

Actionneur à entraînement direct pour serrure mécatronique

Jean-Daniel ALZINGRE

MOVING MAGNET TECHNOLOGIES SA – 1 rue Christiaan Huygens - 25000 BESANCON

RESUME – Nous présentons dans ce papier comment a été résolu le problème de maintenir dans une position donnée, le mobile d'un actionneur à entraînement direct face à des chocs de haute intensité. De tels chocs apparaissent lors des tentatives d'effraction sur des serrures mécatroniques. Un prototype et des mesures étayent la théorie présentée.

Mots-clés—serrure, chocs, miniature, consommation.

1. INTRODUCTION

Plus que jamais, les entreprises, les organisations et même les particuliers ont besoin de contrôler l'accès à des lieux ou à des objets. Ce contrôle utilise des organigrammes complexes qui autorisent l'accès non seulement en fonction de l'identité des porteurs de clé, mais aussi en fonction des horaires, des dates, des autorisations ponctuelles ou des conditions particulières (présence préalable d'une personne de hiérarchie supérieure...), tout en assurant un historique des événements. Chaque porte ou coffre de l'organigramme est équipé d'une serrure commandée en liaison avec une centrale. Un vaste panel de serrures commandées existe, du traditionnel digicode aux serrures à reconnaissance biométrique. Park et all. [1] montrent la sophistication d'une serrure commandée en interaction avec tous les appareils connectés d'un domicile (ordinateurs, électroménager, thermostats...).

Si dans le cadre d'une construction neuve on peut considérer toutes les solutions possibles, dans le secteur de la rénovation en revanche, on s'intéresse à des solutions de serrures autonomes de taille standard qui ne nécessitent pas d'alimentation électrique câblée, ni de modification d'huisserie. Aussi, depuis des années, on trouve sur le marché des cylindres de serrure de format standard, qui sont alimentés soit par une batterie intégrée, soit par la clé elle-même. En raison des restrictions des dimensions et de l'énergie disponible, l'action de déplacement du pêne de la serrure est assurée par la force de l'utilisateur, la commande électrique de la serrure se limitant à autoriser ou non ce déplacement.

Selon les niveaux de sécurité recherchés, les serrures peuvent être à commande électrique uniquement, ou bien disposer en plus d'une sécurité mécanique traditionnelle à goupilles. Si les serrures mécaniques sont principalement sujettes aux attaques de type crochetage (opération qui consiste à positionner chacune des goupilles de verrouillage au moyen d'un crochet introduit par la fente de la serrure), les serrures à commande électriques sont menacées principalement par trois nouveaux types d'attaque : L'attaque logicielle (qui consiste à

s'introduire dans le logiciel en amont de la commande), l'attaque magnétique (qui consiste à appliquer un champ magnétique externe variable ou fixe) et l'attaque mécanique par vibration ou par choc (qui consiste à frapper sur la serrure en vue de déplacer les éléments internes). Nous ne traiterons pas dans ce document le cas de l'attaque logicielle, qui relève uniquement du domaine de la sécurité informatique.

Nous présenterons les solutions existantes d'organes de commande, leurs avantages, leurs inconvénients, ainsi que leur résistance face aux différentes attaques, avant de présenter notre solutions capable de résister à ces agressions.

2. SOLUTIONS D'ORGANES DE COMMANDE EXISTANTS

Les organes de commandes montrés ci-après sont issus de brevets déposés par des acteurs du domaine de la serrure. La liste n'est pas exhaustive, mais montre les deux approches principales qui sont : l'emploi d'un actionneur à entraînement direct ou l'emploi d'un moteur associé à un réducteur.

2.1. Solution à entraînement direct

L'électroaimant (ou actionneur « solénoïde »), est sans conteste le dispositif le plus commun pour transformer une énergie électrique en une énergie mécanique, est employé dans certaines serrures. Le courant parcourant la bobine crée un flux magnétique qui attire une pièce mobile (noyau plongeur) de manière à minimiser la réluctance du circuit magnétique. Le noyau mobile présente une extrémité en forme de fourchette qui bloque ou non le mécanisme de la serrure. Notons que ces dispositifs ne sont pas polarisés, si bien que la fourchette se trouve attirée quelle que soit la polarité du courant dans la bobine. Le retour de la fourchette en position verrouillée est donc assuré par un ressort. Un tel exemple d'emploi de solénoïde est décrit dans le brevet US8141399 [2] (voir Fig.1).

Ce type d'actionneur est produit facilement, à coût raisonnable, en raison de son faible nombre de pièces. La consommation pour déverrouiller n'est que de quelques milli joules (mJ). Cependant, sur certains designs de serrure, il est impératif de maintenir la bobine alimentée jusqu'à ce que l'utilisateur tourne la clé, si bien que le bilan énergétique peut se trouver dégradé.

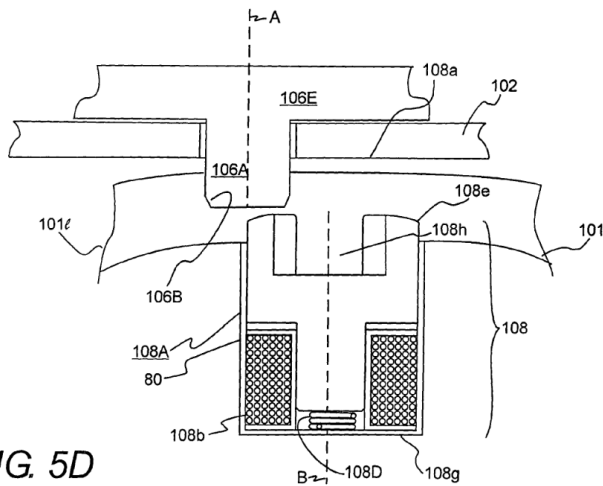


FIG. 5D

Fig.1 Serrure à entrainement direct par électroaimant.

Les attaques magnétiques connues consistent à approcher un aimant de haute énergie au contact de la serrure, et éventuellement à pivoter cet aimant en vue de faire tourner le champ dans la serrure.

Pour ce type d'actionneur, l'application d'un champ magnétique extérieur intense va jouer le même rôle que la bobine en générant un flux dans le circuit ferromagnétique qui conduit à la génération d'une force sur la masse mobile. Contre cette attaque, la solution la plus aisée et la plus commune est de blinder avec un matériau ferromagnétique doux avec une induction de saturation élevée, afin de détourner le flux magnétique externe, de l'actionneur de commande.

De plus, la compacité de l'actionneur de commande permet le cas échéant de le loger au plus profond de la serrure, compliquant d'autant plus la génération d'un champ de grande intensité. Dans le cas où toutes ces précautions ne permettaient pas de diminuer suffisamment le champ magnétique au niveau de l'actionneur, l'électroaimant déverrouillerait alors potentiellement la serrure car le champ externe jouerait le même rôle que la bobine.

2.2. Solution à moteur et réducteur

Au cours des 30 dernières années, les moteurs électriques miniatures sont devenus des commodités. Cette propagation a accompagné la diffusion de l'électronique pour le grand public. Ainsi, ces petits moteurs se trouvent employés dans tous les appareils photos (autofocus, zoom) ou encore les téléphones portables (vibreurs). Tout naturellement, ces moteurs ont aussi été employés dans les serrures en raison de leur compacité. On trouve ainsi de petits moteurs à courant continu (DC) de Ø4mm x 10mm de long. En plus de leur taille réduite, ces moteurs présentent l'intérêt de pouvoir effectuer un nombre illimité de rotations. Associés à des mécanismes de réduction (engrenages, vis/écrous), leurs rotations sont réduites à des déplacements de quelques degrés ou de quelques dixièmes de mm.

Une telle réduction de mouvement rend alors la serrure insensible aux attaques par choc (le choc ne permet pas au moteur de tourner sur plusieurs tours).

Un exemple de mécanisme avec vis/écrou et moteur DC (repère 49) est montré dans le brevet EP1576246 [3] (voir Fig.2).

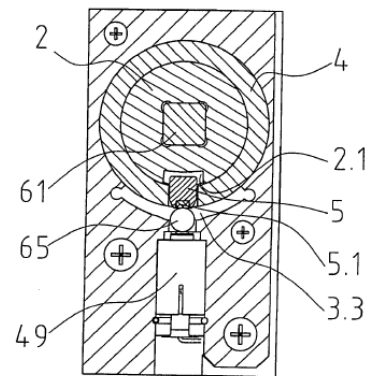


Fig.2 Serrure à entrainement par moteur à courant continu (rep 49)

En contrepartie de leur immunité aux chocs, les consommations mises en œuvre pour ces solutions sont élevées (typiquement 100mJ), ce qui est préjudiciable pour la durée de vie de leur batterie. En effet pour effectuer plusieurs tours de moteur, les temps d'actionnement sont élevés (une vingtaine de ms) et les mécanismes ont de piètres rendements. La consommation pour maintenir la serrure ouverte est nulle, car le moteur est naturellement stable sans courant.

En plus d'être insensibles aux chocs, ces solutions sont aussi très robustes face aux attaques magnétiques, en raison du principe de fonctionnement de leurs moteur DC.

Une alternative originale au moteur DC est proposée par M. Flueckiger [4] avec un actionneur piézo-électrique. Cependant, la nécessité d'embarquer une électronique de commande, de tension élevée paraît peu réaliste avec l'encombrement d'un cylindre de serrure européen standard.

2.3. Solution à entrainement direct à moteur

Comme nous l'avons souligné préalablement, les petits moteurs à courant continu sont courants et bon marché, si bien que des fabricants de serrure les emploient aussi en direct, sur des courses limitées de l'ordre de 90°. Ils sont pilotés d'une butée à une autre et sont capables de tourner dans les deux directions en changeant leur polarité d'alimentation.

En conséquence, les temps d'actionnement sont réduits et les consommations sont aussi faibles que celles des solutions à solénoïde (voir 2.1). Elles surpassent même ces dernières solutions par le fait que le moteur est capable de maintenir la position serrure déverrouillée sans courant, puisqu'il ne doit pas lutter contre un ressort de retour en position.

Une telle solution est présentée dans la demande de brevet [5] FR2808552 (voir Fig.3). Le moteur (#17) est relié à une came (#36) qui autorise ou non en fonction de la position le déplacement d'une goupille de verrouillage (#15).

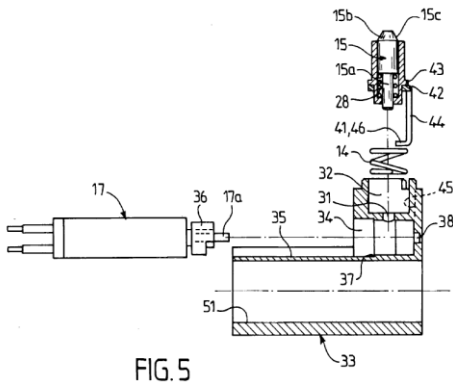


Fig.3 Serrure à entraînement par moteur DC (rep. 17) sur 90°

Toutefois, cette solution est très sensible aux attaques par chocs ou par vibrations. Pour répondre à cette problématique, on trouve un brevet [6] FR2849083 dans lequel il est revendiqué l'introduction d'une bille flottante (#33) dans la cavité balayée par la came (#23). En cas de chocs, la bille se déplace et force la came à conserver la position verrouillée (voir Fig.4).

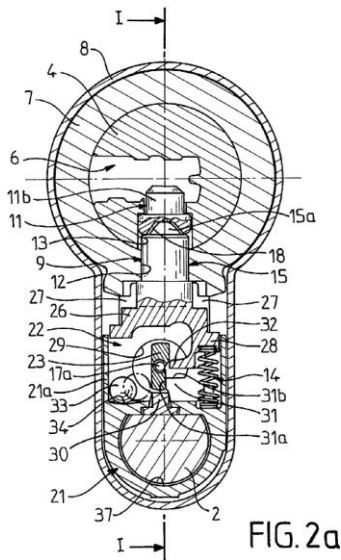


Fig.4 Serrure à bille pour résister aux chocs

De par la nécessité de l'introduction de tels artifices, nous voyons que cette solution n'est pas complètement sûre, d'autant plus que les moteurs DC sont parfois critiqués pour leur faible fiabilité en raison de la présence de contacteurs frottant (balais ou charbons) : sujets à l'usure, à l'étincelage et au grippage après de longues périodes sans utilisation en milieu extérieur comme le sont parfois les serrures.

Les 3 solutions d'actionnement pour serrure peuvent être comparées ainsi sur le Tableau 1. Ce résumé nous permet de définir une solution idéale d'actionnement: en direct et stable sans courant.

Actionneur	Consommation	Résistance aux chocs	Résistance attaques magnétiques
Solenoid	+/-	-	+ (avec blindage)
Moteur + réducteur	-	+	+
Moteur en direct	+	-	+

Tableau 1. Résumé des solutions existantes

3. DEFI DE MAINTENIR UNE POSITION STABLE

MMT a 25 ans d'expérience dans la conception et le dimensionnement d'actionneurs électromagnétiques à entraînement direct. Parmi ces actionneurs, certains présentent des comportements bi-stables sans courant à leurs extrémités de course. Cette caractéristique provient du design particulier des pièces ferromagnétiques qui canalisent le flux de l'aimant. Ainsi, par exemple, sur un actionneur de la famille du brevet EP1581991 [7], le flux de l'aimant crée du couple de collage en début et fin de course lorsque le mobile est contre ses butées mécaniques. En Fig.5, nous représentons la structure dans les positions début et milieu de course.

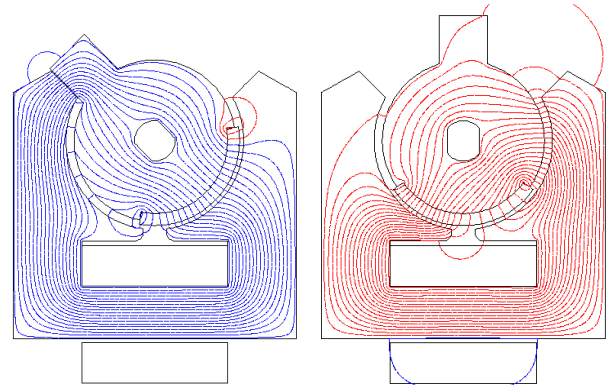


Fig.5 Actionneur bi-stable en début et milieu de course

Sur ce type de structure, la réluctance du flux magnétique en début et fin de course est beaucoup plus faible qu'en milieu de course, si bien que ces deux positions extrêmes sont stables sans courant. En milieu de course, le couple est proportionnel à la force magnétomotrice de la bobine.

C'est ce même principe que nous avons premièrement employé pour réaliser un actionneur en direct de serrure (voir Fig.6). Un rotor de verrouillage empêchant l'action de la clé était maintenu au contact du stator par attraction magnétique. Cependant, malgré le couple sans courant important, les chocs sur la serrure permettent de déverrouiller.

Cet actionneur compact était intégré loin du milieu extérieur et blindé contre les attaques magnétiques.

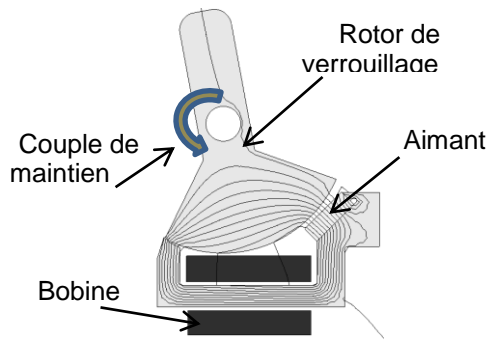


Fig.6 Actionneur à rotor maintenu en butée par attraction magnétique

Une évolution majeure du concept a été d'introduire un crochet de maintien mécanique du rotor. Les pièces étaient maintenues en position stable par attraction magnétique, mais elles devaient se déplacer en direction opposées pour déverrouiller. Le rotor était entraîné par l'action de la bobine et le crochet par un ressort. Ce concept est présenté en Fig.7. A nouveau, un tel actionneur ne permet pas de maintenir la position verrouillée lors d'un choc.

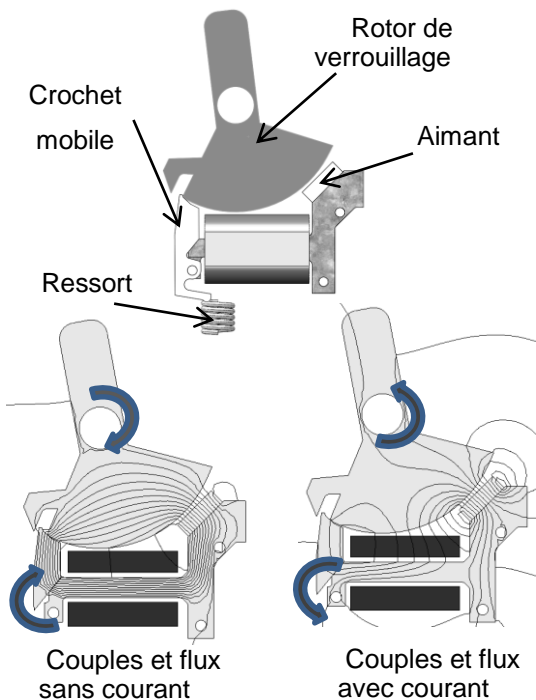
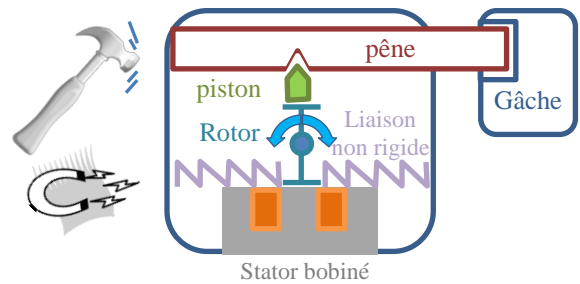


Fig.7 Actionneur à crochet de verrouillage

Lors des essais, nous avons observé que l'onde de choc se propageait du stator vers le rotor au niveau des zones de contact. Cette onde de choc parvenait dans tous les cas à générer un déplacement de la partie mobile, déverrouillant ainsi la serrure. Ainsi, nous avons imaginé un concept d'actionneur rotatif avec un rotor équilibré autour de son axe de rotation, afin d'être moins sensible aux accélérations linéaires, maintenu en position sans contact rigide avec les autres pièces en dehors de son axe de rotation. Ce maintien sans contact rigide fait office de filtre mécanique, cela s'apparente mécaniquement à une raideur. Ce concept (voir Fig.8) a fait l'objet d'une demande de brevet [8].



-Le levier est libéré sous l'action du stator bobiné libérant le pêne et autorisant le mouvement.

-Le levier est bloqué et maintenu en position verticale par une liaison non-rigide (filtre) avec le stator. Il bloque le pêne via le piston.

-Sous un choc extérieur, le levier, dont le centre de gravité passe par l'axe de rotation et grâce à la liaison mécanique non-rigide, reste en position. La serrure reste inviolée...

Fig.8 Principe d'actionneur de serrure stable

4. PROTOTYPE

4.1. Présentation de l'actionneur

Comme évoqué précédemment, nous avons besoin de réaliser un actionneur rotatif dont le rotor, équilibré, présente une raideur par rapport aux pièces fixes. Si cette raideur pourrait être réalisée par le biais d'un composant élastique (ressort), nous avons opté pour une raideur magnétique. En effet, l'actionneur électromagnétique à entraînement direct envisagé comporte déjà un aimant.

L'actionneur est de type plan, de manière à ce que le stator puisse être constitué d'un paquet de tôles découpées. L'aimantation du rotor ainsi que les pôles du stator ont été optimisés de manière à créer une raideur magnétique sans courant dans la position 0° (position verrouillée), tout en ayant un couple avec courant important et un couple magnétique sans courant contre une butée mécanique à 45° (position déverrouillée), comme nous pouvons le voir sur la Fig.9. L'actionneur pouvant passer indifféremment d'une position à l'autre en fonction de la polarité d'alimentation de la bobine (voir Fig.11).

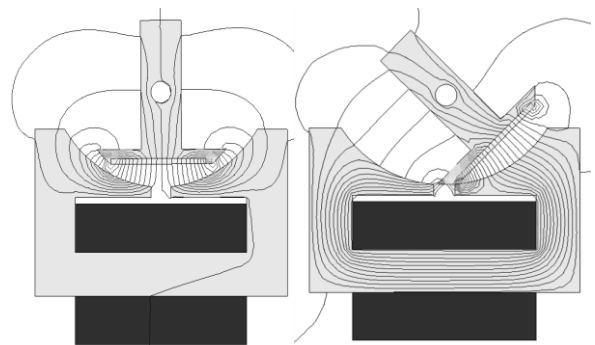


Fig.9 flux magnétique sans courant dans les positions 0° et 45°

L'actionneur a été intégré dans un démonstrateur au format d'un cylindre de serrure européen (voir Fig.10). Ses dimensions dans le plan sont 12,5x9mm² pour une hauteur de 4mm.

4.2. Résultats du prototype

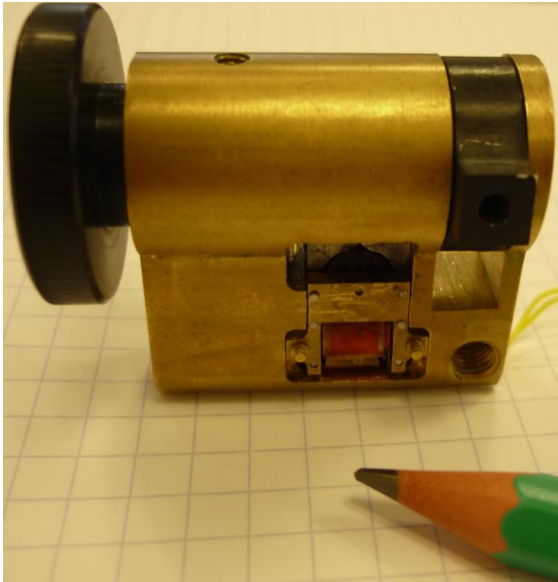


Fig.10 Prototype intégré dans un cylindre de serrure

Nous avons caractérisé les couples statiques avec et sans alimentation du prototype. Pour ce faire, le rotor est relié à un capteur de force, ce qui bloque sa rotation. Le stator est relié à un axe de rotation équipé d'un capteur de position angulaire. La rotation du stator par rapport au rotor permet de tracer les courbes de couple en fonction de la position (voir Fig.11). Ces courbes corrélient les simulations effectuées.

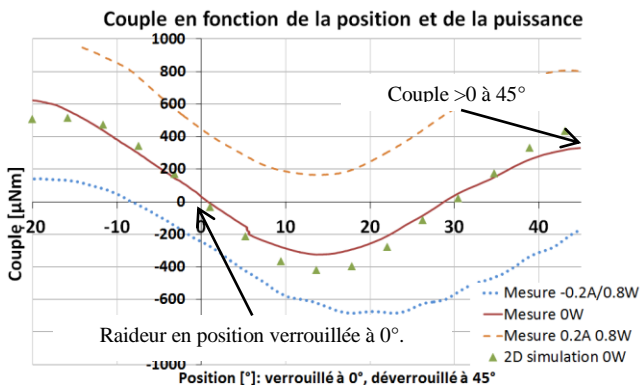


Fig.11 Mesures de couples avec et sans courant sur le prototype

Il est d'usage sur les serrures alimentées par leur clé de piloter l'actionneur au moyen d'une décharge de condensateur. Ainsi, nous avons alimenté l'actionneur par une décharge de condensateur chargé de 4mJ. Le temps de parcours est de 8ms pour déverrouiller la serrure. Pour visualiser le temps de parcours, nous pouvons observer le courant dans la bobine (voir Fig.12). Nous notons ainsi une rupture de pente à 8ms qui correspond à une variation brutale de tension induite, liée à l'arrivée du rotor contre sa butée rigide à 45°.

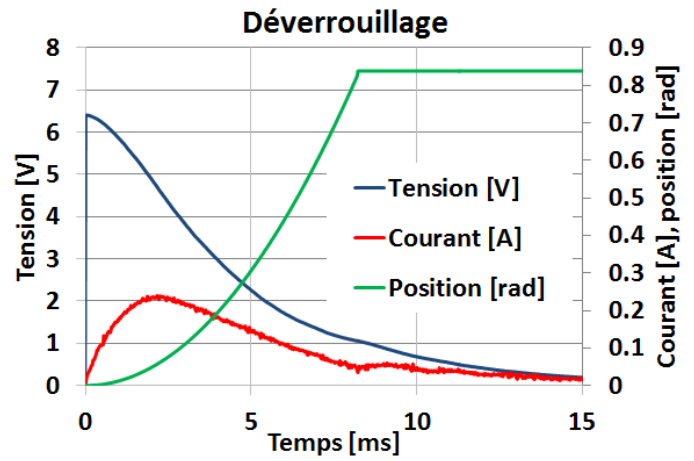


Fig.12 Courbes dynamiques de déverrouillage

En sens inverse, lorsque le rotor se déplace pour verrouiller la serrure, il n'y a pas de butée franche pour le rotor et il s'arrête en raison de la raideur à 0°. La conséquence est qu'il oscille alors à la fréquence de 106Hz comme en témoignent les oscillations visibles sur le courant (voir Fig.13).

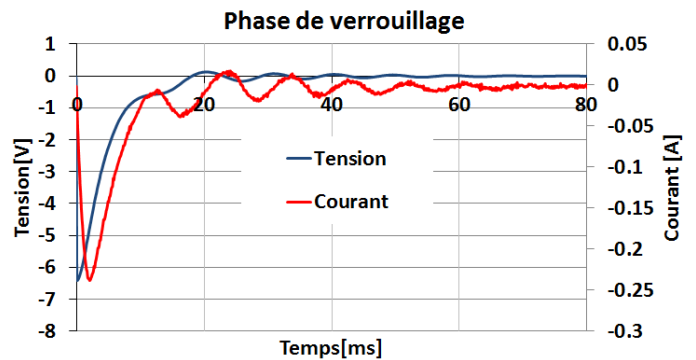


Fig.13 Courbes dynamiques de déverrouillage

Afin d'étudier la stabilité de l'actionneur sous l'effet de chocs, nous avons constitué un banc de mesure dédié (voir Fig.14). La serrure est bridée sur une pièce en acier. Cette pièce est percutee entre un marteau et un buttoir. Le marteau est accéléré par un ressort de compression dans lequel 60J sont stockés. Cette énergie est équivalente à l'énergie d'une masse de terrassement de 4kg qui serait lâchée au bout d'un manche de 75cm de long contre la serrure.

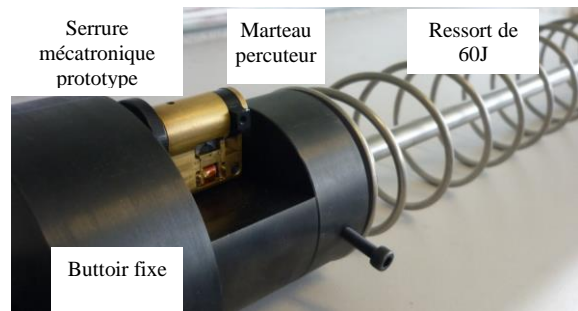


Fig.14 poste de test de tenue aux chocs

Pour valider la qualité du verrouillage, on ne peut pas se contenter de visualiser l'état de la serrure après un choc. Il faut aussi s'assurer que pendant le choc le rotor reste bien dans la position de verrouillage. Pour ce faire, nous filmons en très haute vitesse (typiquement 15000 images/s) la serrure pendant l'impact (durée <10ms), voir Fig.15.

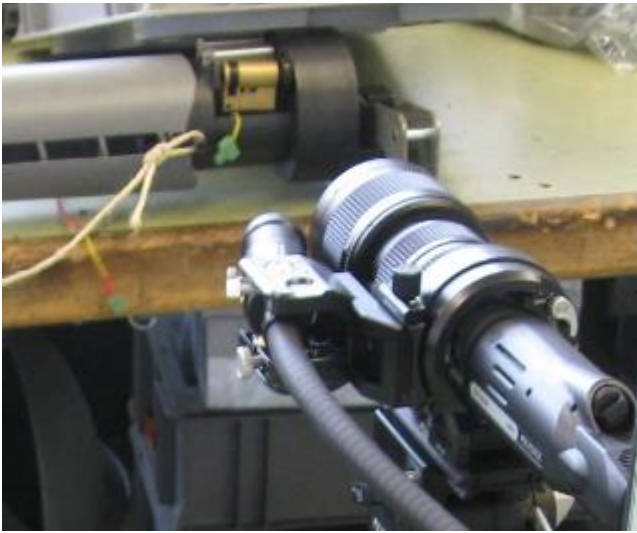


Fig.15 film haute vitesse du comportement sous choc

Ces tests de chocs n'ont pas mis en défaut l'actionneur, qui a bien maintenu la serrure verrouillée.

La fréquence d'oscillation de 106Hz que nous observons lors du retour en position verrouillée (voir figure 13) est la fréquence propre du système inertie/raideur que constitue le rotor. Ainsi, il est à craindre que si on applique une force sinusoïdale à cette même fréquence, nous puissions faire entrer le rotor en résonance, au risque de déverrouiller la serrure. Pour tester ce type d'attaque, nous avons fixé la serrure à un batteur électromagnétique chargé de compenser les vibrations des moteurs thermiques. Les différents essais réalisés ne nous ont pas permis de mettre le rotor en résonance et le faire quitter sa position d'équilibre stable. Nous n'avons donc pas pu

déverrouiller la serrure par ce moyen. La raideur magnétique a bien joué son rôle de filtre.

5. CONCLUSIONS

Au travers de cet article, nous avons montré quels étaient les trois principaux types d'actionneurs employés dans les cylindres de serrures mécatroniques. Nous avons souligné les qualités et les défauts de chacun. Nous avons ensuite présenté la démarche qui nous a amené à une idée originale pour développer un concept d'actionneurs à entraînement direct, gage d'une consommation réduite, qui présentent une excellente stabilité face aux agressions extérieures et particulièrement face aux chocs.

Ce concept a été appliqué à un actionneur à aimant mobile, en travaillant le couple de détente engendré par la présence de l'aimant. Enfin, nous avons exposé les résultats obtenus sur un prototype d'actionneur miniature complètement intégré à une serrure de format européen standard. Ce principe de maintien en position face aux chocs est générique et pourrait être appliqué à d'autres topologies d'actionneurs et à d'autres applications.

6. REFERENCES

- [1] Yong-Tae Park; Sthapit, P.; Jae-Young Pyun, "Smart digital door lock for the home automation," TENCON 2009 - 2009 IEEE Region 10 Conference , pp.1,6, 23-26 Jan. 2009.
- [2] Electromechanical cylinder plug », Brevet US8141399, Mai 2003
- [3] « Dispositif de verrouillage », Brevet EP1576246, Dec. 2003
- [4] Flueckiger, M.; Zogg, W.; Perriard, Y., "Optimal design and sensorless position control of a piezoelectric motor integrated into a mechatronic cylinder lock," Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010 IEEE , pp.3428,3433, 12-16 Sept. 2010
- [5] « Serrure à déverrouillage mécanique et électrique », demande de brevet FR2808552, Mai 2000
- [6] « Serrure sécurisée à déverrouillage mécanique et électrique », Brevet FR2849083, Juin 2004
- [7] « Actionneur rotatif bistable monophasé hybride », brevet EP1581991, Janvier 2004
- [8] « Dispositif de verrouillage motorisé résistant aux chocs », demande de brevet FR2994997, Juillet 2013