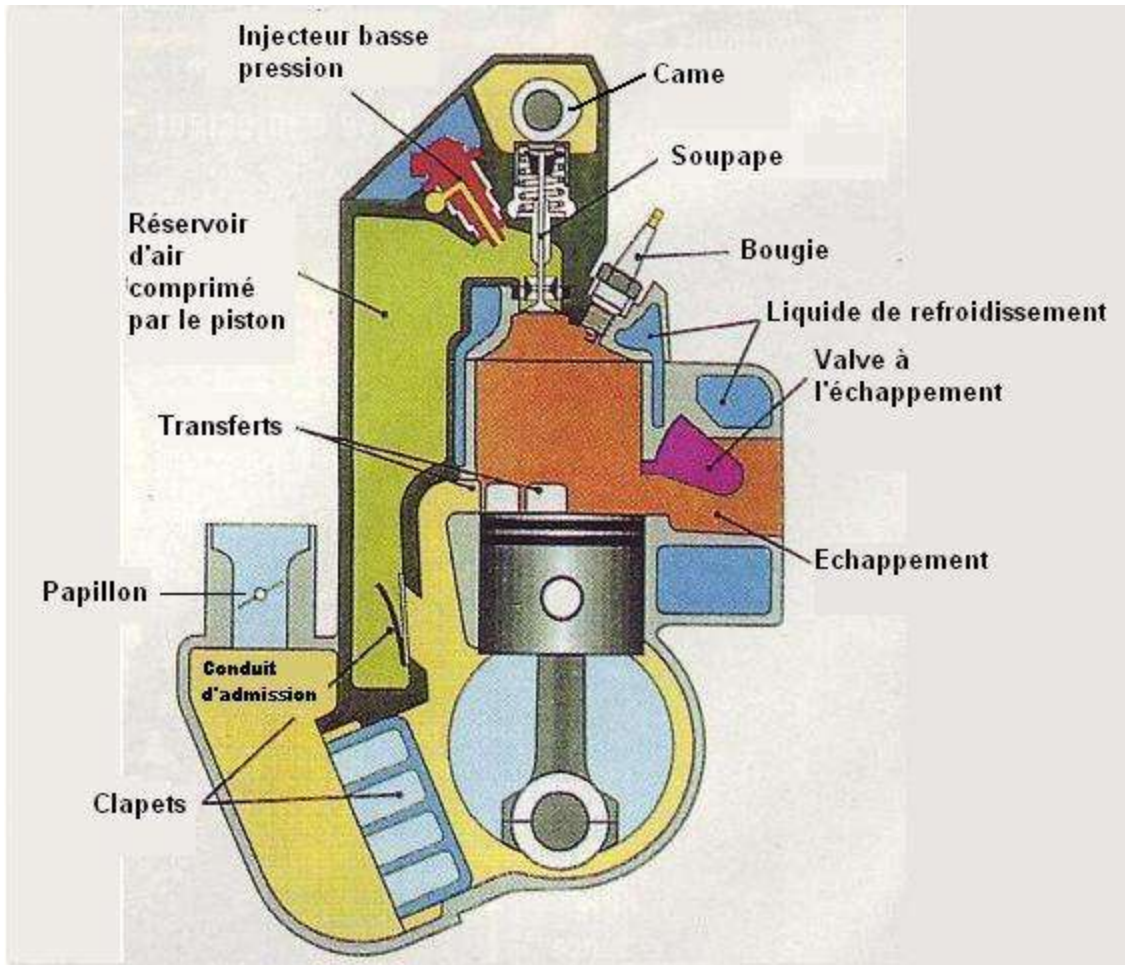
Ces données viennent de tests effectués sur un monocylindre 50cc.

Les excellents résultats obtenus sont dus à la stratification de la charge, c'est à dire le fait d'envoyer un mélange très riche en essence (celui de la pompe) dans un environnement très pauvre (celui du cylindre), et d'avoir un mélange homogène globalement pauvre en essence, comparé à l'ancien idéal du mélange stoechiométrique: 14.7 volumes d'air pour un volume d'essence.

Aucun véhicule produit en série n'a été équipé de ce système.

L'injection directe pneumo-assistée 2° partie: le système IAPAC

Si l'injection pneumatique peut-être réalisée très simplement, elle peut aussi se révéler très complexe, comme c'est le cas avec le prototype avancé par l'Institut Français du Pétrole au début des années 90:



Ici, tout est contrôlé! Le volume d'air admis est dosé par un papillon laissant plus ou moins passer l'air, en fonction de son inclinaison. Ce système est secondé par un clapet d'admission, ce qui est assez curieux. Peut-être ferme-t-on le papillon après que la descente du piston ait provoqué la fermeture du clapet, pour disposer d'une réserve d'air à la prochaine ouverture du clapet, et ainsi compenser l'inertie des gaz.

Quoiqu'il en soit, lors de la descente du piston, l'air comprimé est envoyé dans les transferts, comme sur un 2T classique, à la différence près qu'une partie de l'air est récupérée dans un réservoir situé derrière le cylindre, grâce à des clapets, encore (on adore les clapets à l'IFP!), tandis qu'une autre partie est admise directement dans le cylindre.

Dans le réservoir, en vert sur le schéma, on injecte de l'essence de manière à obtenir un mélange très riche, retenu dans le réservoir par une soupape fermée et qui, une fois ouverte par la came, laissera s'échapper les gaz qui iront se mélanger à l'air présent dans le cylindre; ici aussi, on utilise donc la stratification, avec les mêmes effets.

Enfin, on fait varier la durée d'échappement (voir annexe 3) grâce à une valve.

Arbre à came en tête, soupape, cela n'appartient pas au vocabulaire technique habituel de ce genre de motorisation, il ne s'agit donc plus d'un "simple" 2T.

On imagine, de plus, la grande difficulté de conception d'un tel prototype, notamment au niveau du "réservoir", et plus particulièrement lors de la séparation de l'air, qui doit pour partie rejoindre le cylindre, et pour une autre entrer dans le réservoir, ce qui a probablement nécessité un gros travail de mise au point au niveau des dimensions des transferts et des clapets, de la rigidité de ceux-ci, de plus il est important de conserver une bonne pression dans le "réservoir"...

On peut aussi penser que les temps d'injection sont très réduits, puisque toute l'essence doit être envoyée avant que la soupape ne s'ouvre, pour pouvoir, enfin, reprendre un cycle normal.

Pour rappel, sur un 2T traditionnel (ainsi que les autres 2T à injection directe étudiés dans ce dossier), le mélange arrive directement "tout prêt" depuis le bas-moteur, et n'a qu'à être comprimé lors de la montée du piston, puis à brûler. Ici, tout doit donc se passer très vite! Ce système paraît donc inadapté aux hauts-régimes d'une moto (les dernières 600cc sportives prennent entre 14 et 15.000 tr/min, de série, mais en général la zone rouge débute autour de 10.000 trs/min sur une moto "moyenne"), mais plutôt à un gros scooter, éventuellement un gros trail docile (comme le 650 DR dont nous avons étudié la suspension arrière en cours de cinématique... :P), ou bien l'automobile!

Le moteur 2 temps sur 4 roues, cela peut faire sourire, mais nous avons vu dans la partie précédente que cela a déjà existé, et nous verrons plus tard que le IAPAC n'est pas le seul système ayant intéressé de gros constructeurs automobiles.

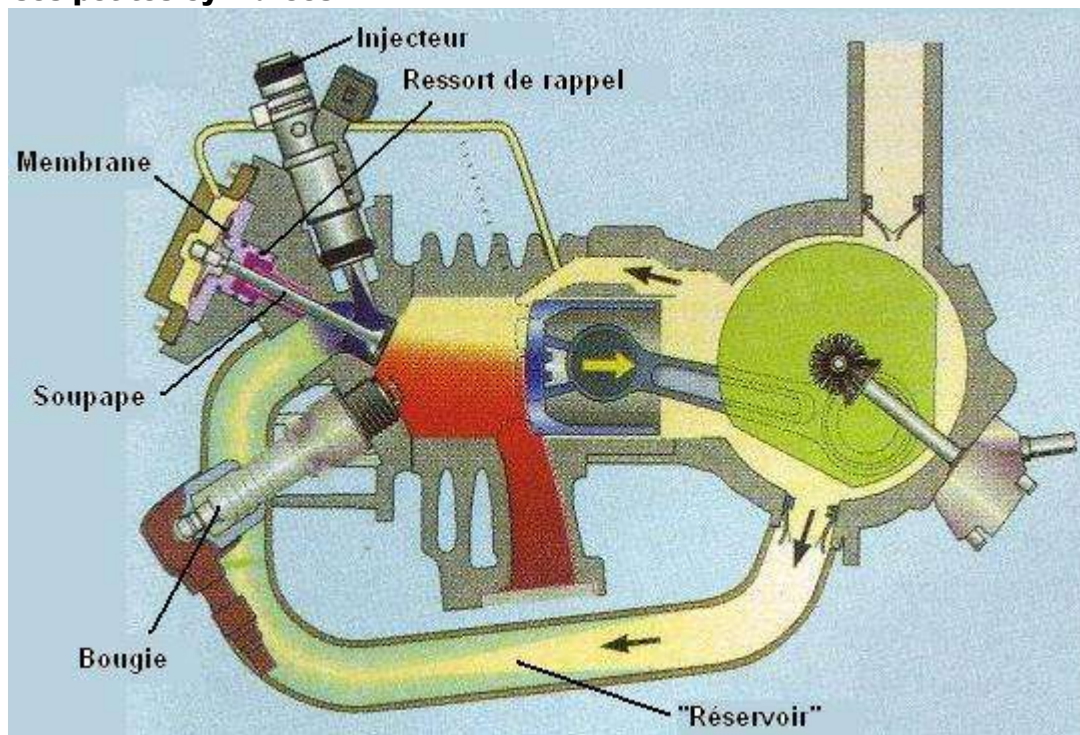
En effet cette technologie a été développée en collaboration avec PSA, au début des années 90; toutefois elle n'a jamais dépassé le stade du prototype (sur une base de scooter Piaggio 125cc), malgré des résultats exceptionnels, probablement les meilleurs jamais atteints: 99% de réduction de CO et 97% pour les hydrocarbures! Si on pouvait jusque là avoir des doutes sur les capacités réelles de ce système très (trop?) compliqué, ils peuvent être balayés. L'équipe française a réussi à faire tourner correctement un tel moteur, ce qui semble déjà relever de l'exploit, et se paye en plus le luxe d'atomiser la concurrence!

Malheureusement, le mieux étant l'ennemi du bien, les constructeurs ont préféré se tourner vers des systèmes certes moins efficaces mais bien plus simples et moins onéreux, comme nous allons le voir avec les prochaines études.

C'est la raison pour laquelle une version moins complexe a vu le jour.

Le système SCIP (Simplified Camless IAPAC)

Développé en 2000 en collaboration avec Suzuki, souhaitant conserver des motorisations 2 temps pour ses petites cylindrées.



Ici, un seul but: simplifier au maximum le IAPAC, tout en conservant ses qualités.

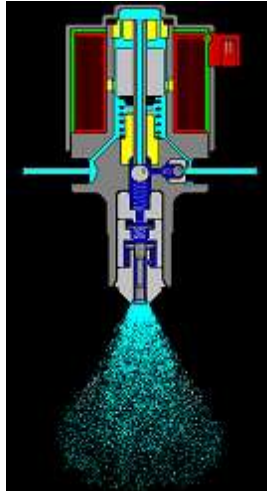
L'arbre à came a été remplacé par une membrane, s'abaissant lorsque la pression régnant dans la chambre qui la contient est suffisante pour contrer l'action du ressort de rappel.

La durée et le moment d'ouverture de la soupape sont fonction des dimensions du tuyau servant à acheminer une petite partie de l'air admis dans le carter vers la "chambre SCIP", ainsi que de la rigidité de la membrane. Curieusement, la membrane s'abaisse lorsque le piston monte; à première vue nous pensions au contraire que l'augmentation de pression se faisait lors de la descente du piston...

Peut-être y a-t-il un mouvement d'air qui nous échappe et qui permet le bon fonctionnement du système. Pour le reste, tout se passe comme sur le IAPAC "traditionnel".

L'injection directe impulsive: le système Ficht

De son vrai nom Ram Injection, ce système a été développé en Allemagne par la société Ficht à partir de 1988, et est utilisé depuis 1995 par plusieurs fabricants de moteurs hors-bord tels que OMC et Johnson, ainsi que sur des motoneiges Kawasaki et des jet-skis Polaris depuis 2000. Aujourd'hui, on trouve une gamme de moteurs allant de 75 à 250 chevaux produits sous la marque Evinrude, appelé E-Tec. Ce système est dit "impulsif" car il utilise des injecteurs particuliers:



Ils sont équipés d'un petit piston qui, en phase de montée (grâce à des ressorts), permet l'arrivée de l'essence dans le corps de l'injecteur, puis qui est "lancé" par un électro-aimant et vient percuter l'essence après une courte course à vide lui permettant d'acquérir une vitesse élevée, afin de diffuser le carburant dans le moteur à une pression pouvant varier entre 25 et 65 bars, à plus de 100 cycles à la seconde si nécessaire, avec une pulvérisation de grande qualité... la quantité d'essence injectée dépend de l'énergie cinétique transmise au piston par l'électro-aimant, contrôlé par un microprocesseur.

Une vidéo montrant ce type d'injecteur en action est disponible sur <http://www.ficht-online.com/e ffi.htm>

Ficht annonce une consommation de carburant réduite de 30% (ceci les plaçant donc au niveau des 4T sur ce point), ainsi qu'une réduction de 85% des émissions d'hydrocarbures par rapport à un moteur 2 temps classique sans recourir à un catalyseur.

Des tests menés sur un scooter équipés de cette technologie se sont révélés concluants, mais n'ont pas été suivis d'une application en série dans le domaine motocycliste...

Des comparaisons ont été menées entre les gros V6 marins d'Evinrude (2T à injection), Yamaha (4T à injection) et Honda (4T à injection, distribution variable), développant tous une puissance maxi de 225ch, et ont démontré un net avantage au moteur 2 temps, sur tous les fronts:

- Une puissance supérieure sur toute la courbe moyenne de puissance par rapport aux moteurs Honda et Yamaha (respectivement 30 et 40ch maximum)
- Respectivement 22 et 40% de couple en plus à bas régime que les moteurs Honda et Yamaha
- Respectivement 33 et 35kg de moins que les moteurs Honda et Yamaha

De plus la version 200ch du V6 2T Evinrude est, selon l'USEPA (l'Agence américaine de Protection de l'environnement), celui qui dégage les plus faibles émissions en hydrocarbures, en oxyde d'azote et en monoxyde de carbone, lorsque comparé à tous les moteurs 200 ch 4T de la concurrence. Les moteurs 2T Evinrude sont d'ores et déjà conformes aux normes anti-pollution les plus sévères du monde, celles du CARB (Agence californienne de la Gestion de l'air).

Enfin, ce système est adaptable sur des moteurs déjà existants, et préserve les qualités du moteur 2 temps traditionnel, à savoir son caractère, son rendement et sa simplicité, même s'il s'avère plus "sophistiqué" que le FAST.

Le système Bimota

1997 fut l'année où le premier constructeur mondial de motos, Honda, annonça son abandon de toute recherche dans le domaine des motorisations 2 temps. Cette décision surprit beaucoup à l'époque, le constructeur japonais ayant présenté quelques mois auparavant un scooter 2T équipé de l' ARC (pour Activated Radical Combustion), un procédé qui utilise une petite partie des gaz brûlés pour lancer la prochaine combustion par auto-allumage, lorsque le moteur évolue à bas régime. En effet, à cause du mauvais balayage à bas régimes, une partie de l'essence admise dans le cylindre n'est pas brûlée lors de la combustion entraînée par l'étincelle fournie par la bougie. L'auto-allumage, phénomène destructeur sur un 2 temps classique, est ici parfaitement contrôlé grâce à une valve à l'échappement ajustant la pression à l'intérieur du cylindre, permet de brûler complètement tous les gaz frais présents dans celui-ci, et ainsi de réduire les émissions d'hydrocarbures imbrûlés de 80%, d'oxydes d'azote de 90% et de CO₂ de 15%. Cette technologie a été testée avec succès sur une moto de rallye-raid, l'EXP-2:



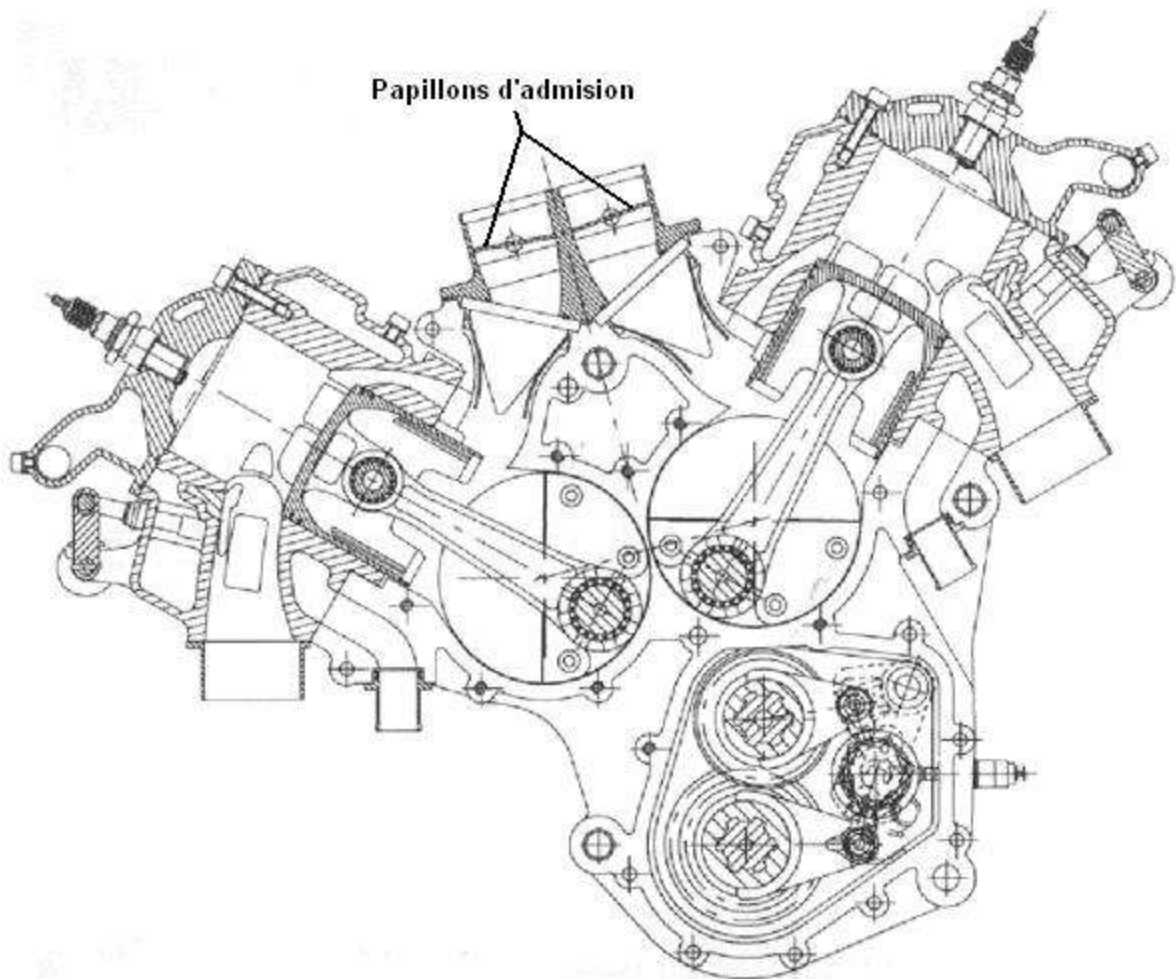
C'est donc le contraste entre ces excellents résultats, positionnant à l'époque Honda comme le probable leader du 2 temps du futur, et le pessimisme des déclarations faites par M.Chauvet, alors patron de la filiale française de Honda ("Nous avons fait le tour de toutes les technologies et nous estimons qu'il n'est plus possible d'aller au-delà en matière de moteur 2 temps", "la technologie qui devra être mise en jeu pour répondre à leurs exigences [des normes européennes] et le coût de fabrication de ces moteurs 2 temps seront tels qu'ils ne pourront rivaliser avec les 4 temps") ont alors choqué les aficionados de ce type de motorisation, ainsi que les autres constructeurs japonais.

Il fallait plus que ce qui peut être considéré comme un coup de bluff de la part d'une firme qui a toujours souhaité imposer le 4T pour démonter les constructeurs européens.

1997 fut donc également l'année où la première moto 2 temps à injection directe fut construite en série. Il s'agit de la Bimota V-Due 500:



C'est, bien sûr, à sa motorisation que nous allons nous intéresser. Il s'agit donc d'un V2 à injection directe, relativement "classique" par rapport à ce que nous avons pu voir précédemment.



Sur ce schéma, rien ne permet de distinguer le moteur de la V-Duc d'un 2 temps traditionnel à carburateurs, mis à part la présence de papillons au-dessus des boîtes à clapets. Il y a, en réalité, deux injecteurs par cylindre, situés en face de la lumière d'échappement:



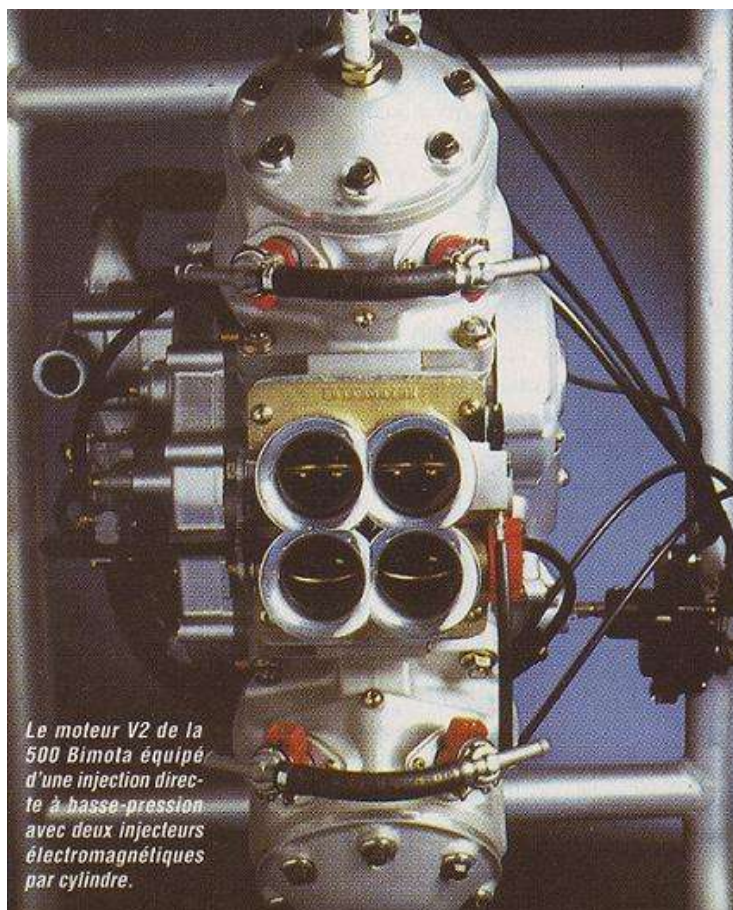
Ici, le balayage se fait uniquement avec de l'air, sans aucune goutte d'huile de lubrification, comme c'est le cas avec tous les autres moteurs 2 temps, à carburateurs ou à injection. Nous reviendrons sur ce point plus tard.

Ce système s'appuie sur beaucoup sur l'effet des "pots de détente" présenté en annexe 2, autant qu'un moteur à carburateurs. En effet la position des injecteurs n'est pas due au hasard, les ingénieurs italiens ont cherché à profité du balayage au maximum, pour favoriser la propagation de l'essence. Pour éviter qu'une partie de l'essence ne s'échappe dans l'échappement,

entraînant des émissions polluantes, le moment et la durée d'injection sont gérés électroniquement, et tiennent compte du retard du début de l'arrivée de l'essence.

A bas régimes, l'injection se produit lorsque le piston commence à recouvrir la lumière d'échappement, pour éviter justement les pertes d'essence. En revanche, à haut régimes, on profite du retour d'onde venant du pot de détente qui est dans son "régime de résonance", c'est à dire la régime moteur où son effet se fait sentir et dépendant du diagramme de distribution (annexe 3) et de la forme de la ligne d'échappement en elle-même (notamment l'angle formé par les cônes et la longueur des différentes parties qui la constituent). Cette onde permet de maintenir les gaz frais qui servent au balayage dans le cylindre.

Comme sur le IAPAC, les papillons d'admission sont associés à des clapets, et obturent plus ou moins les conduits d'admission pour contrôler le débit d'arrivée d'air:



(image Moto Technologie n°21)

Finalement, ce qui démarque vraiment ce moteur, c'est son système de lubrification qui se rapproche un peu de ce qui se fait en 4T: même si ici l'huile ne "barbote" pas dans le bas-moteur, elle circule de petites canalisations ou des trous pratiqués dans le vilebrequin, le bielle, les roulements... cela permet de ne pas ajouter d'huile dans l'air admis, et ainsi d'avoir une combustion plus efficace, moins de rejets polluants, et évite de devoir faire le plein d'huile régulièrement...

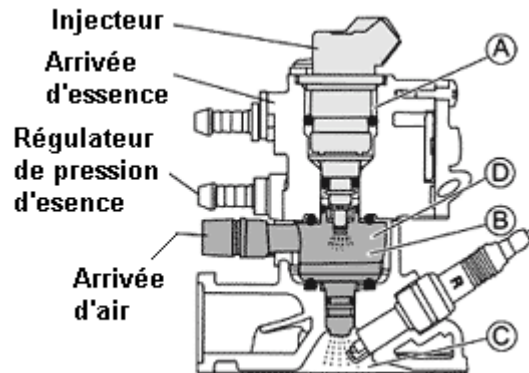
Malgré toutes ses qualités, ce moteur a cruellement manqué de mise au point, le petit constructeur italien n'ayant pas eu les moyens (et peut-être la compétence?) de le finaliser correctement. Ratés du système d'injection, capteurs défaillants, mauvais choix technologiques (par exemple les 2 injecteurs par cylindre qui ne sont pas gérés individuellement), problèmes d'ouverture et de fermeture des valves à l'échappement, mauvaise fiabilité due à l'original système de lubrification... le détail des soucis rencontrés et de leurs solutions sont visibles (en anglais) sur http://www.bikelogic.com/Converts/Bimota_Vdue_Report_Final_Web.htm, le site d'un préparateur spécialisé dans les systèmes d'injection, et qui fait partie de ceux qui ont poursuivi les recherches de Bimota pour faire de la V-Due une machine fiable, puissante et agréable à piloter, tout en passant les normes anti-pollution. Malheureusement, l'échec commercial de la V-Due a enterré Bimota, du moins jusqu'à récemment, même si des modèles à carburateurs plus fiables ont été produits pendant un petit moment...

Aujourd'hui la Bimota V-Due n'est disponible qu'au compte-goutte, en version à carburateurs.

Le système Orbital

Il s'agit de la dernière technologie que nous allons étudier, l'unique système utilisé en deux-roues, pour le moment seulement sur des scooters 50cc, de marque Aprilia, Piaggio, Gilera et Peugeot.

Son succès est simple à comprendre: les ingénieurs australiens ont su conserver l'essence même du moteur 2 temps, tout en le rendant compatible avec les préoccupations actuelles de préservation de l'environnement. Résultat: on obtient des moteurs de petite cylindrée à la fois relativement simples, économiques, performants, sobres et respectueux de l'environnement. Que demander de plus?



On retrouve ici des techniques vues précédemment, telles que le balayage effectué avec de l'air uniquement ainsi que la stratification.

L'essence, portée à une pression de 2.5 bars par une pompe se situant sous le réservoir de carburant, arrive en A dans le corps de l'injecteur, qui le vaporise dans une chambre B, où il est mélangé à une petite quantité d'air préalablement mise sous pression (5,5 bars) grâce à un compresseur entraîné par le vilebrequin, pour obtenir un mélange très riche en essence, admis dans la chambre de combustion C par un second injecteur.

Là, une bougie produit une forte étincelle permettant, grâce à la forme spéciale de la chambre de combustion dans le haut de laquelle le mélange est d'abord confiné, de propager ce mélange par "effet torche", c'est à dire en enflammant tout l'air présent dans le reste du cylindre à partir de ce mélange très riche, qui ne représente qu' 1% du volume total.

Ici aussi, le mélange total est pauvre en essence, permettant de limiter la consommation et la pollution au même titre que le balayage effectué avec de l'air.

Les résultats sont bons: Peugeot annonce pour ses scooters équipés du "TSDI" (le nom donné par la marque à cette technologie) un gain de 36% en consommation d'essence et 60% en huile (grâce à un mélange air-huile géré électroniquement), 65% d'émissions de monoxyde de carbone en moins, ainsi que 30% d'émissions d'hydrocarbures et de d'oxyde d'azote.

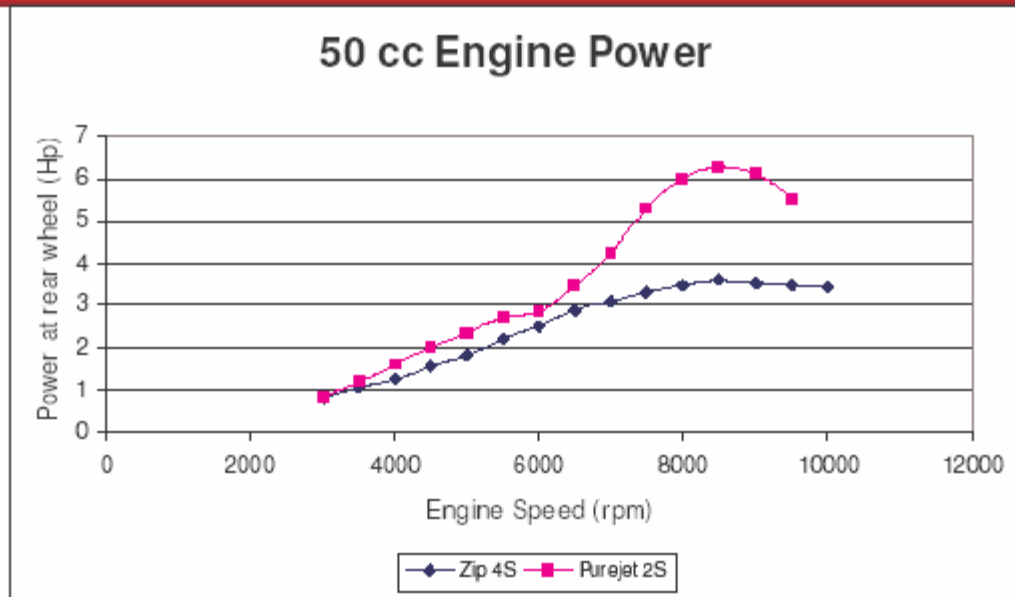
Ils sont donc homologués Euro 2 sans catalyseur (d'où une baisse des coûts), tout comme le SR 50 DiTech d'Aprilia.

De plus, toujours d'après Peugeot, la souplesse et la disponibilité du moteur à bas régimes et pendant les phases de démarrage sont plus agréables que sur une version à carburateurs.

En ce qui concerne les performances, un simple regard sur les graphiques comparant la puissance et le couple de scooters Piaggio/Gilera, dont l'un est un 4T à carburateur et catalyseur et équipé d'un dispositif d'injection d'air dans l'échappement pour que les gaz imbrûlés terminent leur combustion et ainsi réduire les émissions polluantes, et l'autre un 2T "Purejet", la dénomination commerciale de l'asDI Orbital chez Piaggio, et catalysé.

Le score est sans appel, et visible sur la page suivante. Les documents viennent d'un article de Marc Alias traitant du sujet, visible sur <http://www.econologie.com/articles.php?lng=fr&pg=717>. A noter que les deux moteurs sont homologués Euro-2.

Power

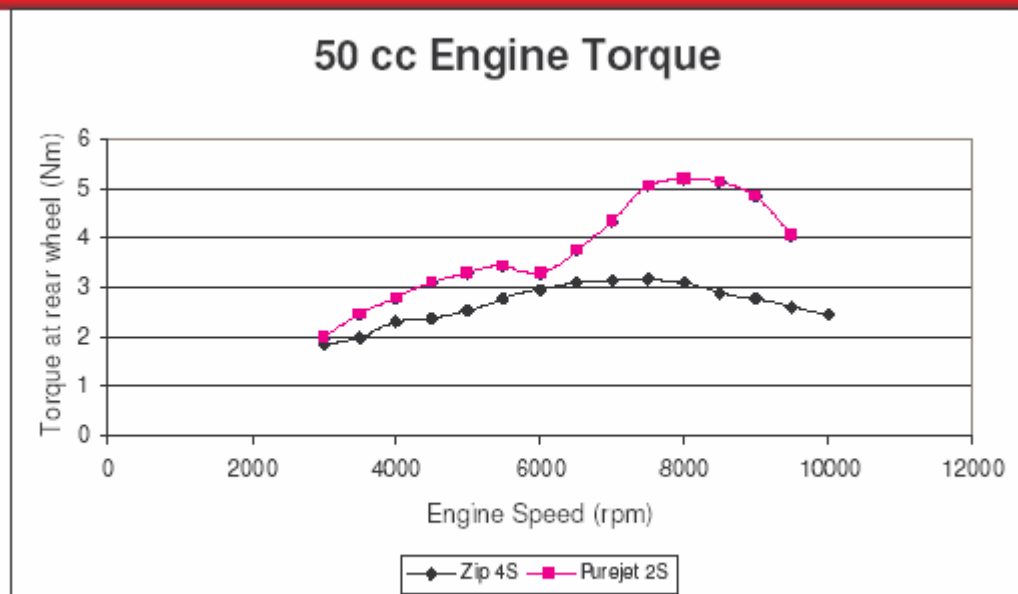


SYNERJECT

Both engines specified to Euro II emission compliance
Zip 4S : Catalyst + secondary air
Purejet 2S : Catalyst

CONFIDENTIAL

Torque



SYNERJECT

Both engines specified to Euro II emission compliance
Zip 4S : Catalyst + secondary air
Purejet 2S : Catalyst

CONFIDENTIAL

L'avantage vient donc clairement au 2 temps. Toutefois, les scooters 50cc 2T à injection directe ne sont pas un franc succès commercial: les jeunes leur préfèrent les versions à carburateur plus facilement "gonflables" et un peu moins coûteuses à l'achat.

Des moteurs de plus grosse cylindrée équipés de cette technologie vont ou devraient voir le jour dans les prochaines années: un 125cc Peugeot et un 500cc Aprilia, tous deux des monocylindres à variateur destinés à des scooters.

Il s'agit donc du système qui actuellement représente l'avenir du moteur 2T.

LA RESURRECTION DU MOTEUR 2 TEMPS

La frilosité des grands constructeurs

Comme nous l'avons vu, les motorisations 2 temps présentent de nombreux avantages, pour peu que l'on se donne la peine de leur fournir un minimum de technologie, dérisoire face à ce que l'on peut rencontrer sur les 4T de motos sportives actuelles, contrairement à ce que Honda affirmait en 1997 (voir la partie Bimota).

Toutefois, même si les technologies existent, quelles soit d'ores et déjà au point ou presque, le désintérêt des plus grands constructeurs à leur égard est flagrant.

Autant la politique pro-4T de Honda, qui a toujours préféré mettre en avant ce type de motorisations, est compréhensible, autant on peut d'interroger sur celui des autres constructeurs japonais.

Yamaha par exemple, a un passé riche en matière de 2 temps: invention de la valve à l'échappement, de l'admission par clapets dans le carter bas-moteur, les RDLC 350 et 500, etc... même aujourd'hui, il reste l'un des rares constructeurs à aligner des motos 125cc 2T. Mais il n'y a aucun effort de fait vers les moyen et long termes, le 2° constructeur mondial se contente de "patcher" ce qui existe déjà, à coups de catalyseur et d'injection d'air dans l'échappement. Des artifices qui ne seront sans doute pas suffisants pour passer les normes Euro-3 en 2006, malheureusement...

Quant à Kawasaki et Suzuki, il n'y a tout simplement plus aucun modèle 2T, comme chez Honda. Pourtant Suzuki a lui aussi un passé mythique en la matière, avec ses fameuses RG et RGV. Aux Etats-Unis, mis à part dans le domaine maritime comme nous l'avons vu avec le système Ficht, il n'y a rien, dans certains états le 2 temps y est même interdit.

La frilosité des consommateurs

Certaines images ont la vie dure, à l'image de ce qu'il se passait avec le Diesel en automobile il y a encore quelques années, alors considéré comme forcément claquant à froid, dégageant de la fumée noire, polluant, anémique etc...

Aujourd'hui, tous les grands constructeurs ont développé (parfois à grands frais) leur propre technologie d'injection directe, ou à rampe commune, ajouté des turbos... ils ont tout simplement su exploiter au lieux les qualités naturelles des moteurs Diesel telles que la sobriété et la fiabilité, tout en remédiant à leurs désavantages. Résultat: la majorité des voitures vendues de nos jours sont des Diesels dernière génération, et la parc automobile français compte de plus en plus de voitures équipés de ce type de motorisation.

Cette situation pourrait être comparée à celle du 2 temps en moto, où l'on associe ces motorisations à des clichés vieux de plusieurs dizaines d'années pour certains, c'est à dire l'époque où les moteurs étaient encore refroidis pas air et que l'on utilisait de l'huile de ricin pour lubrifier le moteur: beaucoup de fumée, fiabilité très précaire, grande consommation d'huile et d'essence... mais tout de même des performances et un caractère très appréciés.

A peu de chose près l'inverse du Diesel!

Pourtant aujourd'hui, on sait déjà concevoir des 2 temps "classiques" plus fiables, consommant moins, faisant moins de fumée, avec toujours des performances de premier ordre. Cette génération de moteurs étant vouée à disparaître, il serait peut-être temps de passer aux 2 temps de nouvelle génération...? Récapitulons point par point tous les avantages qui seraient obtenus.

La nouvelle génération de 2T

Voici un résumé de ce qui pourrait être obtenu en développant la nouvelle génération de moteurs 2 temps, qui synthétise ce que nous avons étudié:

-Une baisse significative des émissions polluantes, de l'ordre de 80% voire plus pour les hydrocarbures (HC) imbrûlés et autour de 30% pour le monoxyde de carbone (CO) et d'azote (NOx), les plaçant en dessous de celles de 4T équipés des mêmes technologies (catalyseurs, injection...). Ceci est en partie dû au balayage, qui est donc assez ambivalent puisqu'il permet à la fois de baisser les émissions de NOx, mais augmente celles de CO et HC s'il est mal maîtrisé. Le reste des gains obtenus est à attribuer le plus souvent la stratification, qui nécessite une forme de la chambre de combustion impossible à réaliser sur un 4T, à cause de tous les éléments de distribution, et plus particulièrement les soupapes (c'est du moins notre vision des choses).

-Une consommation en nette baisse, de l'ordre de 35%. Cela permet à des moteurs 2T peu pointus de consommer moins qu'un 4T par ailleurs équivalent en tous points (cylindrée et technologie embarquée). Pour les moteurs à forte puissance spécifique (c'est à dire relativement à leur cylindrée), c'est autre chose...

-Des performances et un agrément moteur en tous points supérieurs à ceux d'un moteur 4T équivalent en cylindrée et technologie, sur des 2 roues du moins. Si l'on comparait des moteurs 4T de même puissance maxi (donc avec un 4T de cylindrée supérieure), les valeurs de consommation et pollution seraient encore plus à l'avantage du 4T, même si ce dernier serait toutefois plus avantageux à bas régimes, en partie grâce à sa cylindrée, mais aussi parce que le peu d'efficacité d'un 2T à bas et très bas régimes restent un problème. C'est ce qui a fait tourner court les récentes tentatives d'adaptation de 2 temps nouvelle génération sur 4 roues, sur Ford et PSA notamment. Toutefois on peut rester optimiste quand aux capacités d'Orbital à remédier à ce problème, les ingénieurs australiens n'ayant plus à prouver leur savoir-faire.

-Un poids réduit, de l'ordre de 30%, idem pour l'encombrement. On peut donc monter des moteurs plus performants sur des véhicules plus compacts.

-Des coûts de production avantageux, une fois la technologie maîtrisée. Ceci s'explique par le nombre réduit de pièces en mouvement, pas d'arbre à cames, de soupapes, de conduits d'admission complexes, etc...

Enfin pour conclure ce dossier, voici le point sur les modèles disponibles et à venir embarquant la technologie asDI d'Orbital.

Modèles actuels:

- Peugeot Looxor 50cc, Jet Force 50cc, Elystar 50cc



- Aprilia SR 50 R et SR 50 Factory



- **Piaggio NRG Power Pure Jet (50cc)**



- **Gilera Runner 50 Pure Jet**



Modèles à venir:

- **Aprilia Leonardo 500cc (2006, homologué Euro-3, très faibles consommations)**



- **Peugeot Ludix 125cc (2005?)**

**Reste à espérer que cette technologie sera un jour employée sur des motos, mais le motard étant souvent conservateur, ce n'est probablement pour tout de suite.
Peut-être si les scooters 2T à injection directe se vendent bien?**

ANNEXE

Ici sont présentés brièvement quelques connaissances techniques indirectement liées à ce dossier, constituant une sorte de "bagage technique" plus ou moins connu du grand public. Il s'agit de documents-sources trouvés sur Internet, qui n'ont en aucun cas été reformulés ou tronqués. Nous invitons les lecteurs de ce dossier à se rendre sur les sites concernés pour plus d'information. En cas de refus du webmaster de voir affiché une (si petite) partie de son site dans ce dossier, merci d'envoyer un e-mail à L.vigouroux@wanadoo.fr

1/ LE MOTEUR 4 TEMPS

Vu sur <http://mecamotors.free.fr>

L'admission:

Premier temps, Le piston descend créant une dépression (PMH vers PMB) qui aspire les gaz par la soupape d'admission dans la chambre de combustion. La soupape d'échappement reste fermée.

Compression:

Second temps, Le piston remonte, (PMB vers PMH) comprimant les gaz enfermés dans la chambre de combustion. La soupape d'admission et la soupape d'échappement sont fermées.

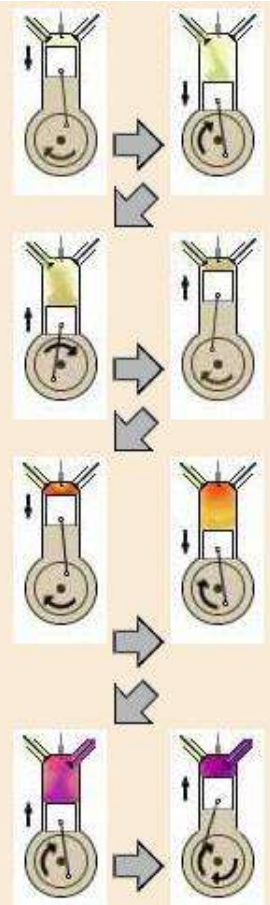
Explosion: (ou détente)

Troisième temps, la bougie crée une étincelle qui enflamme les gaz comprimés, l'explosion pousse le piston vers le bas (PMH vers PMB) La soupape d'admission et la soupape d'échappement sont fermées.

N.B: C'est le seul temps moteur qui crée assez d'énergie pour d'une part relancer un cycle de 4 temps, et pour d'autre part faire avancer la moto.

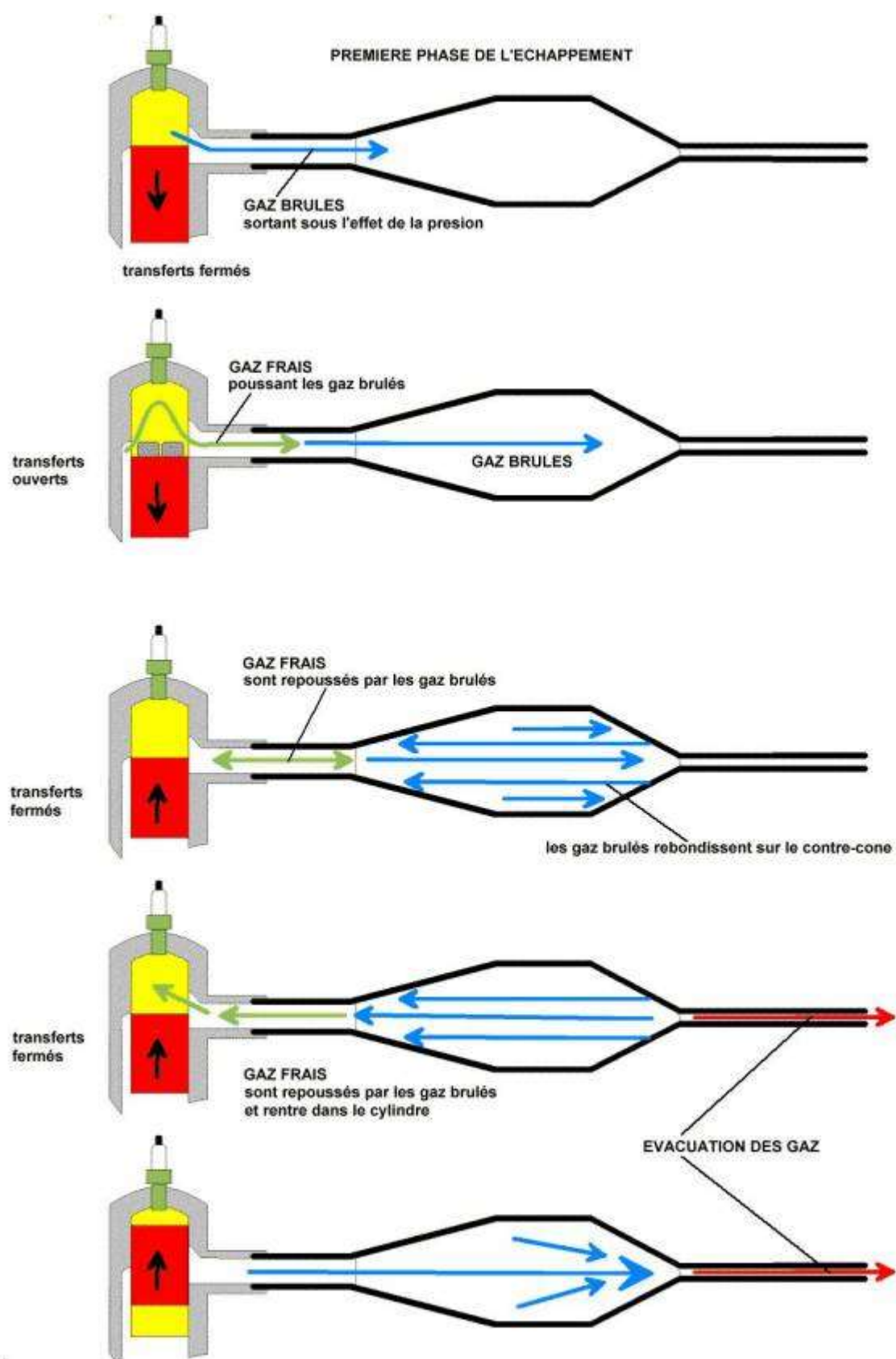
Echappement:

Quatrième temps, La soupape d'échappement s'ouvre, le piston remonte poussant les gazs brulés vers le conduit d'échappement. La soupape d'admission reste fermée.



2/ FONCTIONNEMENT D'UN POT DE DETENTE

Vu sur <http://www.membres.lycos.fr/moteur2temps>

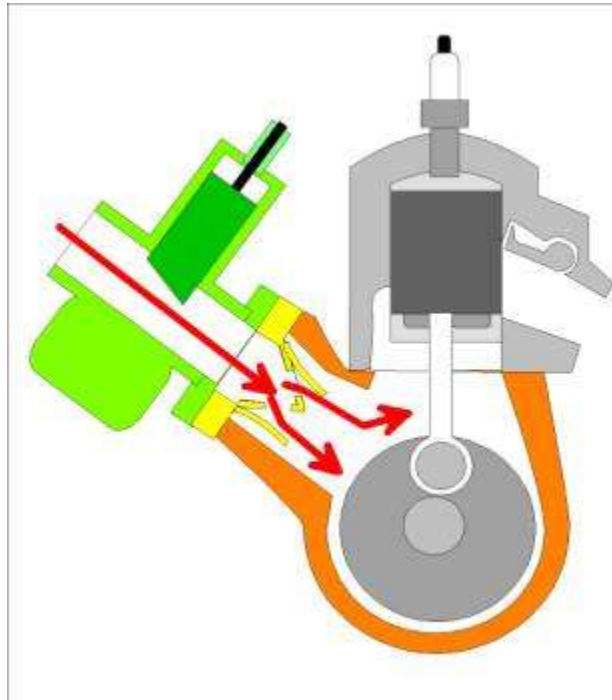


3/ Le diagramme de distribution

Vu sur le site de Loïc, <http://perso.wanadoo.fr/twostrokeforce>

Quelques rappels:

Sur un moteur 2T, le mélange air-essence admis depuis le carburateur (en vert) entre dans le carter bas-moteur (orange), du moins sur la grande majorité des moteurs 2T actuels, sous l'effet de la dépression regnant dans celui-ci sous l'effet de la montée du piston (gris foncé).



Note: le mélange, une fois admis, ne peut plus ressortir du carter car les clapets d'admission (jaunes) se referment dès lors que le piston se stabilise au point mort haut (PMH, c'est à dire la position la plus haute qu'il peut atteindre), empêchant tout retour des gaz vers le carburateur.

La descente du piston (après explosion du mélange précédent), provoque une hausse de la pression à l'intérieur du carter. Les gaz sont alors comprimés et envoyés vers les transferts (image de gauche, ici un seul transfert représenté, il s'agit du conduit dans la partie jaune). Dans sa course, le piston découvre les lumières d'admission, c'est à dire les orifices des transferts débouchant dans le cylindre.



Ces gaz d'admission (en violet sur les images) repoussent les gaz déjà brûlés (en orange) qui partent vers la lumière d'échappement (orifice bleu clair sur l'image de gauche).

L'importance des côtes des lumières:

Le comportement et les performances d'un moteur 2T dépendent en grande partie du positionnement des lumières, de leur hauteur et de leur largeur.

Un moteur, pour privilégier les mi-régimes et le couple (par exemple sur un trail), devra être capable d'atteindre ses valeurs de couple et de puissance maximales sur une plage de régime allant de 6 à 10.000 trs/min. Cela signifie qu'à 6.000 trs/min, le moteur doit déjà être efficace et tracter correctement la moto.

Pour cela, il faut qu'il profite au maximum de chaque combustion, c'est à dire que les gaz brûlés poussent le piston le plus longtemps possible. Cela implique un positionnement assez bas de la lumière d'échappement pour éviter que les gaz ne s'échappent trop tôt, et par conséquent un positionnement bas des lumières d'admission (puisque ce sont les gaz d'admission qui "poussent" les gaz d'échappement). De plus la lumière d'échappement ne doit pas être trop large, sinon les gaz s'échapperaient trop vite (idem pour les lumières d'admission). Ce genre de moteur ne comporte souvent que 3 transferts (2 latéraux, 1 à l'arrière).

En revanche, sur un moteur privilégiant la puissance à hauts-régimes (pour une sportive par exemple), il faut augmenter la durée des phases d'échappement et d'admission, et donc de balayage. Sinon, impossible d'apporter assez de gaz frais à haut régime, les temps d'admission étant réduits.

C'est pour cette raison que la lumière d'échappement et celles d'admission seront plus hautes, afin de favoriser la sortie des gaz d'échappement et l'entrée de gaz frais après un court temps de détente pour pousser le piston (mais suffisamment long quand même).

De plus, pour augmenter la rapidité d'admission, on augmente le nombre de transferts (en général 5, mais sur des moteurs très poussés, on peut en trouver 7).

Durées angulaires et diagramme de distribution:

Pour caractériser un moteur (coupleux, pointu...), on cherche d'abord la longueur des lumières d'admission et d'échappement, pour connaître la durée d'ouverture de chacune d'elles. Pour avoir des valeurs comparables quelle que soit la cylindrée, on ne les donne pas en mm.

Un aller-retour de piston correspond à 360° sur le vilebrequin. Pour connaître la durée d'ouverture des lumières sur un temps moteur, on cherche l'angle balayé par le vilebrequin pendant l'ouverture de chacune de ces lumières, en degrés.

Cela permet d'avoir une valeur qui ne dépend ni de la cylindrée (pour les dimensions), ni du régime moteur (pour le temps d'ouverture). C'est la durée angulaire.

Le diagramme de distribution est l'ensemble de ces durées angulaires. On ne peut cerner le comportement d'un moteur qu'avec toutes les valeurs, même si généralement on peut déduire de la durée angulaire de l'échappement les autres valeurs.

Quelques repères:

-Un moteur de 125cc de trial, avec un régime de puissance maxi à 5500 trs/min, aura entre 154 et 158° à l'échappement et autour de 110-115° à l'admission.

-Un moteur 125cc de route, avec un régime de Pmax à 10.500 trs/min, aura 185-192° à l'échappement et environ 130° à l'admission.

-Toujours en 125, un moteur de cross avec un régime de Pmax à 11.500 trs/min aura 194-196° à l'échappement et environ 135° à l'admission.

-Enfin, un moteur de 125cc de vitesse, avec un régime de Pmax à 14.000 trs/min, aura 202-204° à l'échappement et 136-142° à l'admission.

Depuis quelques années, l'emploi de valves à l'échappement s'est généralisé. Il s'agit de pièces s'abaissant derrière la lumière d'échappement, permettant de faire varier la durée de la phase d'échappement en fonction du régime moteur. On obtient des courbes de puissances plus linéaires et une meilleure disponibilité à bas et mi-régimes.