

La Valeur du Concept de Réacteur à Sels Fondus Dans l'Innovation des Petits Réacteurs Modulaires

Simon Irish, PDG, Terrestrial Energy Inc.

Avril 2015

Je pense qu'il est assez clair que j'ai une expérience différente, par rapport à beaucoup de gens dans la salle aujourd'hui. J'ai une expérience de financement, de Wall Street, et beaucoup de gens ici ont plusieurs décennies d'expérience dans le secteur nucléaire.

J'espère que je serai en mesure d'offrir des idées commerciales que j'ai acquises par mon implication dans ce secteur, au cours des cinq dernières années. Mon intervention ce matin est: "La Valeur du Concept de Réacteur à Sels Fondus Dans l'Innovation des Petits Réacteurs Modulaires".

Exonération, il n'y a pas de représentations.

Pour commencer sur un ton plus léger, l'innovation des MSR se généralise! J'ai vu ceci sur un panneau sandwich devant Starbucks à New York il y a quelques mois. Starbucks invite tout le monde à parler avec leur Barista des réacteurs à sels fondus!

Notre avenir énergétique est défini par une montagne. Cette montagne se crée et se construit devant nous, et va être construit sur les deux prochaines décennies, pour la prochaine génération. Il est basé sur une demande croissante d'énergie primaire dans les économies non-OCDE.

Cette demande d'énergie est construite par six milliards de personnes, qui désirent le mode de vie de la classe moyenne que nous avons aujourd'hui en Occident. Si l'économie mondiale va fournir cette énergie pour répondre à ce désir, il faut énormément d'énergie propre.

Fournir cette énergie ne peut pas se faire comme nous avons reçu notre énergie en tant qu'économies développées à ce point dans notre développement, tout simplement parce que ce n'est plus acceptable. On a besoin d'une autre forme d'énergie.

Cette énergie est définie de façon plutôt succincte par le Conseil mondial de l'énergie, de la façon suivante. Cette fois, nous devons fournir une énergie qui a trois caractéristiques. Elle doit être sécurisée. Ça veut dire de l'énergie qui est sécurisée pour la nation souveraine, de l'énergie sécurisée, de l'énergie économique, à prix compétitif. Pas de croissance économique sans énergie à prix compétitif.

Elle doit être une énergie économique; elle doit être une énergie propre. Ceci s'appelle le trilemme, et résoudre le trilemme est probablement le plus gros problème d'investissement, économique, commerciale devant nous au cours des deux prochaines décennies, certainement, à mon avis.

Le Conseil mondial de l'énergie a sa propre opinion à ce sujet : Cette génération doit accepter de faire des choix difficiles, pour apporter de réels changements pour la génération future et pour la planète. Les

politiciens et l'industrie doivent être réalistes. C'est le point de vue du Conseil mondial de l'énergie sur ce problème.

Ceci est propre au 21e siècle. C'est probablement propre à la dernière décennie. C'est une nouvelle étoile polaire dans le ciel, qui pilote l'innovation de l'énergie dans toutes les économies mondiales. Les marchés sont émergents. Ils s'organisent pour trouver des solutions. A l'échelle mondiale il y a beaucoup d'entreprises qui travaillent sur ce problème. Il y a beaucoup d'individus qui travaillent sur ce problème.

Ils s'organisent dans la manière que font les marchés privés pour trouver des solutions à ce problème. Cette réponse aux besoins du marché n'est jamais linéaire. On ne voit pas beaucoup d'action jusqu'à ce qu'un seuil critique est atteint, jusqu'à ce que le besoin devient de plus en plus urgent. Ensuite, on a une réponse très rapide. On a un nouveau chapitre dans la dynamique du marché.

Nous sommes entrés dans ce nouveau chapitre. Nous y sommes probablement entrés il y a environ 10 ans, et la preuve est tout autour de nous. Ca ne concerne pas uniquement le secteur nucléaire. Ca concerne l'innovation de l'énergie en général. La preuve en est l'énergie solaire et éolienne, les biocarburants, le stockage; tous symptômes de ce besoin croissant du marché de résoudre le trilemme.

Et l'industrie nucléaire n'est pas du tout à l'abri de ces forces du marché. C'est un nouveau chapitre de l'innovation de l'énergie en général. Mais il y a une prise de conscience, probablement au cours des trois dernières années. Les alternatives actuelles ne peuvent pas résoudre à elles seules le trilemme. Le nucléaire doit, doit jouer un rôle.

Voilà une vue relativement récente qui, je pense que beaucoup dans la salle serait d'accord, a fait son chemin seulement au cours des trois dernières années. Donc, quel rôle peut jouer le nucléaire? Le nucléaire est certainement sécurisé et propre, mais le nucléaire ne coche peut-être pas cette case en termes d'énergie économique. Pour jouer un rôle dans la résolution du trilemme, le rôle important que devrait être son héritage, le nucléaire doit être commercialement compétitif.

Et cela signifie qu'il doit rivaliser sur la base de coût et de commodité avec les combustibles fossiles. Dire qu'il doit rivaliser dans sa propre industrie en tant qu'une technologie progressivement mieux que l'existante, je pense que c'est passer à côté de la question. Le nucléaire doit rivaliser au centre des marchés d'énergie. Concurrencer en matière de coûts et de commodité. Parce que seuls le coût et la commodité sont les moteurs principaux de l'entreprise.

Aujourd'hui, les technologies Gen III+ n'ont toujours pas démontré qu'elles peuvent offrir cet équilibre commercial important de coût et de commodité, et on utilise ce format depuis 60 ans. Donc le problème économique du nucléaire a besoin d'idées nouvelles. Le petit réacteur modulaire est considéré comme une partie de cette nouvelle solution.

Alors quel est la cible commerciale à atteindre pour le petit réacteur modulaire ? Voici un graphique, plutôt simplifié, de la science économique de l'énergie. Ici, on a le complexe de combustibles fossiles pour la fourniture d'énergie, globalement pas cher à construire, en coût du capital au jour-le-jour.

Une fois construit, il est assez coûteux à exploiter, et très risqué car dépendant des prix des matières premières. Ensuite, on a le nucléaire actuel: très coûteux à construire, et livré dans une taille unique - énorme. Mais une fois construit; on obtient les vertus merveilleuses du nucléaire actuel, une charge de base sécurisée, fiable et sûre.

La question pour l'innovation dans les petits réacteurs modulaires est d'occuper ce domaine ici. Il est défini comme une zone qui représente, côté capital, un petit réacteur modulaire qui est aussi bon marché et commode à construire que les alternatives aux combustibles fossiles.

Une fois construit, on a les merveilleuses vertus des coûts d'exploitation de nucléaire; une charge de base sécurisée, fiable et sûre. Donc ça, c'est la cible commerciale. La grande question est : "comment on arrive là" ? C'est une question à un billion de dollars, et ce n'est pas de la rhétorique. En fait, c'est une question à multi-billions de dollars. L'enjeu est de taille pour aborder, pour répondre à cette question.

Pourquoi les enjeux sont importants ? Eh bien, la fourniture d'énergie mondiale est probablement 5% du produit mondial brut, \$3,5 billions par an (probablement au bas de l'échelle). La valeur des fonds propres des compagnies d'énergie d'aujourd'hui est de \$5 billions, qui est 7,6% de la capitalisation boursière du monde. La valeur d'entreprise de ces sociétés est encore plus. Il y a de gros enjeux au cours des deux prochaines décennies dans cette zone.

Pour en revenir à la question initiale, comment on obtient un petit réacteur modulaire à prix compétitif? Il y a deux approches. La première consiste à utiliser la logique économique GenIII+, avec une production en série, une modularité et la fabrication de ces modules en usine. Il y a absolument des économies à faire en faisant cela. Ou il y a un deuxième chemin à parcourir ici. Ou on utilise ces économies de la production en série, ET on suit un chemin assez difficile, on utilise la technologie GenIV, où cette technologie stimule la réduction des coûts.

Alors comment on réduit les coûts dans l'espace du petit réacteur modulaire? La première étape simple est de les faire petit. On s'occupe de la question absolue des investissements dans l'espace nucléaire, à savoir un projet de 10 à 15 milliards de dollars est très difficile à financer. Il est très difficile à financer pour une entreprise du secteur privé - ça représente un risque sur les bilans de beaucoup d'utilisateurs, et un grand nombre de clients finaux de cette technologie.

Pour le rendre plus commode, plus utile, faire petit. Un projet d'un milliard de dollars est évidemment plus facile à financer. Donc, faire petit et on traite le problème de l'investissement. Comment on traite l'investissement en termes de dollars par watt, qui est l'économie d'échelle relative ? Eh bien, on peut commencer avec les économies d'échelle de la production en série, la modularité et la fabrication de composants standards en usine.

Et la troisième option qu'on a est; Je l'appelle la science économique de la technologie. Avec la science économique de la technologie, c'est la technologie elle-même, et les vertus de la technologie, quel que soit le type de technologie GenIV qu'on regarde, mais c'est la technologie qui pilote l'investissement et les coûts d'opération par unité. C'est la technologie qui pilote les dollars par watt pour les investissements jour-le-jour.

Au fond, une photo d'une usine Boeing. Ici on a de la modularité, et une production en usine fait baisser le coût par unité. Mais en le faisant petit, on a une force concurrentielle qui fait remonter le coût moyen actualisé de l'électricité. La règle empirique qui ressort aujourd'hui quand on regarde l'échelle relative, et les influences de ces deux forces, est que pour un petit réacteur modulaire haut de gamme, 300 mégawatts électriques, les économies obtenues ici, avec la production en série sont à peu près égales aux économies perdues parce qu'on l'a fait petit.

Donc on se retrouve au point de départ. Ca ne nous rapproche pas particulièrement à la zone bleue - le centre des marchés mondiaux de l'énergie. Il faut considérer la science économique de la technologie.

Je l'ai résumé dans cette chose que j'appelle l'équation fondamentale de la science économique des centrales nucléaires. En fait, je l'ai vérifié avec un ancien président du NRC avant de le sortir aujourd'hui. Il pensait que c'est effectivement une assez bonne façon de le dire. L'équation fondamentale de la science économique des centrales nucléaires est : le côté investissement est une fonction du profil de sécurité intrinsèque du système de réacteur, car c'est le profil de sécurité intrinsèque du système de réacteur qui pilote les coûts de développement, le coût de la licence, coût de la construction, coût d'exploitation.

Le profil de sécurité intrinsèque pilote les investissements. La question est maintenant légèrement différente : "quelle technologie a un profil de sécurité qui offre une réduction des coûts?" Quelle technologie Gen IV a le profil de sécurité intrinsèque pour stimuler la réduction des coûts? En répondant à cette question, je vais proposer une mise en garde. Lorsqu'on tente de répondre à cette question il faut être très prudent et ne pas confondre l'inconnu avec l'improbable.

Quand on regarde le profil de sécurité intrinsèque du réacteur à sels fondus, c'est complètement différent. C'est un système de réacteur à combustible liquide, avec le combustible dissous dans le sel de refroidissement. Cela conduit à un profil de sécurité tout à fait différent pour les raisons suivantes.

Les Sels sont des caloporteurs fantastiques. Ils ont des points d'ébullition élevés, et on a un système de réacteur qui fonctionne à pression atmosphérique au lieu de 160 atm, ce qui est typique pour un réacteur à eau légère ou un réacteur à eau lourde.

L'absence d'eau signifie qu'on n'a pas de source d'hydrogène explosif.

Les fluides ont des propriétés que les solides ne possèdent pas. Ils ont une propriété thermodynamique de flux convectif. C'est très, très pertinent dans un dossier de sûreté à l'égard de la gestion de la chaleur résiduelle. On a quelque chose que les systèmes de réacteurs à combustible solide n'ont pas. On a un carburant qui est un liquide, et avec un liquide on peut dissiper la chaleur à travers un mécanisme de flux convectif.

Une sécurité passive importante est possible, pour ces raisons. Ce profil de sécurité n'est pas possible avec les systèmes de réacteurs à combustible solide et, en tant que telle, en raison de l'équation fondamentale de la science économique des centrales, cela conduit à tout un autre profil économique.

On a un système de réacteur qui est potentiellement plus petit, plus simple, et un système qui est beaucoup plus gérable.

La technologie du Réacteur à Sels Fondus utilisé dans un petit réacteur modulaire, promet la réduction des coûts dans la conception d'un SMR. Le MSR est la route commerciale non prise. Pendant les 60 dernières années, nous avons commercialisé les systèmes de réacteurs à combustible solide dont il existe de nombreux types différents.

Ceci est une route qui a été certainement parcouru par les laboratoires nationaux pendant longtemps, mais elle n'est pas la route qui a été parcourue d'un point de vue commercial. La raison que cela est pertinent aujourd'hui est que cette route, comme les besoins du marché ont changé, est la route qui répond aux besoins du marché. Celle-ci ne le fait pas.

Un petit réacteur modulaire axé sur le MSR répond aux besoins du marché d'aujourd'hui. C'est maintenant le moment de le commercialiser. Les États-Unis ont un objectif de 80% d'énergie propre d'ici 2035. C'est 41% aujourd'hui. Il y a un énorme besoin d'énergie propre.

La fourniture de charbon des États-Unis est actuellement assez importante en raison des centrales au charbon construites dans les années 1970. La plupart sont relativement petites, moins de 500 mégawatts électriques. Il y a un très grand cycle de remplacement associé à cette capacité de charbon, et ce cycle de remplacement sera à son apogée dans la prochaine décennie. Ces centrales au charbon doivent être remplacées, ce qui aboutira dans une nouvelle génération avec une puissance électrique de 130 gigawatts. La question est : quelle technologie va le faire?

Un petit réacteur modulaire pourrait potentiellement le faire. C'est certainement une technologie ou concept commercial très prometteur. Si ça fonctionne, on aurait besoin de construire des centaines de réacteurs modulaires pendant cette décennie de remplacement 2025-2035, et les construire à une vitesse de peut-être 40 à 50 par an.

Si on pouvait conquérir ce marché d'une manière incontestée avec un petit réacteur modulaire, compétitif par rapport aux alternatives aux combustibles fossiles, ce serait une opportunité très, très importante.

Ceci doit être mis dans un contexte macroéconomique. C'est juste une petite partie d'un marché mondial beaucoup plus grand pour la chaleur industrielle et la puissance. Ça remonte à la question (ou opportunité) à un billion de dollars. On a un marché énorme pour un Petit Réacteur Modulaire de type MSR. On a pour la première fois la possibilité pour le nucléaire de potentiellement se co-localiser à proximité du point de demande, de sorte qu'on a maintenant une source d'énergie qui est indépendante du réseau, de l'eau et des oléoducs & gazoducs.

C'est particulièrement pertinent pour les économies émergentes qui n'ont pas actuellement une infrastructure de réseau. Cela représenterait une technologie d'énergie qui est hautement stratégique pour de nombreuses industries dans de nombreux marchés verticaux, et il y a une liste d'entre eux ici.

Évidemment, le marché traditionnel de fourniture d'énergie nucléaire, la cogénération sur et hors réseau dans le secteur minier, le secteur d'extraction des ressources minérales, la production d'ammoniac, d'engrais, d'hydrogène, le dessalement. L'eau en tant que marchandise sera aussi un gros problème au cours des deux prochaines décennies. L'industrie de dessalement est une grande industrie, mais elle aussi deviendra un très grand utilisateur d'énergie.

On a aussi la possibilité d'avoir une source d'énergie pratique à prix compétitif pour les communautés éloignées dans les Etats insulaires. Dans ce cas, on est en compétition avec la génération hors réseau à partir du diesel.

Comme c'est du nucléaire, et le nucléaire représente historiquement une énergie sûre, fiable, on a la co-localisation de ce type de SMR dans une installation militaire comme quelque chose qui a une proposition de valeur non seulement pour les forces militaires des États-Unis, mais aussi pour d'autres pays.

Le cycle du combustible à passage unique est la norme commerciale aujourd'hui. La France fait un peu de retraitement, mais je pense que c'est juste de dire que c'est la norme commerciale. Une conséquence est qu'on a une assez grande quantité de combustible nucléaire non consommé, en grande partie du plutonium. Et évidemment on a les produits de fission.

Aujourd'hui le combustible nucléaire non consommé, en grande partie du plutonium, est considéré comme un handicap, donc il y a une incitation commerciale pour minimiser cette responsabilité. Le Réacteur à Sels Fondus consomme le combustible nucléaire beaucoup plus efficacement, de sorte qu'on a la possibilité d'employer une technologie qui représente un changement majeur dans la gestion des déchets nucléaires.

Il y a un ordre chronologique à respecter. La première étape est que les Réacteurs à Sels Fondus ont la capacité de brûler leur combustible de manière beaucoup plus profonde. En fin de compte, on génère moins de déchets de plutonium par kilowatt-heure avec le cycle de combustible à passage unique.

Ceci est évidemment très pertinent dans notre système de réacteur, le réacteur de Terrestrial Energy, et nous pensons générer environ un sixième de moins de plutonium par rapport à un réacteur conventionnel. Comme le réacteur fonctionne à 700°C, on a aussi les efficacités évidentes d'une exploitation à une température beaucoup plus élevée. On obtient des rendements thermodynamiques beaucoup plus élevés, et donc, moins de déchets de produits de fission sur une base par kilowatt.

La deuxième étape est associée avec le retraitement du combustible solide usé. Cette deuxième étape est pour l'avenir. Il y a des obstacles réglementaires et des questions de politique importants à aborder ici, mais je veux juste toucher sur le potentiel économique et commercial.

Le retraitement ou le recyclage du combustible de sel fondu a des enjeux économiques totalement différents. Combustible solide. Si on veut traiter du combustible solide, c'est un processus complexe en cinq étapes. Étant complexe, il est coûteux. On passe d'un combustible solide à un liquide, on sépare les liquides à travers un processus chimique approprié. Puis on les reconvertit en solides, et puis on a une

des étapes la plus difficile et coûteuse, le remontage des assemblages de combustible solide avec du combustible MOX.

C'est un traitement par lot et il faut manier ce truc avec une très longue paire de pinces. C'est coûteux. Comparez cela à un combustible liquide, et je pense que nos collègues dans l'industrie pétrochimique reconnaîtraient les vertus de ce processus. On commence avec un liquide, on sépare le liquide, on termine avec un liquide. On élimine cette partie coûteuse. Ceci a clairement une dynamique commerciale très différente que cela. Et ces dynamiques commerciales - je suggère aujourd'hui - pourraient représenter un 2^{ème} changement majeur dans la gestion des déchets nucléaires.

La question est: "Le combustible nucléaire irradié, dans l'âge du trilemme, est un handicap ou un atout?" Aujourd'hui, c'est considéré comme un handicap. Mais si on regarde en termes de teneur énergétique en surface, les Etats-Unis ont de vastes quantités d'énergie en surface. La valeur de cette énergie fissile est d'environ \$2 billion au prix nord-américain du gaz naturel. Le Royaume-Uni dispose d'une quantité importante de plutonium hérité de la guerre froide.

La valeur de l'énergie fissile en utilisant un système de réacteur utilisé en tant que cycle de combustible pour consommer cette matière fissile, qui est acceptable dans un contexte civil, donc acceptable pour les hommes en costume noir.

Le Royaume-Uni a 120 tonnes de plutonium hérité de la guerre froide. Ça alimenterait le Royaume-Uni pendant 21 ans. Une alimentation totale pour le Royaume-Uni pendant 21 ans. Encore une fois, avec une tarification de ces BTUs en gaz naturel européen, ça fait un demi-billion de dollars. Donc il faut considérer les réserves existantes de matériel fissile en surface comme des trésors de l'énergie nationale.

La question à un billion de dollars est : "Quelle technologie peut changer cet handicap dans un atout?" Les technologies du Réacteur à Sels Fondus offrent cette opportunité, parce que la forme liquide du combustible a un ensemble de dynamiques commerciales tout à fait différent, quand on cherche à retraiter du combustible liquide.

Il y a également des avantages supplémentaires à court terme. Le combustible usé doit être traité d'une certaine façon dans des formes pour tout régime d'élimination des déchets que nous pouvons choisir à l'avenir, donc on a du combustible retraité à court terme. Et les Réacteurs à Sels Fondus, le combustible liquide a des avantages considérables dans ce traitement.

Mes conclusions sont, tout d'abord, que nous avons une nouvelle série de moteurs d'innovation, appelé le trilemme, qui va piloter l'innovation énergétique au 21^{ème} siècle pour des décennies à venir. On peut voir ça comme une nouvelle étoile polaire dans le ciel qui pilote l'innovation commerciale.

L'urgence de l'innovation augmente. Chaque année, il monte de plus en plus. La dynamique du marché a changé, et il y a une réalisation, probablement tout à fait récente, que le nucléaire doit jouer un rôle.

Le nucléaire peut jouer un rôle énorme, car il résout de nombreux composants du trilemme, évolutif, sûr, propre. Le nucléaire doit concurrencer sur le coût et la commodité au centre des marchés mondiaux de l'énergie. Il doit rivaliser avec les combustibles fossiles à base de charbon et gaz naturel.

Les économies de la production en série et de l'innovation des coûts pilotés par la technologie sont tous les deux nécessaires. Avec ceci seul on ne pourra pas rivaliser avec ces gars-là. La question à un billion de dollars est: "Quelle technologie utiliser dans un SMR pour obtenir l'innovation des coûts?" L'équation fondamentale de la science économique des centrales nucléaires dit que les coûts sont une fonction du profil de sécurité intrinsèque du système de réacteur.

Un réacteur à sel fondu a un profil de sécurité intrinsèquement différent. C'est un système de réacteur intrinsèquement différent au niveau le plus fondamental. En conséquence, uniquement avec un système de réacteur avec un profil de sécurité entièrement différent, on a une chance d'une innovation des coûts suffisante dans la conception et la commercialisation d'un petit réacteur modulaire de rivaliser au centre de l'industrie mondiale de l'énergie.

Je veux juste vous laisser avec une pensée, une dernière remarque. Je l'ai emprunté de Victor Hugo, qui est un homme qui a jeté une ombre très, très longue sur les deux derniers siècles. La pensée est ceci :

"Il existe une chose plus puissante que toutes les armées du monde, c'est une idée dont l'heure est venue".

Il est maintenant l'heure de commercialiser le Réacteur à Sels Fondus. Merci beaucoup.

Source :

<https://www.youtube.com/watch?v=zsAfUBzRp3M>