

Rapport de vol

Projet Big Bird (FX15)



Association SpaceTech

Août 2018

Table des matières

Introduction.....	3
1- Le projet <i>Big Bird</i>	3
2- Système de récupération et de détection d'apogée	4
2.1Détails concernant le système de récupération.....	4
2.2Détails concernant le système de détection d'apogée	6
3- Qualification pré vol	7
4- Vol de la fusée	8
4.1 Chronologie	8
4.2 Déroulé du vol	9
4.3 Tentative de récupération.....	9
5- Analyse du vol, cause de l'accident.....	11
6- Points à améliorer	12

Projet Big Bird (FX15) - Association Space'Tech – C'Space 2018

Introduction

Le présent rapport est la conclusion de la mise en œuvre du projet de fusée expérimentale *Big Bird* de l'association *SpaceTech* lors de la campagne de lancement *C'Space* 2018. Ce vol s'est soldé par une trajectoire balistique. L'épave de la fusée expérimentale n'ayant pas pu être récupérée, ce rapport va tenter de mettre en lumière les causes ayant mené au crash et ainsi ce qui pourra être modifié pour les vols futurs.

1- Le projet *Big Bird*

Se reporter au dossier de conception du projet présent sur le drive de l'association ainsi que sur la plateforme *Planète Sciences SCAE* pour tout détail inhérent à la conception. Dans les grandes lignes, on rappellera ici que *Big Bird* est la première fusée expérimentale de l'association. C'est un projet qui a été mis en œuvre sur 2 ans, notamment à cause de la complexité de la mise au point de la peau en fibre de carbone (première version « faite maison » abandonnée au profit d'un tube industriel). Les expériences embarquées sont :

- Une centrale inertielle permettant d'enregistrer l'attitude de la fusée au cours du temps (angles d'Euler)
- Une caméra embarquée
- Déploiement du parachute par détection d'apogée
- Initialement, un module de télémétrie « fait maison » basé sur le système LoRa était prévu, le module n'était pas prêt pour le vol en 2018 de nombreux problèmes restant à corriger même après plus d'un an de projet



Figure 1: La fusée *Big Bird* en configuration prête pour le vol - *C'Space* 2018

2- Système de récupération et de détection d'apogée

On rappelle le fonctionnement de l'expérience de détection d'apogée:

Un parachute circulaire de grand diamètre sera déployé lors de la détection de l'apogée pendant le vol de la fusée. Un système de minuterie se déclenchant lors du décollage de la fusée (ouverture de la prise Jack, $t = 0$) assure que le déploiement du parachute ne se déclenche pas trop tôt par une détection d'apogée erronée ($t > t_1$) mais également comme une sécurité dans une situation où le système de détection d'apogée ne fonctionnerait pas correctement ($t > t_2$).

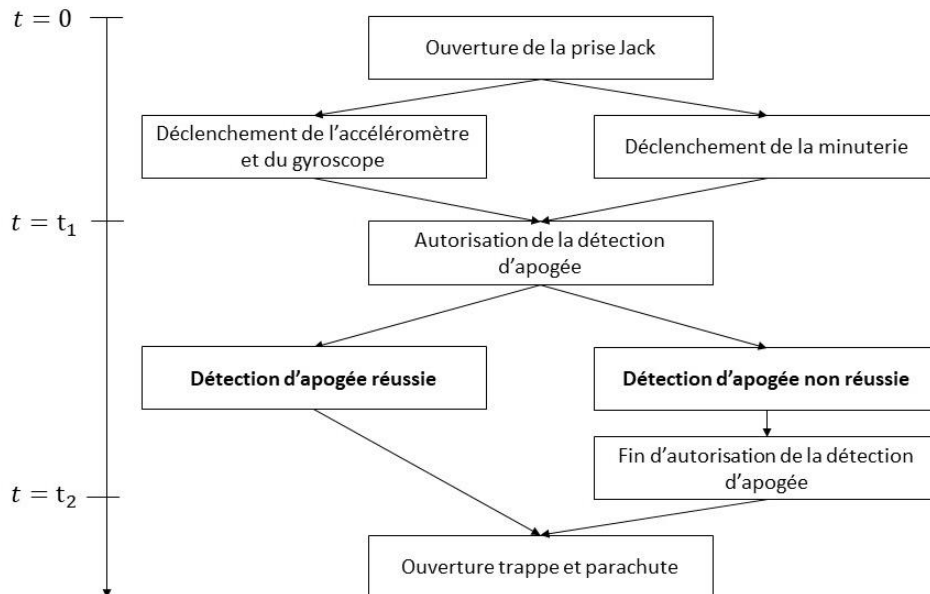


Figure 2: Principe de l'expérience

Le système de déploiement du parachute, contrôlé par la commande de détection d'apogée (ou la minuterie en cas de défaut), consiste en un électroaimant et un ressort. L'électroaimant permet le maintien d'une trappe latérale au corps de la fusée, et le ressort permet de faciliter l'éjection de la trappe et du parachute.

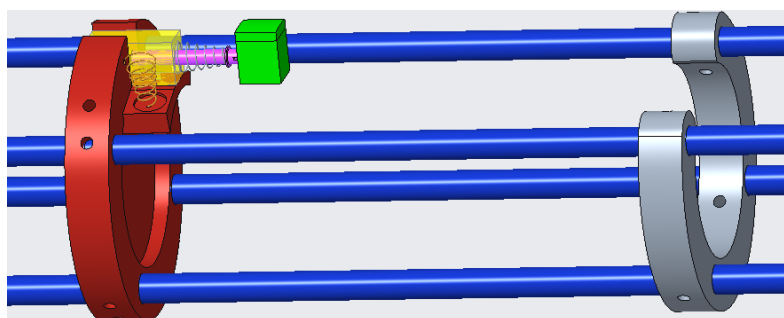


Figure 3: CAO du système d'éjection

2.1 Détails concernant le système de récupération

Dans les faits l'électroaimant présent sur l'image ci-dessus a été remplacé par un système de verrouillage à l'aide d'une cloche pivotant sur un servomoteur venant bloquer un loquet présent sur

Projet Big Bird (FX15) - Association Space'Tech – C'Space 2018

la trappe. Le ressort est toujours présent comme le témoigne la photo du système prise lors du C'Space :

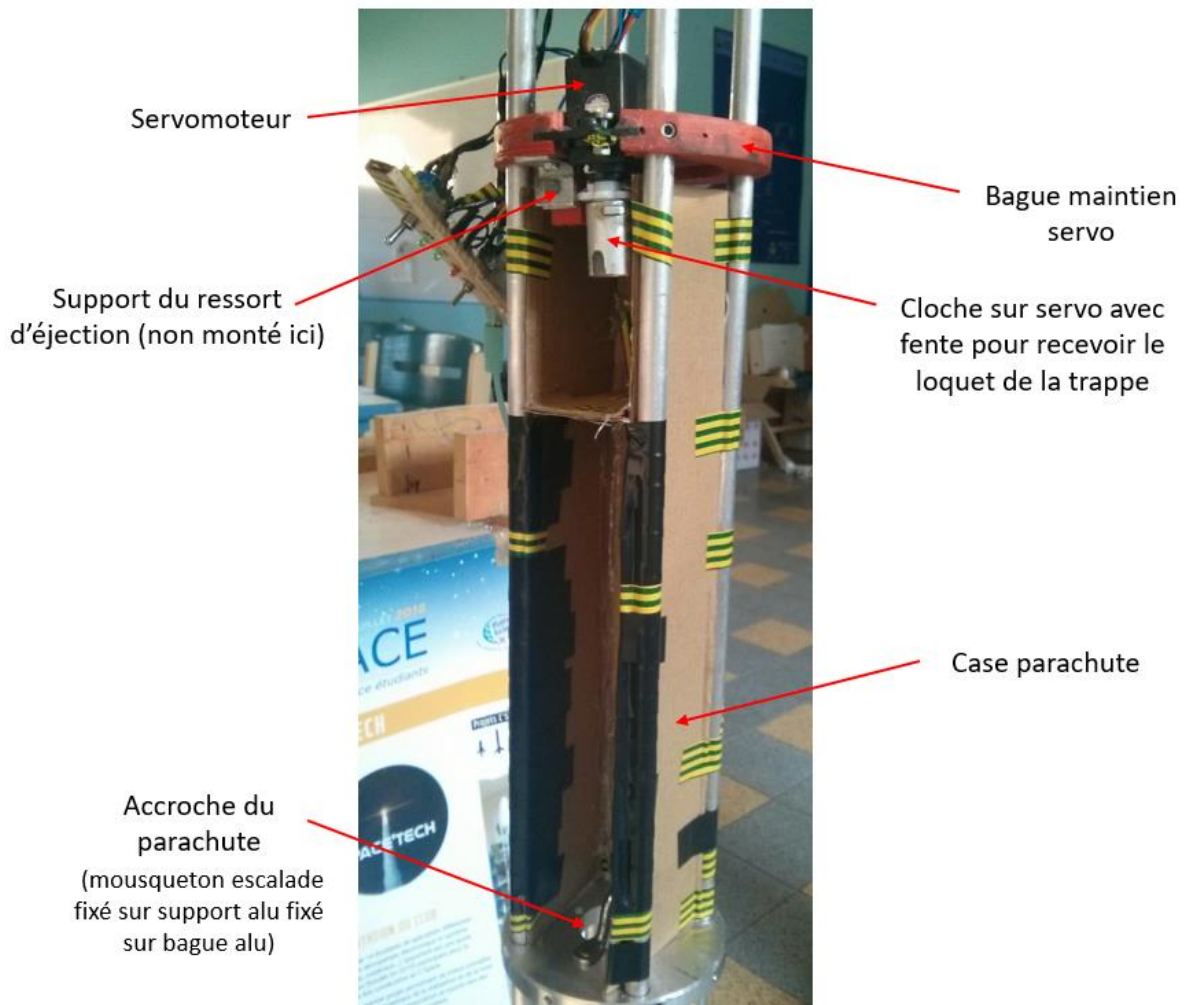


Figure 4: Système de récupération Big Bird

Le parachute (fabriqué par l'entreprise *Fruity Chutes*) était équipé d'un émerillon fait par l'entreprise et d'un anneau anti-torque fabriqué et testé sur place. Le parachute était lié à la fusée par l'intermédiaire d'une corde tressée de diamètre 1 cm attachée à l'aide d'un nœud marin à un mousqueton d'escalade lui-même fixé sur la bague en aluminium présente sur la photo ci-dessus. Ceci constitue l'ensemble dit « chaîne de vol ».

Plusieurs tests de déploiement consécutifs ont été menés avec succès aboutissant à la confirmation de la viabilité du système.

2.2 Détails concernant le système de détection d'apogée

Comme précisé ci-dessus, le système de détection d'apogée présente une **fenêtre temporelle** durant laquelle l'ordinateur de bord (ici une *Raspberry Py*, le séquenceur, i-e la minuterie, étant géré par une carte *Arduino Nano*) peut décider d'éjecter le parachute si la détection d'apogée est confirmée (temps t_1 et t_2 sur la figure 2). Ce fenêtrage a été défini comme plus ou moins 2 secondes autour de l'apogée.

Pour le cas de la fusée Big Bird le jour du vol, l'apogée prévue par la feuille excel *trajecto* était de 17,2s. Il a donc été décidé de mettre en place une fenêtre temporelle d'autorisation de détection d'apogée entre 15 et 19s. Les charges subies par le parachute pour un déploiement prématuré ou trop tardif en cas de mauvaise détection ont été testées lors de la qualification (voir dans la suite du rapport).

Le critère de détection d'apogée (un retour critique sera proposé à ce propos par la suite) concerne la norme du vecteur accélération s'appliquant à la fusée. Pour que la détection soit faite, il faut que :

$$\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \leq 0,2g$$

Avec a_x , a_y et a_z les composantes du vecteur accélération selon les directions x, y et z et g l'accélération de la pesanteur terrestre. L'altitude visée pour le vol (se reporter à la version finale du *trajecto*) est de 1600 m pour une vitesse de pointe de 218 m/s (785 km/h) et une accélération maximum de 11 g.

3- Qualification pré vol

Lors de la qualification mécanique, électronique ainsi que de l'expérience, la fusée *Big Bird* s'est comportée nominale. Il est à noter que les tests de tenue mécanique se sont passés de manière optimales et soulignent la robustesse du design développé (peau en fibre de carbone et structure porteuse composite aluminium/ABS imprimé 3D) qui allie solidité et légèreté (seulement 5,9 kg sans le propulseur *Pro54*). Reste cependant à signaler quelques points sûrement importants pour la suite du rapport :

- Il était nécessaire pour être qualifié de réaliser 5 mises en œuvre réussies successives du système de récupération. A noter que sur les multiples tests menés **une seule anomalie (déploiement aux alentours de 16s) a été constatée**. Cependant les tests suivants ainsi que le vol simulés ont été concluants.
- Comme mentionné précédemment, en vue d'une estimation erronée de la détection d'apogée, **les charges dites « maximum » s'appliquant au parachute lors d'un déploiement prématuré ou trop tardif ont été testées par traction sur la chaîne de vol** (plus particulièrement la corde entre le parachute et la fusée) et mesurées à l'aide d'un dynamomètre. Ces forces étaient de 462 N (46,2 kg) pour un déploiement à 15s et 365 N (36,5 kg) pour un déploiement à 19s soit 21% de différence. Un déploiement optimal à 17s garantissait une force de 260 N (26 kg), soit 30% de moins que la charge lors d'un déploiement tardif. **Conformément au cahier des charges, une force deux fois supérieure à la charge pour un déploiement nominal (soit 52 kg) a été testée ainsi que chaque suspente suivant la procédure de qualification.**
- Il a été suggéré durant le processus de qualification d'éventuellement doubler la corde ou d'y placer un élastique afin d'absorber le choc du déploiement. Devant le succès du test de traction ces idées ont été abandonnées.

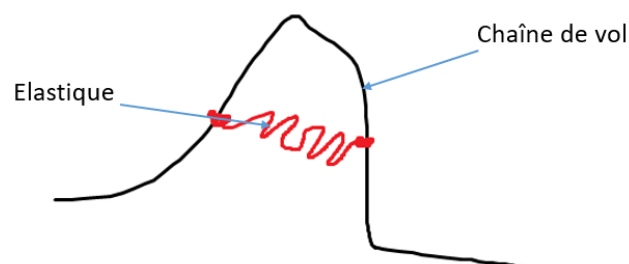


Figure 5: Schéma d'un système d'absorption de choc de déploiement

Projet Big Bird (FX15) - Association Space'Tech – C'Space 2018

4- Vol de la fusée

4.1 Chronologie

Le vol s'est déroulé le mercredi 18 août aux alentours de 11h30 selon la chronologie validée lors de la qualification. Les batteries de la fusée ont été rechargées à la suite du vol simulé juste avant le vol réel.

La chronologie suivie est la suivante :

Quand?	Quoi?	Où?	Qui?
	Vérifier tempo ARDUINO	Atelier	Alexis
	Vérifier tempo PI	Atelier	Alexis
	vérifier que mémoire SD vide	Atelier	Alexis
	intégrer la carte SD sur la PI	Atelier	Alexis
	Vérifier branchement camera	Atelier	Alexis
	Vérifier pleine charge des batteries	Atelier	Alexis
	intégration batterie 1	Atelier	Alexis
	intégration batterie 2	Atelier	Alexis
	Intégration peau (enfiler + visser)	Atelier	Antoine Eduardo
	Installation cale butée basse propu	Atelier	Antoine
	Intégration interrupteur et led + fixation	Atelier	Eduardo
	plier et mettre parachute et chaîne de vol dans trappe	Atelier	Alexis Antoine
	Nettoyage hublot caméra	Atelier	Eduardo
	verrouiller trappe (ON/OFF)	Atelier	Antoine
TRANSFERT VERS TENTE CLUB			
TRANSFERT VERS ZAS Fusex			
	Branchement Jack	pas de tir	Eduardo
	Insertion fusée rampe	pas de tir	Antoine Eduardo
	Accrocher le jack male à la rampe de tir	pas de tir	Eduardo
	Allumage de la switch générale -> lancer Chrono batterie	pas de tir	Antoine Eduardo
	Confirmation allumage LED main switch	pas de tir	Eduardo
	Attendre 2 minutes le boot (activation caméra)	pas de tir	
	Activation switch sécu	pas de tir	Antoine
	Confirmation allumage LED sécu	pas de tir	Eduardo

A noter que la fusée nécessitait très peu d'étapes à mettre en œuvre sur la ZAS, réduisant ainsi drastiquement le nombre d'erreur susceptibles d'être commises lors de la mise en rampe.

Projet Big Bird (FX15) - Association Space'Tech – C'Space 2018

4.2 Déroulé du vol

Le vol s'est déroulé par temps clair avec quelques nuages. La vitesse du vent en dessous des 100m d'altitude était de 7 m/s environ. La température d'un peu moins de 30°C. Le lanceur n'est resté sur rampe une fois ces batteries activées qu'environ 10 minutes.

A $t=0s$, l'ordre de tir est donné. Allumage correct du propulseur *Pro54*. La fusée décolle et présente une trajectoire très stable avec un très faible roulis. Elle perce un nuage et culmine. Plusieurs versions (selon le point d'observation) sont observées. Dans chaque cas il est observé une éjection de la trappe correcte ainsi qu'un déploiement du parachute au moment de l'apogée. Presque en même temps, la fusée est observée en chute libre tandis que le parachute parfaitement gonflé effectue la descente seul, stabilisé par ce qui semble être l'émerillon. La fusée impacte le sol à la verticale quelques secondes plus tard à une vitesse estimée à 123 m/s (440 km/h) à une distance d'environ 1 km du pas de tir.

A noter que lors du vol : les pyrotechniciens ainsi que le club a pu constater un déploiement parachute au moment de l'apogée tandis qu'une des deux personnes présentes en LOC (localisation) constate un déploiement légèrement prématuré.

4.3 Tentative de récupération

L'azimut et l'inclinaison de la rampe étant connus il a été possible en croisant les témoignages visuels et les données avec la feuille excel trajec d'estimer la zone d'impact approximative d'un kilomètre carré. La distance couverte au sol par la fusée est d'environ 1 km. L'impact a probablement eu lieu dans le champ de maïs visible sur la carte ci-dessous rendant impossible la localisation par drone et difficile la localisation sur place. Une reconnaissance à pieds a eu lieu, mais en raison des conditions météo très défavorables une présence de seulement 30 min sur place a pu être mise en œuvre. Compte tenu de la surface importante à ratisser et du temps trop court sur place, il n'a pas été possible de retrouver la fusée.



Figure 6: Distance au sol couverte par la fusée



Figure 7: Zone d'impact hautement probable

5- Analyse du vol, cause de l'accident

L'épave de la fusée n'ayant pas pu être retrouvée, il est difficile d'avoir un avis tranché sur la cause de l'accident. **Néanmoins la cause la plus vraisemblable serait la rupture de la chaîne de vol au niveau de la corde liant le parachute à la fusée. Reste à savoir si ce déploiement a été prématuré ou tardif.** Il est cependant très difficile de l'affirmer car une observation au sol ne peut absolument pas garantir avec certitude un déploiement plus ou moins deux secondes autour de l'apogée. Il est à noter que :

- **La rupture a sûrement eu lieu au niveau de la corde reliant le parachute à la fusée car il est très peu probable que le mousqueton d'escalade ait lâché.** De plus le parachute a été observé durant sa chute comme intact, gonflé et stable de par la présence de l'émerillon. Impossible de distinguer à l'œil nu si une longueur de corde subsistait après ce dernier. Il est également possible que l'un des deux nœuds (au niveau de l'émerillon ou du mousqueton) se soit défait mais ils ont cependant été testés et de plus couverts de colle pour le vol.
- **Les charges maximum sur le parachute ayant été testées on aurait pu penser que la chaîne de vol résiste au choc de déploiement.** On pourrait alors penser que les tests successifs auraient à force abîmé la chaîne de vol mais cela paraît peu probable. Il est à noter cependant que **quel que soit le moment de la fenêtre temporelle ou le parachute c'est déployé, le choc a été un à-coup violent et non un effort progressif comme ce qui a été testé en phase de qualification (cf. la section suivante de ce rapport).**
- **Le critère de détection d'apogée n'était pas correct.** En effet, une accélération très faible voire nulle veut tout simplement dire que la vitesse de la fusée est constante, pas forcément nulle. En effet, cette dernière peut se trouver pendant un temps d'observation très court (celui de la centrale inertielle pendant le fenêtrage temporel) en trajectoire rectiligne et uniforme, ayant une vitesse élevée et vérifiant pourtant le critère de l'ordinateur de bord. **Ce critère erroné a probablement été la cause du test de déploiement raté mentionné plus haut.** D'autres méthodes de détection d'apogée devront donc être mises en place (cf. section suivante).

Il est donc sensé d'avancer que l'échec du vol est dû à une section de la chaîne de vol au niveau de la corde liant la fusée au parachute due à un déploiement trop violent pour le diamètre de la corde employée et ayant sûrement eu lieu au début du fenêtrage temporel pour une charge 20% plus importante que l'optimum. Ce déploiement précoce étant très difficile à observer depuis le sol il serait très intéressant de retrouver l'épave de la fusée afin d'analyser les données présentes sur la carte SD dans l'éventualité où les données se trouvant sur cette dernière n'ont pas été corrompues lors de l'impact. Cette carte se trouvant à un endroit protégé on peut supposer qu'elle a survécu au choc. De la même manière une analyse de l'épave ou du parachute serait très intéressante pour confirmer, ou non la théorie de la rupture de la chaîne de vol au niveau de la corde.



Figure 8: Test de déploiement du système de récupération

6- Points à améliorer

A la vue des conclusions tirées sur le vol, voici une série de mesures à prendre pour les prochains vols afin d'éviter des accidents de ce genre dans le futur :

- **Une attache de type sangle** devrait être maintenant utilisé pour faire le lien entre le parachute et la fusée. Ce type d'attache, couramment utilisé par d'autres associations pour leurs fusex garanti à la fois la tenue mécanique et l'absorption du choc lors du déploiement. Des attaches par cordes avec élastiques (voir figure 5) peuvent être utilisées (testées sur des vols minifs par exemple) mais nous recommandons fortement les sangles.



Figure 9: Attache parachute de type sangle, vol fusée FSX32 du CLES FACIL

Projet Big Bird (FX15) - Association Space'Tech – C'Space 2018

- Les **tests de qualifications d'attache parachute pourraient peut être être revus**. En effet, ils n'ont pas su déceler la faiblesse au niveau de la corde (s'il s'avère que c'est bien la cause de l'accident). **On pourrait alors proposer un test de tenue de la corde parachute avec à coup en plus de celui avec effort progressif (nécessite par contre un dynamomètre avec mémoire de mesure), ou par exemple un test de déploiement parachute avec la fusée sur support à l'horizontale et en hauteur tandis qu'un poids entraine la chaîne de vol et simule l'à coup du déploiement.**
- **Pour de futurs vols avec détection d'apogée, le critère de détection devra être revu.** Pleins d'autres possibilités s'offrent à vous : détection de minima locaux au niveau de l'accélération, détection de valeur maximum en utilisant un altimètre, etc. Cette année ce critère avait été choisi rapidement sans trop y réfléchir longtemps, n'hésitez pas à passer du temps la dessus et optimiser les systèmes de sauvegarde type « fenêtrage temporel » .
- **Un module de télémétrie** aurait permis de récupérer certaines données lors du vol malgré la perte du lanceur. Si le module « fait maison » avec le LoRa ne semble finalement pas adapté à cette mission (débit d'information beaucoup trop faible entre autres) un autre système pourrait être développé avec les nouvelles équipes de SpaceTech. Entre temps (car le développement d'un tel système peut prendre du temps) **l'utilisation d'un module KIWI fourni par planète sciences semble tout indiquée.** Le module est fiable, testé et au moins un membre de l'association se rend chaque année à la formation télémétrie mise en place par planète sciences.

Conclusion

Voici en définitive tous les points à retenir de ce vol, ce qui clôture le projet de 2 ans *BigBird*, première fusée expérimentale de l'association *SpaceTech*. Ce projet a permis de développer un savoir-faire au niveau de la conception, utilisation des matériaux pour optimiser la tenue de la charge et le poids, mise en œuvre de systèmes embarqués, qu'il ne faut absolument pas perdre pour permettre la mise en œuvre de projets toujours plus complexes et ambitieux les années suivantes ! Le but de ce rapport s'inscrit donc pleinement dans cette démarche d'amélioration continue. Un grand merci aux équipes de *Planète Sciences* et du CNES pour l'organisation et l'encadrement de cet évènement, ainsi qu'à toutes les personnes qui ont œuvré de près ou de loin sur ce projet durant deux ans. En souhaitant un bon vol à la future fusée de l'association *Space Beam* et on l'espère à toutes celles qui suivront, de plus en plus performantes !