

Historique

1 - Principes généraux

Il existe deux grandes familles de machines servant à déplacer un fluide ou à générer un mouvement rotatif :

- les machines à pistons,
- les machines génériquement nommées « turbines ».

Le fonctionnement des machines à pistons est basé sur la variation de volumes lorsque les pistons se déplacent de leur position la plus basse vers leur position la plus haute et inversement. Il est ainsi possible de comprimer un fluide ou de faire se détendre un fluide comprimé, surtout quand il s'agit d'un fluide gazeux.

Ces machines à pistons sont équipées de mécanismes de transformation d'un mouvement alternatif en un mouvement rotatif et vice-versa.

Ces mécanismes, généralement compliqués, sont le plus souvent des embiellages, mais on trouve aussi des arbres à cames, des plateaux, etc.

Dans ces machines, les pistons frottent toujours dans leur cylindre.

Pour tenir la pression, ils doivent être équipés de segments d'étanchéité.

Dans la majorité des cas, dont ceux des compresseurs et des moteurs thermiques à combustion interne, il faut refroidir la combinaison piston-segments-cylindre pour assurer la qualité de l'huile de lubrification afin de garantir au minimum un frottement onctueux entre les divers composants.

Le fonctionnement des machines du genre turbine est basé sur la rotation d'un rotor équipé d'aubes dans un stator. Elles ne nécessitent donc pas de convertisseur de mouvement.

Les turbines ne peuvent pas fonctionner à hautes pressions, car elles ne possèdent pas de dispositif permettant de faire varier les volumes entre les aubes. Par définition, une turbine n'est pas volumétrique.

Mais, elles ont un avantage : les aubes ne frottent pas dans le stator.

La rubrique « Technologies » explique comment il est possible de concilier les avantages de la machine à pistons et ceux de la turbine, c'est à dire en créant une machine :

- dépourvue de convertisseur de mouvement ;
- dont les composants définissant le volume de travail fonctionnent sans frottement ;
- dans laquelle il est possible de générer des variations de volumes et de pressions ;
- dans laquelle l'étanchéité est obtenue par pertes de charges contrôlées.

Historique

2 - Cas particuliers

2.1 - Thermodynamique des moteurs thermiques

2.11 - Les fondements de la thermodynamique

La thermodynamique s'appuie sur les fondements suivants :

- l'énergie ne peut provenir du néant ou être détruite ;
- les formes d'énergies ne peuvent qu'être transformées : le carburant en chaleur et la chaleur en énergie mécanique ;
- la chaleur ne se laisse jamais intégralement transformer en travail mécanique, ne serait-ce qu'à cause des frottements générés dans les appuis des pièces en mouvement ;
- tous les processus naturels et techniques de transformation d'énergie sont irréversibles et vont dans le sens le plus probable, la chaleur ne passe librement que des corps les plus chauds à des corps les plus froids ;
- l'effet inverse, donc le passage du froid vers le chaud ne peut s'obtenir qu'avec un apport d'énergie.

2.12 - Types de transformations

Les transformations thermodynamiques sont désignées suivant les conditions dans lesquelles elles ont lieu. C'est ainsi qu'une transformation :

- à pression constante est nommée isobare ;
- à volume constant est nommée isochore ;
- à température constante est nommée isotherme ;
- sans échange de chaleur est nommée adiabatique ;
- sans échange de chaleur et sans frottement est nommée isentropique ;
- avec changement d'état général est nommée polytropicque.

Quand nous étudions les cycles théoriques des gaz parfaits, nous pouvons exprimer les lois de ces transformations parce que nous pouvons faire usage de la constante que nous devons à L. J. Gay Lussac (1778 - 1850) : $PV = RT$. Il énonça la constante : $PV = R(267 + t)$, ce qui est proche de $PV = R(273,15 + t)$.

La loi de Gay-Lussac couplée à celle de Boyle-Mariotte permettra d'établir quelques années plus tard la loi des « gaz parfaits » dont l'équation d'état s'écrit $PV = nRT$ ou $PV = NkT$, à la base des modélisations simples des gaz dans les systèmes thermodynamiques.

2.13 - Principe de fonctionnement

L'énergie chimique contenue dans le carburant est transformée en chaleur par une combustion qui requiert de l'oxygène et cette énergie calorifique est convertie en travail à l'aide de composants mécaniques formant un ensemble nommé moteur thermique.

2.14 - Classification des moteurs thermiques

Quand la combustion s'effectue à l'intérieur du moteur, nous parlons de combustion interne. Il y a alors deux possibilités et dans les deux cas le circuit est ouvert :

- soit le processus de travail est cyclique et il faut tour à tour introduire une charge fraîche et refouler une quantité de gaz brûlés, c'est le cas dans les moteurs à pistons alternatifs ;

Historique

- soit le processus de travail est continu et le remplacement de la charge se fait sans interruption, comme dans les turbines à gaz.

Quand la combustion s'effectue à l'extérieur du moteur, nous parlons de combustion externe. Dans ce cas, le processus de travail peut être continu et le circuit fermé, car le fluide moteur peut rester chimiquement inchangé et subir des changements d'état sans avoir à être remplacé.

Le conditionnement du mélange air-carburant à l'extérieur du lieu de combustion favorise l'homogénéisation. Nous parlons alors de conditionnement externe ou homogène du mélange.

Quand le mélange est réalisé à l'intérieur du lieu de combustion, il se fait dans de moins bonnes conditions. Il est de ce fait hétérogène. Nous parlons alors de conditionnement interne ou hétérogène du mélange.

Si la combustion est amorcée par une étincelle électrique, nous parlons d'allumage commandé, mais si le mélange s'enflamme spontanément parce qu'il a atteint la température d'auto-inflammation, nous parlons d'auto-allumage.

2.15 - Cycles thermodynamiques

La conversion de l'énergie calorifique en énergie mécanique n'est possible que si le fluide moteur change d'état.

Ces changements d'état sont généralement représentés par des diagrammes qui expriment deux grandeurs d'état :

- hausse ou baisse de la température ;
- augmentation ou diminution de la pression ;
- augmentation ou diminution du volume.

Généralement, les coordonnées d'un diagramme expriment les rapports :

- pression-volume dans un diagramme p-V ;
- température-entropie dans un diagramme T-S ;
- enthalpie-entropie dans un diagramme H-S.

L'étude de la thermodynamique a poussé plusieurs savants à proposer des cycles de fonctionnement. Nous ne nommerons que ceux qui sont encore employés de nos jours :

- A. Beau de Rochas en 1862 (1815 - 1893) qui inventa la compression et le cycle à quatre temps. C'est le cycle de référence pour les moteurs à essence à quatre temps d'aujourd'hui.
- N.A. Otto construisit en 1867 un moteur selon ce cycle, mais il dut abandonner ses travaux suite à un procès, car il n'était pas le détenteur des brevets.
- J. Joule en 18 . . (1818 - 1889) qui inventa le cycle à pression constante. C'est le cycle de référence pour les moteurs du genre turbines à gaz.
- Sabathé, de prénom inconnu, qui fut le premier à préconiser un cycle mixte conjuguant les cycles de A. Beau de Rochas et de R. Diesel. C'est le cycle de référence pour les moteurs à gazole que beaucoup de personnes nomment encore à tort « moteur Diesel ».

Historique

2.16 - Exigences imposées aux carburants

Les carburants employés dans les moteurs se classent en trois catégories qui déterminent les exigences qui leur sont imposées :

- la catégorie des carburants qui sont destinés aux moteurs à conditionnement homogène et à allumage commandé ;
- la catégorie des carburants qui sont destinés aux moteurs à conditionnement hétérogène et à auto-allumage ;
- la catégorie des carburants qui sont destinés aux moteurs du genre turbine à gaz dont la flamme est continue.

Parmi les carburants destinés à un conditionnement homogène, figurent les essences plombées, les essences sans plomb, les gaz de pétrole liquéfié, et cætera.

Ces carburants doivent être très volatils afin de favoriser le conditionnement homogène du mélange air-carburant. Il est cependant nécessaire de poser des exigences élevées aux caractéristiques de volatilité, dont :

- la courbe d'ébullition qui donne le pourcentage de carburant vaporisé en fonction de la température ;
- la pression de vapeur ;
- le rapport vapeur-liquide qui permet de déterminer la tendance du carburant à former des bulles de vapeur ;
- la masse volumique qui permet de déterminer certains types ou composants de carburants ;
- la teneur en plomb qu'il ne faut pas dépasser ;
- l'indice d'octane qui caractérise le pouvoir anti-détonant de l'essence.

Ces exigences sont normalisées !

Parmi les carburants destinés à un conditionnement hétérogène figure un nom : gazole.

C'est un mélange de différents hydrocarbures dont le point d'ébullition se situe approximativement entre 180° et 360° Celsius.

Les principales exigences imposées au gazole sont :

- la masse volumique ;
- la courbe d'ébullition ;
- la viscosité cinématique ;
- le point d'éclair ;
- l'indice de cétane.

Ces exigences sont aussi normalisées !

Les principales exigences imposées aux carburants destinés aux turbines à gaz se limitent à :

- la viscosité ;
- la quantité d'impureté de tous genres, dont en particulier le soufre, le sodium, le vanadium et le plomb.

Historique

Ce sont les moteurs à combustion externe qui imposent le moins d'exigences au carburant. En effet, le fluide moteur et les gaz en combustion ne sont souvent pas les mêmes. Il suffit que le carburant brûle suffisamment vite sans laisser de résidu.

2.17 - La combustion

La combustion se déroule de deux manières différentes :

- de façon cyclique dans les moteurs à pistons alternatifs après chaque remplacement de la charge ;
- de façon continue dans les moteurs du genre turbine à gaz.

C'est la combustion cyclique qui pose le plus de problèmes. En effet, elle doit avoir lieu dans un temps record. Ainsi, dans un moteur à quatre temps tournant à 6000 tours par minutes, le cycle a lieu en : $1/(6000/2/60) = 1/50 = 0,02$ sec.

Or, comme le cycle comprend une aspiration, une compression, une détente et un refoulement et que la combustion ne peut avoir lieu que pendant la détente, celle-ci ne peut durer que : $0,02/4 = 0,005$ sec.

Ces délais sont divisés par trois environ dans un moteur à deux temps.

Dans les moteurs à conditionnement homogène et à allumage commandé, la phase d'inflammation est pratiquement constante dans le temps et ne dépend que de la composition du mélange, alors que le dégagement de chaleur est avant tout déterminé par la forme de la chambre de combustion et la position du point d'allumage.

La vitesse de combustion, elle, est déterminée par le processus de diffusion au front des flammes, par l'intensité des turbulences et l'évolution de la température dans la partie du mélange qui ne brûle pas encore.

La durée d'inflammation étant constante dans le temps et celle-ci devant avoir lieu avant la détente, il faut prévoir un dispositif permettant de régler le moment de l'allumage obtenu sous forme d'avance à l'allumage, afin que l'énergie calorifique contenue dans le carburant soit à son maximum quand elle doit être transformée en énergie mécanique lors de la détente.

Dans les moteurs à conditionnement hétérogène, l'auto-inflammation a lieu peu avant la fin de la compression. Le carburant est alors injecté dans de l'air fortement comprimé et chauffé à une température située entre 700° et 900° Celsius.

La combustion se déroule en deux phases, ce qui démontre que c'est bien une combustion selon le cycle de Sabathé :

- une phase pendant laquelle le carburant injecté avant le commencement de l'allumage s'enflamme : c'est l'apport de chaleur isochore, tel selon le cycle de A. Beau de Rochas ;
- une phase pendant laquelle le carburant injecté après le départ de la combustion va brûler : c'est l'apport de chaleur isobare, tel selon le cycle de R. Diesel.

La combustion continue dans les moteurs du genre turbine à gaz ou du genre à combustion externe doit être stable et régulière. C'est principalement ce qu'on lui demande.

Historique

2.18 - Rendement thermodynamique

Le rendement thermodynamique d'un moteur thermique dépend de la quantité de chaleur dissipée, donc perdue. Il est égal à :

$$\eta = (\theta' - \theta'') / \theta''$$

où η est le rendement,
 θ' la quantité de chaleur apportée et
 θ'' la quantité de chaleur dissipée.

2.2 - Configuration mécanique des moteurs thermiques

2.21 - Les moteurs alternatifs à essence à quatre et à deux temps

Le moteur alternatif à essence est un moteur à conditionnement homogène du mélange air-carburant et à allumage commandé.

Le carburant est principalement de l'essence, mais ce peut aussi être un produit de substitution tel que le gaz de pétrole liquéfié.

Le conditionnement est réalisé soit dans le carburateur, soit indirectement dans la tubulure d'admission, soit directement dans le cylindre, dans lesquels le carburant est cycliquement injecté.

Le mélange est périodiquement comprimé dans un cylindre de travail jusqu'à une pression variant entre 15 et 25 bars.

La température de compression qui en résulte et qui varie entre 400° et 600° Celsius est encore inférieure au seuil d'auto-inflammation de sorte que le mélange doit être enflammé pour obtenir la transformation du carburant en énergie calorifique.

L'inflammation provoquée par une étincelle se fait à très grande vitesse. Elle génère une augmentation de la pression égale à environ sept fois celle obtenue en fin de compression, alors que la pression moyenne efficace est environ égale à celle obtenue en fin de compression.

Ces valeurs ne peuvent être calculées avec exactitude de par le nombre de variables qui interviennent simultanément. C'est une des raisons pour lesquelles la fabrication d'un moteur à essence est largement conditionné par l'empirisme.

Le renouvellement de la charge se fait dans un moteur à quatre temps à l'aide d'un dispositif à soupapes, ou dans un moteur à deux temps au travers de lumières disposées à proximité du point mort bas.

Le travail utile généré est transformé par un mécanisme d'embellage en un couple moteur disponible à l'extrémité du vilebrequin. Cet embellage est complexe et nécessite que le moteur tourne au ralenti à des régimes situés entre 800 et 1200 tours par minute pour ne pas faire caler le moteur. Ceci représente une consommation de carburant importante, surtout là où la circulation n'est pas fluide.

Historique

Nous pouvons dès maintenant constater que :

- le rapport entre la fatigue maximale des composants mécaniques soumis à la pression de pointe et la fatigue moyenne de ces mêmes composants est égal à p_{\max}/p_{me} ;
- le dimensionnement de ces composants est déterminé par la pression de pointe à laquelle s'ajoute une marge de sécurité et non pas par la pression moyenne efficace, ce qui demande des composants largement surdimensionnés.

Avantages du moteur à essence :

- conception maîtrisée depuis des décennies ;
- structures économiques basées sur ce moteur ;
- configuration piston/cylindre favorisant les hautes pressions.

Inconvénients du moteur à essence :

- nécessite des carburants sophistiqués ;
- mauvais rapport p_{\max}/p_{me} ;
- mauvais rendement : seulement environ 30% de l'énergie calorifique contenue dans le carburant est transformée en énergie mécanique ;
- émissions toxiques relativement élevées : NO, HC, CO ;
- bruyant ;
- nécessite une boîte à vitesse.

2.22 - Les moteurs alternatifs à gazole à quatre et à deux temps

Le moteur alternatif à gazole est un moteur à conditionnement hétérogène du mélange air-carburant.

Le conditionnement est réalisé dans le cylindre ou dans une chambre aménagée dans la culasse, mais débouchant dans le cylindre. La chambre de Ricardo en est un exemple.

Le déroulement des opérations est comparable à celui qui est valable pour le moteur à essence, sauf que :

- l'air est comprimé jusqu'à une valeur de 30 à 55 bars ;
- la température de compression varie entre 700° et 900° Celsius afin de dépasser le seuil d'auto-inflammation ;
- l'injection a lieu un peu avant le point mort haut ;
- la pression de pointe monte parfois jusqu'à 200 bars, mais se situe plus généralement autour de 150 bars, certains moteurs de laboratoires ont vu la pression monter à plus de 240 bars ;
- la pression moyenne efficace ne dépasse pas 30% de celle obtenue en fin de compression dans les moteurs à gazole atmosphériques, alors qu'elle se limite à celle obtenue en fin de compression dans les moteurs avec refroidissement de l'air de suralimentation.

La marge de sécurité dans les moteurs à injection de gazole doit être bien plus grande que dans les moteurs à essence, car il faut tenir compte de ratés à l'auto-inflammation qui augmentent les pressions de pointe au tour suivant.

Il s'ensuit, compte tenu des pressions de compression élevées qui règnent dans les moteurs à gazole, que les fortes pointes de pression provoquées par l'inflammation spontanée exigent un groupe moteur relativement lourd.

Historique

Et comme les moteurs à conditionnement hétérogènes doivent fonctionner avec un excès d'air important, même à pleine charge, les moteurs à gazole ont une faible puissance volumique.

Avantages du moteur à gazole :

- conception maîtrisée depuis longtemps ;
- structures commerciales basées sur ce moteur ;
- configuration piston/cylindre favorisant les hautes pressions.

Inconvénients du moteur à gazole :

- prix de revient élevé à la fabrication ;
- mauvais à très mauvais rapport p_{\max}/p_{me} ;
- faible puissance volumique, la cylindrée d'un moteur à gazole est généralement 1,5 fois supérieure à celle d'un moteur à essence pour la même puissance ;
- mauvais rendement : seulement environ 30% de l'énergie calorifique contenue dans le carburant est transformée en énergie mécanique ;
- degré d'émission défavorable : suie et imbrûlés ;
- bruyant à très bruyant ;
- nécessite une boîte à vitesses de grande capacité.

2.23 - La turbine à gaz

La turbine à gaz est un moteur à conditionnement hétérogène du mélange air-carburant et à flamme continue.

C'est un moteur polycarburant qui accepte des combustibles liquides, gazeux ou émulsifiés.

Le conditionnement est réalisé dans une chambre de combustion séparée où un injecteur répartit finement le combustible dans l'air comburant afin que le mélange se fasse de manière à obtenir un taux de combustion élevé.

La compression se fait et le travail s'obtient à l'aide de turbines à ailettes qui tournent sans frotter dans leur logement respectif.

La configuration ainsi obtenue autorise des régimes très élevés, le flux des gaz atteignant et dépassant parfois à certains endroits du système la vitesse du son, bien que les calculs soient basés sur une vitesse maximale des gaz de l'ordre de 0,8 à 0,9 Mach.

L'air aspiré est d'abord comprimé jusqu'à une valeur de 4 à 6 bars environ, traverse éventuellement un échangeur de chaleur dans lequel il monte en température, atteint la chambre de combustion où il s'allie au carburant pour former un gaz qui en brûlant monte en température, augmentant ainsi de volume. Les gaz cèdent une partie de leur énergie à une turbine de travail, le cas échéant une autre partie dans l'échangeur de chaleur et dissipent le reste dans l'atmosphère.

Comme les pressions de travail sont peu élevées, la puissance ne peut s'obtenir que par des régimes qui dépendent logiquement de la taille de la turbine. Ainsi, une turbine à gaz qui serait destinée à l'automobile fonctionnerait dans une plage de régime qui varierait entre 8000 et 70 000 tours par minute.

Avantages de la turbine à gaz :

Historique

- fonctionnement polycarburant ;
- marche régulière ;
- bon rapport p_{\max}/p_{me} ;
- valeurs d'émission favorables sans équipement.

Inconvénients de la turbine à gaz :

- mauvais rendement : moins de 30% de l'énergie calorifique contenue dans le carburant est transformée en énergie mécanique ;
- faibles pressions de travail ;
- régimes souvent beaucoup trop élevés ;
- coût de fabrication élevé ;
- importante consommation de carburant ;
- mal adaptée aux faibles puissances ;
- bruyante par la vitesse des gaz ;
- nécessite des réducteurs coûteux.

2.24 - La lubrification

C'est dans le moteur le plus répandu à l'usage que la lubrification est la plus complexe. En effet, le moteur alternatif compte de nombreux points qu'il faut lubrifier, dont en particulier l'ensemble piston-segments-cylindre ou chemise qui représente du point de vue lubrification la configuration la plus délicate :

- d'une part, il faut que la combustion ait lieu à des niveaux de température supérieurs à 2000 K pour qu'elle soit la plus complète possible ;
- d'autre part, la température de fonctionnement de l'huile utilisée pour la lubrification du guidage des pistons dans leur cylindre ne doit pas dépasser 125° Celsius pour ne pas gommer.

A ce niveau là, la turbine à gaz est plus pratique, puisque les aubages n'entrent pas en contact avec leur logement respectif.

2.25 - Le refroidissement

Etant donné qu'une huile qui brûle perd son pouvoir lubrifiant, il faut, au vu de la configuration du moteur alternatif, que les parties qui sont exposées à la chaleur engendrée par la combustion soient intensément refroidies pour que l'huile garde son pouvoir lubrifiant.

Ce refroidissement provoque l'évacuation forcée de plus de 30 % de l'énergie calorifique contenue dans le carburant : on enlève d'un côté une partie de ce que l'on a introduit de l'autre.

2.25 - Les gaz d'échappement

Dans les moteurs alternatifs, plus de 30 % de l'énergie contenue dans le carburant est dissipée par l'échappement :

- sous forme de chaleur, car le volume de détente étant égal au volume de compression, ledit volume de détente n'est pas supérieur au volume de compression dans un rapport proportionnel à la quantité de chaleur ajoutée lors de la combustion ;
- sous forme d'hydrocarbures partiellement ou parfaitement imbrûlés, parce que les délais impartis au carburant pour changer entièrement d'état sont trop courts, en effet, de 0,002 à

Historique

0,01 sec ne suffisent pas, et que le rapport air-carburant n'est pas toujours favorable à une bonne oxygénation.

Dans les turbines à gaz, les délais de passage des gaz en combustion sont trop courts pour permettre d'obtenir une détente et un refroidissement limitant les pertes par l'échappement. Il s'en suit que 70 à 80 % de l'énergie calorifique contenue dans le carburant est dissipée sous forme de chaleur, sauf dans le cas où cette chaleur est partiellement transmise à l'air comprimé par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur.

2.3 - Bilan et conclusion

2.31 - Bilan

Pour ce bilan, nous établissons le tableau comparatif suivant :

Sujet de la comparaison	moteur alternatif à essence	moteur alternatif à gazole	turbine à gaz
Rapport volume de détente / volume de travail	égal à 1	égal à 1	supérieur à 1
Échange de chaleur	impossible	impossible	réalisable
Choix des carburants	normalisé	normalisé	libre
Mode de combustion	cyclique	cyclique	continue
Tenue aux pressions	élevée	élevée	modeste
Rapport pression maximale /pression moyenne efficace	mauvais	mauvais	favorable
Énergie calorifique transformée en énergie mécanique	30 à 35 % selon les circonstances	30 à 35 % selon les circonstances	20 à 30 % selon les circonstances
Pertes par le système de refroidissement	30 à 35 % selon les circonstances	30 à 35 % selon les circonstances	néant
Pertes par le système d'échappement	30 à 35 % selon les circonstances	30 à 35 % selon les circonstances	70 à 80 % selon les circonstances
Émissions de gaz	toxiques	toxiques	acceptables
Niveau sonore	élevé	élevé	élevé
Frottements dans le volume de travail	oui	oui	non
Lubrification dans le volume de travail	périlleuse	périlleuse	inutile
Refroidissement	obligatoire	obligatoire	inutile
Boîte à vitesses	obligatoire	obligatoire	
Réducteur de régime			obligatoire

Historique

2.32 - Conclusion

Pour la réalisation d'un moteur thermique, il ne faudrait retenir que les arguments suivants, que nous reprenons des paragraphes précédents :

- Ce sont les moteurs à combustion externe qui imposent le moins d'exigences au carburant. En effet, le fluide moteur et les gaz en combustion ne sont souvent pas les mêmes. Il suffit que le carburant brûle suffisamment vite sans laisser de résidu.
- La combustion continue dans les moteurs du genre turbine à gaz ou du genre à combustion externe doit être stable et régulière. C'est principalement ce qu'on lui demande.
- Avantages du moteur à essence : configuration piston/cylindre favorisant les hautes pressions.
- Avantages du moteur à gazole : configuration piston/cylindre favorisant les hautes pressions.
- Avantages de la turbine à gaz : fonctionnement polycarburant, marche régulière, bon rapport pression maximale/pression moyenne efficace, valeurs d'émission favorables sans équipement.

Comme nous sommes pour ainsi dire devant une feuille de papier blanc, les points suivants doivent être retenus pour former notre cahier des charges :

- un moteur à combustion externe ;
- fonctionnement polycarburant ;
- configuration favorisant les hautes pressions ;
- configuration favorisant les hautes températures ;
- marche régulière et silencieuse ;
- bon rapport pression maximale / pression moyenne efficace ;
- valeurs d'émission favorables sans équipement, donc sans système d'échappement ;
- absence de lubrification dans le volume de travail ;
- absence de refroidissement du volume de travail ;
- absence de boîte à vitesses ;
- absence de convertisseur de mouvement.

Les rubriques « Technologies » et « Applications » démontrent que ce cahier des charges peut être rempli.