

I-5. Scenarii économiques relatifs aux encroûtements cobaltifères

V. GERONIMI, P. CHRISTMANN ; P-Y. LEMEUR

1 Qu'est-ce qu'une rente économique ?

La présence d'une ressource minière n'est pas toujours synonyme de développement économique. Les nombreux débats relatifs à l'existence, ou non, d'une « malédiction des ressources » sont là pour en attester (Auty, 2007 ; Stevens, 2003). Effectivement les effets d'une rente minière sur la croissance économique, le développement humain dépendent étroitement de la gouvernance des parties prenantes au projet minier.

Concernant des activités extractives faiblement reliées au tissu économique local (le pétrole off-shore en étant l'exemple le plus poussé, l'exploitation des ressources minérales marines devrait être de même type, employant peu de ressources humaines¹), l'impact économique qui subsiste passe par le budget de l'Etat à travers le lien fiscal (impôts, taxes et redevances), à travers les politiques publiques rendues possibles grâce à ces recettes.

La rente économique est définie de façon opérationnelle comme la Valeur actualisée nette hors impôts et taxes (VAN), selon la définition du

¹ Le projet d'exploitation de l'amas sulfuré de Solwara-1 par Nautilus Minerals n'emploierait que 121 personnes (Jankowski *et al.*, 2010, tableau 19-19). Il s'agit des personnes qui travailleront sur le vaisseau de soutien à la production (PSV en anglais « Production Support Vessel »).

FMI (FMI, 2012). Une telle définition à l'avantage d'être en lien direct avec les analyses de rentabilité des projets.

Les conditions d'existence d'une rente minière dépendent de plusieurs facteurs majeurs, dont l'un est peu contrôlable par l'exploitant :

- Le cours des métaux commercialisables par l'exploitation. Ceux-ci dépendent largement des marchés mondiaux, où la volatilité des prix est la règle. Les entreprises peuvent cependant plus ou moins se protéger de cet aléa majeur par des mécanismes de couverture ;
- Les coûts de production, qui peuvent être optimisés de temps en temps, grâce à l'introduction de nouvelles technologies par exemple ;
- Les conditions-cadre applicables à l'exploitation, notamment les conditions fiscales.

Dans un calcul de rentabilité (valeur actualisée nette (VAN) – et taux de rendement interne²) la question de l'amortissement des dépenses d'exploration ainsi que des dépenses éventuelles de recherche et développement (pour développer un nouveau procédé, un nouveau type d'équipement par exemple) est un sujet particulièrement épineux, car l'investisseur va souhaiter récupérer cet investissement non inclus dans le calcul du coût en capital du projet. Dans divers grands pays miniers (Australie, Canada) les investissements en exploration ouvrent droit à réduction ou à crédit d'impôt, avec souvent un amortissement accéléré de cet investissement au cours des premières années du projet, ce qui réduit d'autant les recettes de l'État (et/ou les collectivités territoriales et locales concernées). L'absence d'un tel mécanisme est de nature à décourager les investissements en exploration minière.

Même pour des projets solidement documentés sur la base d'études de faisabilité répondant à une norme de type NI 43-101, les prévisions du niveau de rente espéré au cours de la vie du projet sont très fragiles, du fait des fluctuations importantes des cours des matières premières. Aujourd'hui, les connaissances disponibles sur les ressources minérales de Polynésie française, dont les encroûtements cobaltifères, sont trop fragmentaires pour pouvoir produire mieux qu'un scénario montrant les points clés qui, du point de vue économique, détermineront la future rentabilité du projet. Ces points clés dépendent de choix qui, en partie, nécessitent encore le

² Voir glossaire

développement de technologies adaptées. Il est rappelé ici qu'à ce jour il n'existe pas encore d'exploitations sous-marines profondes, et que les estimations de rentabilité ne s'appuient pas sur des études de faisabilité ou de pré-faisabilité au sens du NI 101-43.

Des questions extrêmement importantes relatives à l'exploitabilité et à la métallurgie des encroûtements cobaltifères sont aujourd'hui sans réponse, ce qui ne permet pas d'arrêter aujourd'hui une évaluation unique, même approximative, des coûts en capital que représenterait l'investissement en exploration, puis la mise en production d'un éventuel gisement, ni les coûts en numéraire de son exploitation, ni par conséquent le temps de récupération de l'investissement, la valeur actualisée nette (VAN) et le taux de rendement interne (TRI) du projet. Les estimations (scénarii) présentées ici se basent sur quelques études antérieures publiées, dont aucune n'a inclus un pilotage industriel, indispensable pour acquérir des paramètres économiques fiables. Les estimations fournies ici ne permettent que de montrer les axes de recherche et d'innovation nécessaires pour développer des technologies d'exploitation et de traitement du minerai, puis d'extraction métallurgique de tout ou partie des métaux contenus dans ces minerais polymétalliques complexes. Ces technologies n'auront de sens que si elles peuvent être mises en œuvre avec des performances environnementales et sociales satisfaisantes, discutées ailleurs dans ce rapport (voir contributions des axes II et IV).

Les potentialités économiques associées à l'exploitation des encroûtements dépendent de la rentabilité anticipée du projet, cette dernière dépendant de multiples facteurs que l'on peut regrouper en deux grandes catégories : la valorisation de la ressource (prix de vente espéré) et les coûts d'investissement et de production (dépendant de procédés, de technologies avec de nombreuses options ouvertes à ce stade préliminaire des études réalisées à l'échelle internationale). Les calculs de rentabilité économique présentés dans la littérature sont rassemblés dans la figure 1, qui permet de comparer les taux de rentabilité interne (TRI) des projets d'exploitation de nodules (les plus étudiés) avec les projets d'exploitation des encroûtements cobaltifères (deux sources : Yamazaki, 2002, 2006 et 2008 et DPED Hawaï 1987).

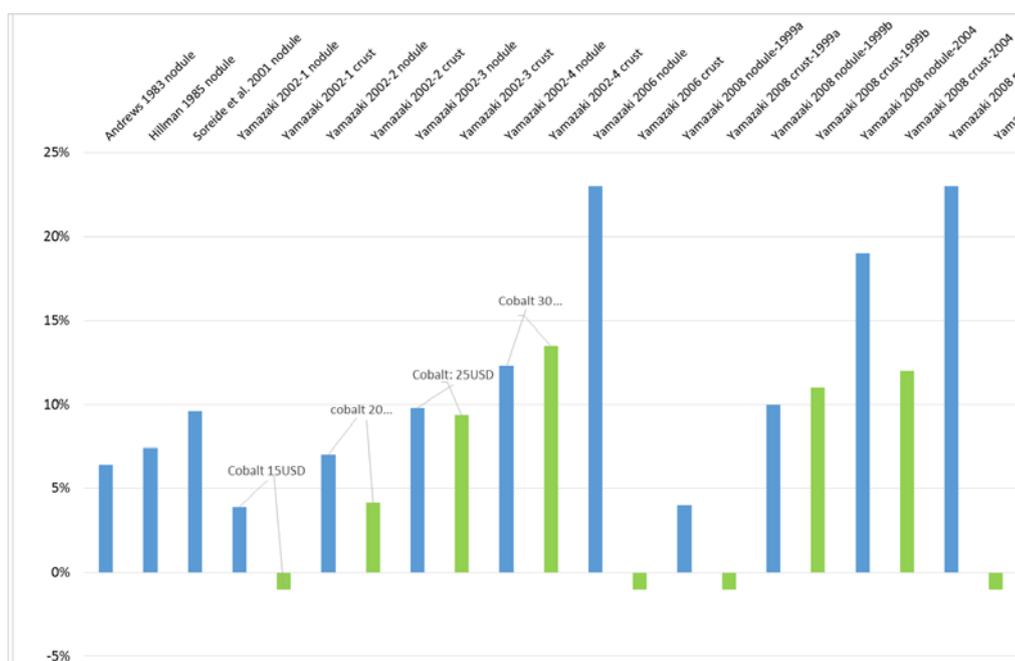


Figure 1 – Comparaison des TRI selon les auteurs, nodule et encroûtement. Source : données collectées à partir des publications de Andrews, 1983, Hilman 1985, Soreide et al., 2011, Yamazaki 2002, 2006, 2008 ; Agarwal 2012.

Comme on le voit dans la figure 1, les simulations de TRI donnent des résultats très contrastés selon les hypothèses retenues dans ces différentes études.

Les principaux facteurs expliquant ces différences d'estimation dans la rentabilité des projets d'exploitation (qu'il s'agisse de nodule ou d'encroûtement) renvoient aux hypothèses sur les prix des métaux et aux hypothèses technologiques, qui varient fortement d'un auteur (et d'une période) à l'autre. La variation est particulièrement forte selon le nombre de métaux valorisés par le scénario économique (Goto, 2010).

Ainsi, selon l'hypothèse de prix retenue, le même projet voit son TRI varier de 4 % à 23 % pour les nodules (Yamazaki, 2008) et de -1 % à 12 % pour les encroûtements (Yamazaki, 2008).

Sur l'ensemble de la littérature à laquelle nous avons eu accès, une seule configuration de prix fait apparaître le projet d'encroûtement supérieur à celui de nodules, lorsque le prix du cobalt atteint les 30 dollars américains (USD par la suite) par livre (Yamazaki, 2002). Selon le même auteur, dans différentes publications, et dans l'ensemble des autres analyses, les projets d'encroûtement sont moins rentables que les projets de nodules.

2 Eléments d'évaluation économique

Il n'existe pas aujourd'hui de référentiel solide (activités d'exploitation en cours publiant leurs paramètres techniques, économiques et leurs résultats ou, au moins, étude de faisabilité répondant à la norme NI 43-101) qui permette de formuler une estimation des paramètres économiques clés d'une éventuelle exploitation des encroûtements cobaltifères de Polynésie française. Ainsi, les éléments de calculs de rentabilité présents dans la littérature résultent de simulations basées sur des hypothèses, en envisageant, en règle générale, des scenarii alternatifs. Nous avons retenu une telle approche dans la simulation de taux de rentabilité interne selon deux scenarii, présentés plus bas (section 3).

Compte tenu du niveau d'incertitude élevé, les éléments d'évaluation économique disponibles sont limités. L'élément de comparaison le plus intéressant est l'étude sur l'exploitation des encroûtements cobaltifères situés au large de l'atoll de Johnston, situé à environ 1 300 km à l'ouest/sud-ouest d'Hawaii, étudiés pendant de nombreuses années par l'Université d'Hawaii (USA) (Zaiger, 1995 ; Loudat *et al.*, 1995, Wiltshire *et al.*, 1999). Les encroûtements y atteignent 15 cm d'épaisseur avec des teneurs en Co atteignant 1,5 %. Ces travaux n'ont pas été pris en compte ni dans la synthèse de Yamazaki (2008), ni dans celle de Goto *et al.* (2010), relatives à l'économie de l'exploitation des ressources minérales marines profondes.

Le second exemple est celui du projet d'exploitation de l'amas sulfuré de Solwara-I par Nautilus Minerals. Il apporte des éléments de comparaison économique relatifs à un projet minier en eau profonde, mais il s'agit là aussi d'une étude préliminaire.

2.1 Les leçons de Solwara

Le projet d'exploitation de l'amas sulfuré de Solwara-1, offre certains éléments de comparaison pour sa partie minière, encore très préliminaires, avec l'exploitation d'encroûtements cobaltifères en Polynésie française, une étude économique préliminaire (Jankowski *et al.*, 2010) ayant été publiée par la société Nautilus Minerals. Ces éléments sont encore très préliminaires et donc susceptibles d'être fortement révisés lorsque la réalité opérationnelle sera connue.

Solwara-1 est très différent des encroûtements cobaltifères. Il s'agit d'un amas sulfuré, lié à la présence de cheminées hydrothermales actives et fossiles, ce qui se traduit par une topographie accidentée, complexe, le

gisement se trouvant sur un bombement avec des pentes pouvant atteindre 30 % et de nombreuses cheminées hydrothermales, bien visibles sur une cartographie bathymétrique à haute résolution. La hauteur des cheminées varie entre 2 et 15 mètres. La couche minéralisée exploitable atteint, par endroits, une épaisseur minimum de 15 m.

Sur des bases paraissant technologiquement solidement argumentées, Jankowki *et al.* (2010) estiment que le coup de prélèvement des sulfures, de leur aspiration vers la surface, de leur essorage sur le bateau de collecte puis leur transport jusqu'à la terre ferme (Port de Rabaul, Papouasie-Nouvelle-Guinée) représenterait un coût en numéraire de 70,47 USD/t de minerai. Il s'agit certes d'une première estimation, non confirmée par une étude pilote susceptible d'être ajustée à la hausse comme à la baisse.

Afin de comparer des projets différents entre eux une pratique courante est de ramener les coûts et la valeur de la production à l'équivalent cuivre. Au 21/08/2015 la valeur de la tonne de minerai sec de Solwara-1 était de 569,08 USD/t, ce qui équivaut à un minerai de cuivre contenant 11.25 % de cuivre. Sur cette base les coûts en numéraire de la production minière de Solwara seraient de $70,47 \times (1/0,1125) = 626,31$ USD par tonne de cuivre.

Les coûts en numéraire de la production du cuivre sont bien documentés. Snl.com publie sur abonnement les coûts en numéraire de la partie « extraction minière » de la production, en 2013, de 170 gisements de cuivre, représentant 66 % de la production mondiale de ce métal. Le coût moyen de l'exploitation minière de ces gisements est de 2 651 USD par tonne de cuivre.

Le coût de production actuellement estimé pour Solwara-1 pourrait donc s'avérer extrêmement compétitif par rapport à l'exploitation de gisements terrestres. Toujours par comparaison avec l'exploitation des gisements de cuivre, il se situerait au 5^{ème} rang sur les 170 gisements de cuivre documentés dans la base de données snl.com. Si ce coût d'exploitation très bas est confirmé lors de l'exploitation, il ferait de ce type d'exploitation l'une des plus compétitives au monde, avant toute prise en compte des impacts environnementaux cependant.

Les encroûtements cobaltifères se trouvent souvent sur les sommets plats de guyots et sur le haut de leurs flancs. Les encroûtements présents sur les sommets ont des contrastes topographiques plus faibles que les amas sulfurés, pouvant offrir des surfaces exploitables relativement planes sur des dizaines de kilomètres carrés. Par contre, la couche minéralisée est beaucoup plus fine, entre quelques millimètres et 25 cm maximum, ce qui

peut rendre sa récupération plus délicate car il faut trouver le moyen de prélever le minerai sans prélever le substratum stérile sous-jacent, le prélèvement de ce dernier entraînant un effet de dilution et des inutiles. La microtopographie bosselée de la surface peut également poser problème pour l'efficacité de la récupération. Par contre l'exploitation de cette ressource ne devrait pas nécessiter, comme c'est le cas pour Solwara-1, deux systèmes d'excavation (« tailleurs » télécommandés).

Dans le cas de Solwara-1, à cause de la topographie accidentée du gisement, un tailleur auxiliaire doit d'abord aplanir le terrain et préparer des bancs d'exploitation, le tailleur principal n'intervenant qu'ensuite sur terrain aplani. Dans le cas des encroûtements cobaltifères sur sommets de guyots, seule l'utilisation d'un tailleur principal pourrait s'avérer nécessaire, ce qui réduirait d'autant les coûts d'investissement et les coûts opératoires, ce qui pourrait compenser en tout ou en partie la dilution du minerai par le substratum stérile.

À ce coût s'ajoutera celui des traitements du minerai à terre, nécessaire pour préparer la récupération métallurgique des métaux contenus, ainsi que le coût de ladite métallurgie.

En 2010, Jankowski *et al.* ont estimé que le coût en capital pour la partie exploitation minière, essorage et transport du minerai jusqu'à Rabaul était de 330 millions USD, incluant une marge d'imprévus de 17,5 %, hors coûts d'exploration et de recherche et développement n'entrant pas dans le calcul du coût en capital. La valeur contenue dans les ressources indiquées en métaux du gisement est 586,2 millions USD, sur la base des cours des métaux au 21/08/2015 utilisée dans ce rapport.

2.2 Les éléments disponibles d'évaluation économique dans la littérature

Diverses études existent sur le traitement métallurgique des encroûtements cobaltifères, avec des estimations préliminaires de coûts d'investissement et de coûts opératoires. A part les études de Yamazaki (voir figure 1 précédente), une seule autre publication présente des estimations de rentabilité (TRI de 7 % et VAN de 443 millions USD), celle de Goto *et al.* (2010, où on retrouve Yamazaki comme co-auteur). L'étude Ecorys 2014 retient un scénario d'absence de rentabilité des encroûtements cobaltifères (TRI négatif).

En tout état de cause les éléments présentés ici, à l'image de ceux donnés dans l'ensemble de la littérature portant sur la rentabilité de l'exploitation des encroûtements cobaltifères, tout comme des nodules, ne

peuvent être considérés que comme approximatifs et préliminaires, donnant des ordres de grandeur, en attendant qu'une étude de faisabilité au sens de la norme NI 43-101 permette de stabiliser les estimations des paramètres d'une éventuelle future exploitation.

Un ensemble de publications montre l'intérêt porté par des équipes de recherche, et à travers elles par des États ou des institutions régionales (Allemagne, Angleterre, Chine, Commission du Pacifique Sud, Corée du Sud, États-Unis, France, International Seabed Agency, Japon, Union Européenne...), à la mise en valeur des ressources minérales marines profondes, incluant notamment la valorisation des encroûtements cobaltifères, qui fait l'objet d'un important corpus de littérature scientifique et technico-économique (notamment Agarwal *et al.*, 2012 ; Charles *et al.*, 1990 ; Chung, 2005 ; Dymont *et al.*, 2014 ; Ecorys, 2014 ; Goto *et al.*, 2010 ; He *et al.*, 2011 ; Hillman et Gosling, 1985 ; Kojima, 1997 ; Martino et Parson, 2011 ; Park *et al.*, 2002 ; Soreide *et al.*, 2001 ; Yamazaki, 2006, 2008 ; Yamazaki et Tsurusaki, 1995 ; Zaiger, 1995). A nouveau, ces études concernent majoritairement les nodules polymétalliques.

2.3 Les principales questions demeurant ouvertes à ce jour

1. La localisation et les caractéristiques de la ressource potentiellement exploitable (surface couverte par les encroûtements, épaisseur des encroûtements, composition, densité *in situ* et à sec, variation en 3D de la composition et des épaisseurs),
2. La détermination économique et environnementale de la technique la plus performante pour récupérer sélectivement les encroûtements minéralisés en fonction de la topographie ;
3. Les taux de dilution et de récupération (métal récupéré après le traitement métallurgique de la ressource / métal contenu dans la ressource) qui en résulterait ;
4. Les rythmes de production (par jour, par an)
5. Les investissements en capital et les coûts en numéraire de la production.

La littérature disponible n'apporte que des éléments de réponse encore partiels à ces questions.

Les différents calculs de rentabilité que l'on trouve dans la littérature aboutissent à la conclusion que les projets d'encroûtement cobaltifère sont globalement peu rentables, et dans tous les cas de figure, moins rentables que les projets nodules, à l'exception d'une simulation effectuée par Yamazaki (Yamazaki 2008, voir figure 1 précédente).

L'intérêt de considérer les encroûtements cobaltifères dans la ZEE de la Polynésie française repose, non seulement sur les superficies importantes, mais aussi sur les teneurs plus élevées en cobalt des échantillons prélevés lors des différentes campagnes d'exploration, par rapport aux teneurs considérées dans les simulations de rentabilité effectuées dans la littérature (1,1 % de Co contre 0,63 % pris en considération par Yamazaki). On peut alors considérer que les caractéristiques des encroûtements cobaltifères en Polynésie française pourraient être susceptibles de montrer à terme un niveau de rentabilité suffisant pour motiver leur mise en exploitation.

Compte tenu du niveau élevé d'incertitude pesant sur les paramètres géologiques et économiques, qui explique aujourd'hui l'absence d'études de faisabilité (au sens du NI 101-43), ce point ne pourra être tranché qu'avec des informations supplémentaires, issues de futures campagnes d'exploration.

Pour illustrer les enjeux économiques d'un projet d'encroûtement cobaltifère, faute d'informations suffisantes, nous proposons alors une simulation de sa rentabilité et de ses impacts macroéconomiques. Pour mener à bien cette simulation nous discutons des hypothèses dans deux scénarii alternatifs, un scénario de base et un scénario favorable. Rappelons ici qu'un scénario n'est pas une prédiction ou une prévision. Il permet de repérer les variables clés, celles qui jouent un rôle déterminant dans la rentabilité du projet. Un tel scénario a l'avantage de préciser les ordres de grandeur vis-à-vis de l'économie de la Polynésie française.

3 Scénarii de mise en œuvre d'un projet minier

Compte tenu du niveau élevé de ces incertitudes, affectant le calcul de la rente, présenter des estimations de celle-ci pour la Polynésie française, ne peut s'envisager que sous la forme de scénarii visant à préciser les ordres de grandeurs et les enjeux économiques associés. Il ne s'agit donc pas de procéder à une étude de faisabilité ou de rentabilité, faute d'informations suffisantes³. Nous proposons ainsi deux scénarii interrogeant les conditions

³ De telles études supposent par ailleurs de disposer de moyens qui dépassent le cadre de la présente étude.

qui permettraient de réaliser une rentabilité suffisante pour un projet d'exploitation des encroûtements cobaltifères dans la ZEE de la Polynésie française.

Le premier scénario « scénario de base » est une adaptation directe des hypothèses retenues par Yamazaki, en adoptant les teneurs moyennes des encroûtements cobaltifères prélevés dans trois zones de la ZEE de la Polynésie française (Kaukura, Tarava, Tuamotu) et en corrigeant les coûts de production par les volumes traités.

Le deuxième scénario « scénario favorable » considère un volume de production plus important, correspondant à 10 % du marché mondial du cobalt en 2014, soit 10 000 tonnes (contre 4 500 tonnes dans le premier scénario).

Ces scénarii permettent de préciser les hypothèses clés et de disposer d'ordres de grandeur économique sur la rente, qui situent le projet dans la macro-économie de la Polynésie française.

3.1 Les scénarii : jeux d'hypothèses

3.1.1 Métaux exploités

Les métaux d'intérêt considérés dans les scénarii sont le cobalt, le nickel et le cuivre. Par rapport au raisonnement en termes de valeur *in situ*, qui prend aussi en compte la valeur liée, notamment, au manganèse, au titane et au platine, on considère dans la littérature simulant la rentabilité des projets miniers, que ces métaux ne feront pas l'objet de valorisation (à la notable exception de Goto *et al.* 2010)⁴. Deux sortes d'explications sont mobilisées pour expliquer cette non-valorisation. Les premières renvoient aux perspectives limitées sur le marché global pour ces métaux (voir I-3), les deuxièmes renvoient aux coûts associés à l'exploitation de ces autres métaux. Même si le coût marginal d'extraction de ces minerais est nul (car les encroûtements seraient déjà extraits), l'essentiel du surcoût découlerait de la phase de transformation métallurgique (phase qui représente plus de 50 % du coût total)⁵.

⁴ Dans l'article de Goto *et al.* (2010), le scénario de base produit un TRI négatif (-10 %) si on ne considère que les trois métaux, cobalt, cuivre, nickel. La prise en compte des autres métaux (manganèse, titane, platine, terres rares,...) peut améliorer la rentabilité du projet jusqu'à un TRI de 7 % dans la meilleure des configurations, ce qui reste insuffisant aujourd'hui pour susciter l'intérêt d'un investisseur potentiel. La teneur en cobalt considérée ici est deux fois inférieure à celle indiquée dans les échantillons prélevés en ZEE de la Polynésie française.

⁵ Ceci explique pourquoi l'intégration de métaux supplémentaires dans l'analyse de rentabilité peut conduire à une baisse de rentabilité (cf. Goto *et al.*, 2010).

3.1.2 Dimension et horizon temporel du projet

La durée classiquement envisagée dans la littérature est de 20 ans en phase de production. A cette durée d'exploitation, il faut ajouter la période de construction et de montée en puissance. Conformément aux paramètres retenus par Yamazaki, une période de 5 ans sans production est envisagée, avec une production à 50 % pour la sixième année.

Nous retenons par ailleurs un objectif de production correspondant à 4 500 tonnes de cobalt par an dans le scénario de base, et à 10 000 tonnes de cobalt par an (correspondant à 10 % de la production mondiale, voir I-3) dans le scénario favorable.

3.1.3 Localisation

Trois zones en ZEE ont fait l'objet de prélèvements montrant la présence d'encroûtements cobaltifères avec des teneurs importantes en cobalt (voir I-1) : Kaukura, Tarava, et Nord-Est Tuamotu.

3.1.4 Caractéristiques géologiques

Les informations présentées par Bonneville en 2002 ainsi que Bougault et Saget 2011, Hein 2013, montrent des teneurs assez élevées pour le cobalt (par rapport aux nodules et par rapport à d'autres zones) conduisant à retenir les paramètres présentés dans le tableau 1 pour les teneurs, l'épaisseur des encroûtements (He *et al.* 2011) et la densité. Nous retenons dans les deux scénarii les teneurs des minerais rapportés pour les Tuamotu, zone de Kaukura/Niau (Martel-Jantin *et al.*, 2011 ; reproduit dans le tableau 1 ci-dessous).

Tableau 1 – Hypothèses teneur (Source : Martel-Jantin *et al.* 2001 (35 échantillons))

Métaux	Hypothèses teneurs
Cobalt	1,06 %
Nickel	0,61 %
Cuivre	0,11 %

3.1.5 Processus industriel et taux de récupération

Il s'agit d'un point important de recherche concernant les procédés les plus adaptés, avec l'objectif d'amélioration des taux de récupération en fonction des recherches et développement. Le process proposé par Yamazaki (Yamazaki *et al.* 2002, Yamazaki 2008), est l'un des rares mobilisés dans l'étude économique des encroûtements cobaltifères dans la

littérature (figure 2). Les options restent ouvertes aujourd'hui. Par défaut, nous adaptons les paramètres retenus par Yamazaki aux caractéristiques de la ZEE de la Polynésie française.

Deux grandes options sont envisageables : soit une transformation métallurgique locale, soit un processus totalement off-shore. Pour la simulation de la rentabilité nous considérons ici un processus totalement off-shore (similaire à celui envisagé par Yamazaki). Le développement d'un processus on-shore (avec par exemple l'installation d'une usine de transformation métallurgique en Polynésie française), compte tenu des contraintes d'infrastructures et de coûts (énergie, main d'œuvre), paraît aujourd'hui une perspective peu probable, qui mériterait néanmoins des études plus poussées. Il serait effectivement nécessaire de disposer d'informations supplémentaires pour juger de l'opportunité d'envisager le développement d'une usine métallurgique en Polynésie française, et d'évaluer les possibilités de maximiser les retombées pour l'économie de la Polynésie française.

Pour tenir compte de l'impact de la hausse des quantités de cobalt traitées sur les coûts, nous avons appliqué la formule proposée par la JATEC (JATEC, 1993, cité par Yamazaki, 2008) avec rendements décroissants. D'autre part, nous avons actualisé les valeurs retenues (coûts et prix) à l'année 2006 pour la simulation économique (voir tableaux 2 et 3).

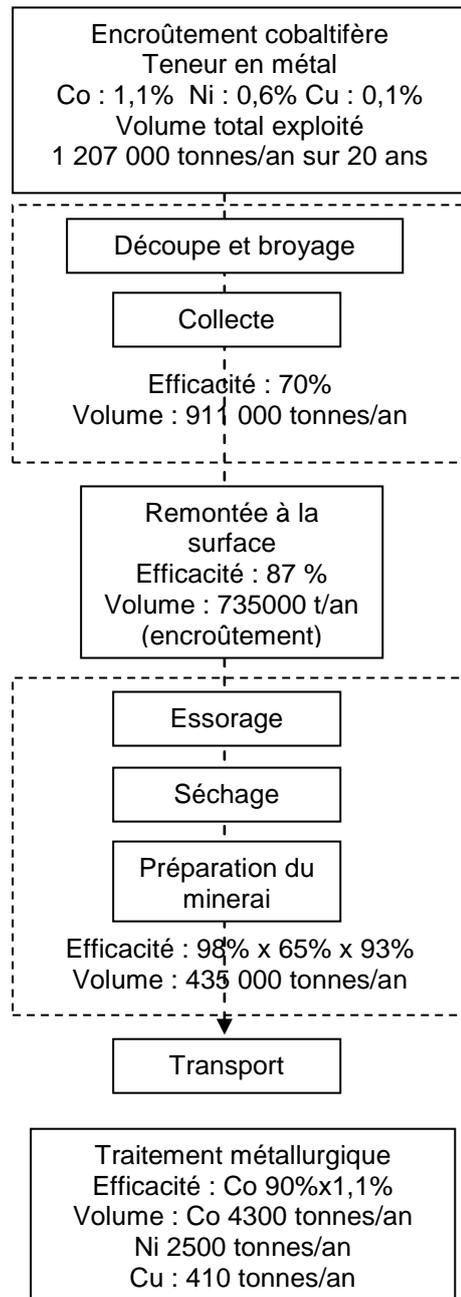


Figure 2 – Processus de valorisation des encroûtements (Yamazaki 2008), et scénario pour la Polynésie française (Kaukura) (Source : d'après Yamazaki et al. 2002, Yamazaki 2008, adapté selon les concentrations en métaux rapportées par Bougault et Saget 2011).

Tableau 2 – Total coût d'investissement encroûtement cobaltifère (Source : d'après Yamazaki 2008, et calculs auteurs)

Opérations	Yamazaki 2008		Scénario de base		Scénario favorable	
	Coût en capital	Operating cost	Coût en capital	Operating cost	Coût en capital	Operating cost
Extraction	107	31	107	31	107	31,2
Préparation du minerais	29	10	29	10	29	10,2
Transport	46	16	46	16	46	16
Traitement	224	30	275	37	457	61
Total	406	87	457	94	638	119
Continuing expenses	165		165		165	
Working capital	153		153		153	
Investissement total	724		775		956	

Note : Les valeurs ont été ajustées pour tenir compte de l'impact de la hausse des volumes de métaux produits sur les coûts de production, pour une même quantité de minerais extraite, en utilisant la formule de rendements d'échelles croissantes proposée par le JATEC (utilisé par Yamazaki 2008 ; JATEC, 1993).

Les hypothèses concernant le financement du projet selon les deux scénarii envisagés sont rapportées dans le tableau suivant (tableau 3).

Tableau 3 – Hypothèses de financement (Source : d'après Yamazaki, ajusté pour l'augmentation des coûts dans le scénario retenu)

	Scénario de base	Scénario favorable
Capital emprunté (Mns USD)	542	674
Capitaux propres (Mns USD)	232	289
Taux d'intérêt	0,03	0,03
Période de remboursement (années)	12	12
Montant fixe de remboursement annuel (Mns USD)	-54	-68

3.1.6 Prix

Les fluctuations des cours des matières premières minérales sont importantes, et se traduisent par une forte incertitude dans la prévision des cours. Comme le montre une analyse rétrospective des prévisions de cours retenues dans les calculs de rentabilité des projets de nodule et d'encroûtement, les marges d'erreur sont importantes et affectent fortement les résultats.

Pour effectuer une simulation des revenus bruts, nous avons retenu la moyenne des prix des trois principaux métaux d'intérêt (cobalt, nickel et cuivre, tableau 4) sur les trente dernières années, selon l'hypothèse d'un super-cycle (Erten et Ocampo 2013)⁶. Compte tenu de la mauvaise visibilité de l'évolution des cours à moyen-long terme, nous présentons pour chacun des deux scénarios l'effet de différentes hypothèses de cours sur la rentabilité d'un projet d'encroûtements.

Tableau 4 – Hypothèses de prix (Source : USGS pour les prix constants 1998, prix déflatés pour 2006 en utilisant le CPI US.)

USD/tonne	Prix constant 1998	Prix déflatés 2006	Scénarii Prix déflatés 2006 +60%
Cobalt	32737	40514	64822
Nickel	10821	13392	13392
Cuivre	3284	4064	4064

Pour le scénario favorable, seul le prix du cobalt a été augmenté de 60%.

3.2 Le scénario de base : une rentabilité limitée

Pour le scénario de base, on obtient une simulation de la rentabilité, dans la lignée des travaux de Yamazaki, adaptée aux conditions géologiques des trois zones d'intérêt dans la ZEE de Polynésie. Il s'agit bien ici d'une simulation, car le degré d'incertitude affectant les paramètres géologiques est directement proportionnel au nombre limité de points effectivement échantillonnés.

⁶ Un super-cycle dans les prix est un cycle de longue période (supérieur à 15 ans en général) au cours duquel on trouve une période de hausse, de plafond, puis de baisse jusqu'à un plancher du prix.

Cette première simulation conduit à un TRI de 4 % trop faible⁷ pour envisager le démarrage d'un projet minier. (Tableau 5).

Tableau 5 – Sensibilité du TRI d'un projet encroûtement type Kaukura aux hypothèses de cours du cobalt

Hypothèses de prix USD/tonnes	Cobalt	Nickel	Cuivre	TRI
Moyenne 1984-2013 base 1998	32737	10821	3284	
Moyenne 1984-2013 base 2006 (2)	40514	13392	4064	4,0%
(2) + 10%	44565	"	"	5,4%
(2) +20%	48616	"	"	6,6%
(2) +30%	52668	"	"	7,7%
(2) +40%	56719	"	"	8,7%
(2) +50%	60770	"	"	9,7%
(2) +60%	64822	"	"	10,6%
(2) +70%	68873	"	"	11,4%
(2) +80%	72924	"	"	12,2%
(2) +90%	76976	"	"	13,0%
(2) +100%	81027	"	"	13,7%

Source: calculs des auteurs

A quelles conditions un projet de mise en exploitation des encroûtements cobaltifères pourrait-il devenir rentable ? La principale évolution qui serait susceptible d'assurer (sous réserve toujours du degré élevé d'incertitude affectant les données disponibles...)⁸ la rentabilité économique d'un tel projet tient à l'évolution des prix. Une simple étude rétrospective de l'estimation de TRI dans les projets nodules et d'encroûtement conduit ainsi à souligner la forte sensibilité des TRI aux hypothèses portant sur les prix des métaux (tableau 6).

⁷ On considère (FMI, Banque mondiale) qu'un TRI de 10 % est un minimum pour inciter les agents privés à investir dans un projet. Pour les projets miniers, les TRI moyens considérés sont souvent beaucoup plus élevés (de l'ordre de 30%).

⁸ Une autre possibilité envisageable serait d'intégrer le manganèse (mais effet attendu d'effondrement des cours) et le platine.

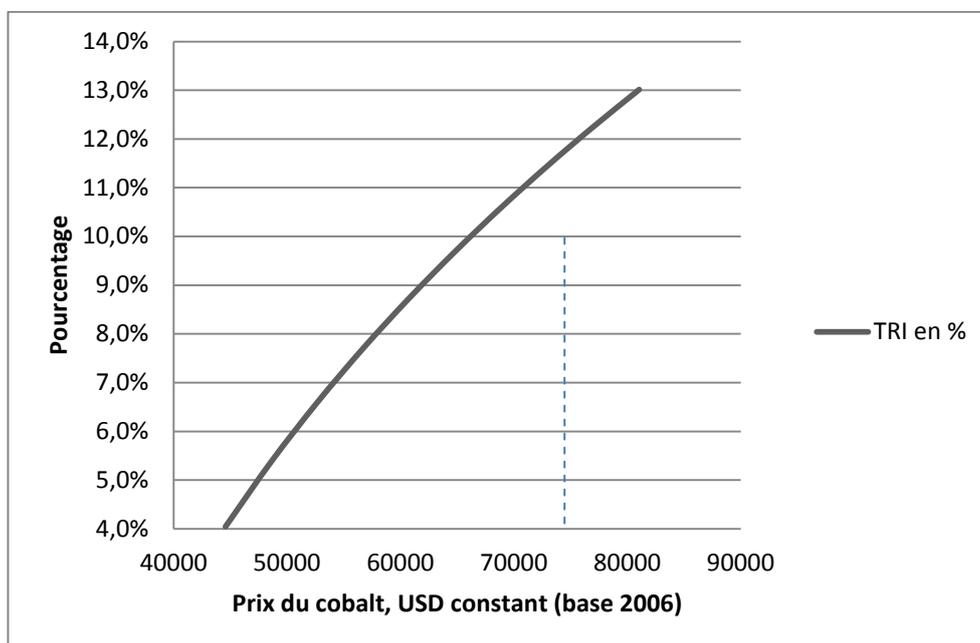
Tableau 6 – Comparaison des TRI obtenus dans la littérature selon les hypothèses de prix considérées (nodules et encroûtements).

Estimation prix USD/lb	Nickel	Cuivre	Cobalt	Manganèse	TRI
Andrews 1983 nodule	3,75	1,25	5,5	0,4	6%
Hillman 1985 nodule	3,62	1,17	8,53		7%
Soreide <i>et al.</i> 2001 nodule	3,33	1	20		10%
Yamazaki 2002-1 nodule	3,3	1	15		4%
<i>Yamazaki 2002-1 crust</i>	<i>3,3</i>	<i>1</i>	<i>15</i>		<i>-1%</i>
Yamazaki 2002-2 nodule	3,3	1	20		7%
<i>Yamazaki 2002-2 crust</i>	<i>3,3</i>	<i>1</i>	<i>20</i>		<i>4%</i>
Yamazaki 2002-3 nodule	3,3	1	25		10%
<i>Yamazaki 2002-3 crust</i>	<i>3,3</i>	<i>1</i>	<i>25</i>		<i>9%</i>
Yamazaki 2002-4 nodule	3,3	1	30		12%
<i>Yamazaki 2002-4 crust</i>	<i>3,3</i>	<i>1</i>	<i>30</i>		<i>13%</i>
Yamazaki 2006 nodule	9,9	2,97	15,84		23%
<i>Yamazaki 2006 crust</i>	<i>9,9</i>	<i>2,97</i>	<i>15,84</i>		<i>-1%</i>
Yamazaki 2008 nodule-1999a	3,30	1,00	15		4%
<i>Yamazaki 2008 crust-1999a</i>	<i>3,30</i>	<i>1,00</i>	<i>15</i>		<i>-1%</i>
Yamazaki 2008 nodule-1999b	3,30	1,00	25,00		10%
<i>Yamazaki 2008 crust-1999b</i>	<i>3,30</i>	<i>1,00</i>	<i>25,00</i>		<i>11%</i>
Yamazaki 2008 nodule-2004	6,28	1,26	26,8		19%
<i>Yamazaki 2008 crust-2004</i>	<i>6,28</i>	<i>1,26</i>	<i>26,8</i>		<i>12%</i>
Yamazaki 2008 nodule-2006	10,00	3,00	16		23%
<i>Yamazaki 2008 crust-2006</i>	<i>10,00</i>	<i>3,00</i>	<i>16</i>		<i>-1%</i>

(Sources : d'après Andrews 1983, Hillman 1985, Soreide *et al.* 2001, Yamazaki *et al.* 2002 et Yamazaki 2008. Notes : crust pour encroûtements, en italique dans le tableau)

Le tableau 6 et la figure 3 rapportent l'évolution du TRI dans le scénario de base en fonction des hypothèses de prix. On voit que pour qu'un projet d'encroûtement cobaltifère atteigne une rentabilité plancher de 10 %, il faut atteindre des niveaux de prix supérieurs de 60 % à celui atteint en moyenne sur la période 1984-2013.

Figure 3 – Sensibilité du TRI (scénario de base) aux hypothèses de prix



(Source : auteurs, tableau 6)

Dans le scénario de base, la perspective que s'engage une exploitation des encroûtements cobaltifères sur la ZEE de Polynésie française paraît très improbable à court et moyen terme. Cette perspective dépend notamment du niveau de prix du cobalt.

Dans un tel scénario, en retenant l'hypothèse d'un prix du cobalt supérieur de 60 % à son niveau moyen entre 1984 et 2013, les impacts macroéconomiques pour l'économie polynésienne seraient limités.

L'indicateur le plus pertinent pour mesurer la valeur du projet reste la VAN (FERDI 2013, FMI 2012). Celle-ci demeure la façon la plus simple d'estimer la rente économique (i.e. la différence entre les revenus et les dépenses liées à la production).

Nous avons calculé la VAN dans le scénario de base, avec l'hypothèse de prix du cobalt supérieur de 60 % à leur niveau moyen sur la période 1984-2013, ce qui permet de disposer d'un ordre de grandeur économique de la valeur actuelle du projet. Pour ce faire, nous avons envisagé un taux d'actualisation de 10 %, qui correspond à un niveau minimal. La VAN s'établirait à 58 millions USD. Il est intéressant de mettre en regard ce résultat avec le PIB, principal indicateur de l'activité économique de la Polynésie française. Pour ce faire, nous avons utilisé le PIB réel 2011 (base 2005), directement comparable avec les valeurs que nous avons simulées pour 2006 dans le scénario de base +60, et que nous avons converties en USD (tableau 7).

Tableau 7 – le PIB de la Polynésie française en 2011

Colonne1	2011
PIB prix courants (Mds F CFP)	532
PIB réel (Mds F CFP base 2005)	509
Taux de change USD-Euro 2006	1,3244
Taux de change Euro-F CFP	119
PIB réel (Mds USD base 2005)	5,665

Source : d'après ISPS.

Les résultats obtenus permettent de relativiser les revenus attendus dans un tel scénario.

Tableau 8 – Poids des revenus et coûts dans le PIB de la Polynésie française (scénario de base + 60)

Scénario Favorable	Part dans le PIB 2011
Revenu annuel brut	5,5%
Revenu annuel net	2,9%
Coût opérationnel	1,7%
Coût financier	1,0%
<i>Investissement total</i>	<i>13,7%</i>
<i>VAN (taux d'actualisation 10%)</i>	<i>1,0%</i>

Source : auteurs. Notes : les revenus nets positifs n'apparaissent qu'à partir de la 5^e année de démarrage du projet.

Sans préjuger de la répartition des coûts et revenus du projet entre les parties prenantes (au sein de la Polynésie française et avec les opérateurs internationaux), un tel projet dans le scénario de base apporterait des revenus nets annuels qui représenteraient 2,9 % du PIB sur les 20 ans de production effective de celui-ci, sans tenir compte des 5 premières années d'initialisation de celui-ci. La VAN permet alors de disposer d'une meilleure indication de la valeur économique du projet, qui ne représenterait que l'équivalent de 1 % du PIB de 2011 (rappelons que la VAN est une mesure de stock, alors que le PIB est une mesure de flux).

3.2.1 Simulation de la rente économique totale

Dans les simulations auxquelles nous avons procédé jusqu'ici, en suivant le modèle de Yamazaki, les impôts et taxes sont intégrées dans le calcul de la VAN, ce qui ne laisse apparaître que la rente économique qui serait captée par l'opérateur minier.

Il est alors intéressant de disposer d'une mesure de la VAN avant prélèvement des impôts et taxes. La VAN avant impôts et taxes est une mesure de la rente économique totale avant répartition entre les différentes parties prenantes.

A partir du scénario de base +60, nous avons procédé à une simulation de la VAN avant impôts et taxes. Pour ce faire, nous avons corrigé la simulation précédente des 30 % d'impôts sur le bénéfice intégré jusqu'alors (tableau 9).

Tableau 9 – Principaux éléments économiques du scénario de base +60 (hors impôts)

	Mns USD
Investissement total (Mns USD)	775
Operating cost (Mns USD)	94
Coût financier (Mns USD)	54
Revenus bruts (Mns USD)	314
<i>Revenus nets hors impôts (Mns USD)</i>	<i>215</i>
<i>VAN hors impôts (taux d'actualisation 10%)</i>	<i>334</i>
<i>TRI hors impôts</i>	<i>13,1%</i>

Source : auteurs à partir de Yamazaki 2008

La VAN hors impôts et taxes est multipliée par 6 par rapport à l'estimation précédente. Le poids de la VAN hors impôts représente désormais 6 % du PIB de 2011, soit un montant plus significatif, mais relativement faible.

Afin d'évaluer la part de la rente économique qui serait captée par l'État, nous avons simulé le Taux Effectif Moyen d'Imposition (TEMI) en tant qu'indicateur du partage de la rente (FMI 2012 ; FERDI 2013). La formule de calcul du TEMI est :

$$\text{TEMI} = \frac{\text{Valeur actualisée des impôts, droits et taxes prélevés sur le projet}}{\text{VAN du projet avant impôts, droits et taxes}}$$

Dans la simulation effectuée ici, on trouve un TEMI qui dépasserait les 100 % de la VAN hors impôt. Autrement dit, la fiscalité, grossièrement simulée ici, à travers un prélèvement d'un IS de 30 % viendrait réduire le rendement attendu pour les opérateurs du projet en-dessous du seuil plancher de 10 % (hypothèse initiale d'un taux d'actualisation de 10 %).

Au final, le scénario de base +60 à partir duquel nous avons procédé à des simulations de la rentabilité économique d'un projet d'encroûtement cobaltifère et de ses enjeux économiques appuie l'idée que les conditions de démarrage d'un tel projet ne sont pas encore réunies. On retrouve là une conclusion largement partagée dans la littérature (Ecorys 2012, ensemble des études de Yamazaki).

Au-delà du degré très élevé d'incertitude, qui découle d'un manque de données fiables sur les caractéristiques géologiques et les conditions techniques de mise en œuvre de tels projets, les simulations montrent que la rente économique associée au développement d'un tel projet, même selon une hypothèse de cours très favorable pour le cobalt, ne constituerait pas un apport de ressources fiscales significatifs pour la Polynésie française, sans risquer de remettre en cause l'incitation des opérateurs à participer à un tel projet. Ainsi, un IS de 30 % remettrait en cause la rentabilité du projet pour les opérateurs, pourtant supposée faible dans ce scénario (10 %). Non seulement, dans ce scénario de base, l'activité ne permettrait pas de dégager une rémunération pour l'accès à la ressource naturelle, de plus, elle devrait bénéficier d'un taux d'IS inférieur à celui pratiqué dans les autres secteurs productifs. Une leçon importante à retenir de ce scénario est qu'il n'y a pas d'intérêt, ni du point de vue de la Polynésie française, ni de celui des opérateurs privés, à précipiter le montage d'un projet d'encroûtement dès lors que les conditions minimales de rentabilité ne sont pas réalisées.

3.3 Un scénario favorable « F+60 »

A quelles conditions un projet d'encroûtement cobaltifère deviendrait-il rentable ? Il suffit de considérer une augmentation du volume de cobalt produit dans le projet jusqu'à 10 000 tonnes (soit 10 % du marché mondial) pour que change fortement la rentabilité d'un projet d'encroûtement. Un tel niveau de production permettrait à la Polynésie française de devenir un acteur de poids dans le marché mondial du cobalt tout en évitant un effet dépressif sur les prix. Cela supposerait toutefois, comme dans le scénario de base, un marché mondial du cobalt très porteur.

Le TRI simulé selon les hypothèses retenues dans ce scénario favorable atteindrait 14,5 %, en retenant les prix moyens du cobalt sur la période 1984-2013 (tableau 10).

Cette simulation basée sur un scénario favorable conduit donc à un TRI significativement plus important que dans le scénario de base, supérieur à la valeur plancher de 10 %. Il reste toutefois relativement faible par rapport aux TRI moyen des projets miniers terrestres, mais s'en rapproche⁹.

Le tableau 10 et le graphique 3 rapportent l'évolution du TRI pour un projet type encroûtement en fonction des hypothèses de prix dans le

⁹ On considère (FMI, Banque mondiale) qu'un TRI de 10 % est un minimum pour inciter les agents privés à investir dans un projet. Pour les projets miniers, les TRI moyens considérés sont souvent beaucoup plus élevés (de l'ordre de 30 %).

scénario favorable. On voit que pour qu'un projet d'encroûtement cobaltifère atteigne une rentabilité de 20 %, il faut atteindre des niveaux de prix supérieurs de 60 % à celui atteint en moyenne sur la période 1984-2013.

Tableau 10 – Sensibilité du TRI d'un projet encroûtement aux hypothèses de cours du cobalt (scénario favorable)

Hypothèses de prix USD/tonnes	Cobalt	Nickel	Cuivre	TRI
Moyenne 1984-2013 base 1998	32737	10821	3284	
Moyenne 1984-2013 base 2006				
(2)	40514	13392	4064	14,2%
(2) + 10%	44565	"	"	15,4%
(2) +20%	48616	"	"	16,6%
(2) +30%	52668	"	"	17,7%
(2) +40%	56719	"	"	18,7%
(2) +50%	60770	"	"	19,7%
(2) +60%	64822	"	"	20,6%
(2) +70%	68873	"	"	21,5%
(2) +80%	72924	"	"	22,4%
(2) +90%	76976	"	"	23,2%
(2) +100%	81027	"	"	24,0%

Source: calculs des auteurs

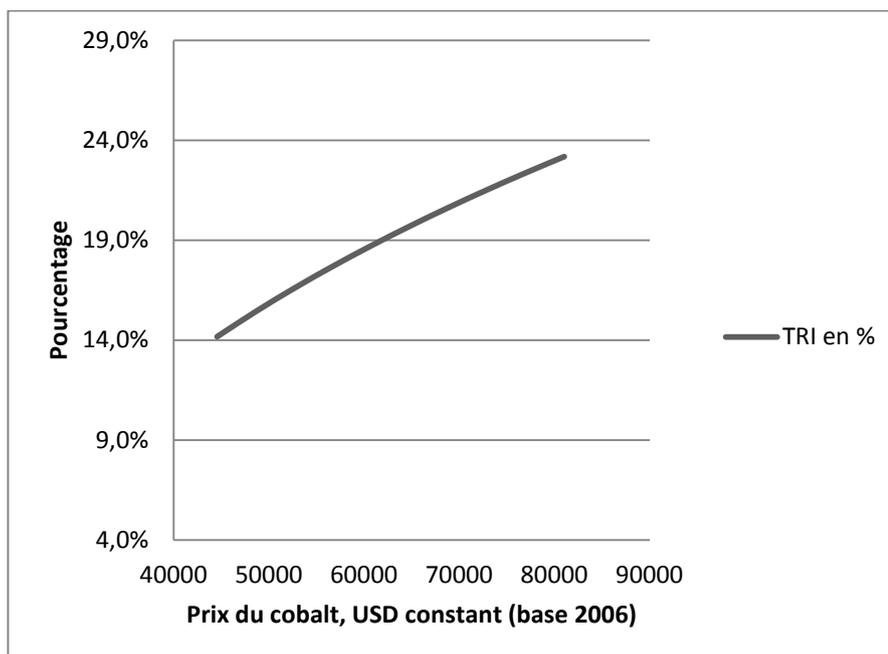


Figure 4 – Sensibilité du TRI (scénario favorable) aux hypothèses de prix
Source : auteurs, tableau 10.

A titre d'illustration, nous avons retenu dans le scénario favorable l'hypothèse d'un prix du cobalt supérieur de 60 % au prix moyen sur la période 1984-2013 (scénario favorable +60), qui permettrait d'atteindre un TRI de 20 % afin d'en présenter les enjeux économiques pour la Polynésie française. Là encore, il convient de rappeler qu'il s'agit d'un scénario hypothétique à portée essentiellement illustrative.

Les principales caractéristiques économiques du scénario « favorable + 60 » (F+60) sont présentées dans le tableau 11 ci-après.

Tableau 11 – Principales caractéristiques du scénario F+60

	Mns USD
Investissement total (Mns USD)	956
Operating cost (Mns USD)	119
Coût financier (Mns USD)	68
Revenus bruts (Mns USD)	735
Revenus nets (Mns USD)	548
VAN (taux d'actualisation 10%)	1787
TRI (%)	20,6%

Source : simulations auteurs. Notes : le projet s'étale sur 25 ans, la production ne commençant qu'au cours de la 6^e année.

Dans le scénario favorable +60, la VAN s'établit à 1 787 millions USD, soit 31,5 % du PIB 2011 de la Polynésie française (tableau 12). L'investissement nécessaire représenterait 956 millions d'euros, soit 17 % du PIB (à comparer avec un investissement de 775 millions d'USD et 13,7 % dans le scénario de base)¹⁰.

Tableau 12 – Poids des revenus et coûts dans le PIB de la Polynésie française (scénario F60)

Scénario Favorable+60	Part dans le PIB 2011
Revenu annuel brut	13,0%
Revenu annuel net	9,7%
Coût opérationnel	2,1%
Coût financier	1,2%
Investissement total	17,0%
VAN (taux d'actualisation 10%)	31,5%

Source : auteurs. Notes : les revenus nets positifs n'apparaissent qu'à partir de la 5^e année de démarrage du projet.

Afin de cerner la part de la valeur économique du projet captée directement par la Polynésie française dans ce scénario F+60, nous procédons à une simulation de ce que représenterait la rente économique totale.

3.3.1 Simulation de la rente économique totale

Dans le scénario favorable +60, nous avons procédé à une simulation de la VAN avant impôts et taxes. Pour ce faire, nous avons corrigé la simulation précédente des 30 % d'impôts sur le bénéfice intégré jusqu'alors (tableau 13).

Tableau 13 – Principaux éléments économiques du scénario F60 (hors impôts).
Source : auteurs à partir de Yamazaki 2008

	Mns USD
Investissement total (Mns USD)	956
Operating cost (Mns USD)	119
Coût financier (Mns USD)	68
Revenus bruts (Mns USD)	735
Revenus nets hors impôts (Mns USD)	712
VAN hors impôts (taux d'actualisation 10%)	2644
TRI hors impôts	24 %

Source : auteurs à partir de Yamazaki 2008

¹⁰ Rappelons que les deux dernières usines métallurgiques en Nouvelle-Calédonie (Goro et Koniambo) ont représenté chacune des investissements supérieurs à 5 milliards d'USD.

Le poids de la VAN hors impôts représente désormais 50 % du PIB de 2011, soit un montant très significatif. Dans un tel scénario, l'impact macroéconomique du projet devient majeur.

Le Taux Effectif Moyen d'Imposition (TEMI) en tant qu'indicateur du partage de la rente (FMI 2012 ; FERDI 2013) s'établit dans ce scénario à 18,6 %. Les TEMI calculés par le FMI se trouvent en moyenne dans une fourchette allant de 40 à 60 % (FMI 2012). Autrement dit, il y aurait une véritable marge de manœuvre pour mettre en œuvre, au-delà de l'IS, une fiscalité minière adaptée pour permettre au gouvernement de la Polynésie française de capter une part plus significative de la rente économique, selon ce scénario. Cette part serait toutefois réduite, quel que soit le scénario considéré, par la prise en compte des dépenses d'exploration et de rémunération du risque.

Au final, le scénario favorable à partir duquel nous avons procédé à des simulations de la rentabilité économique d'un projet d'encroûtement cobaltifère et de ses enjeux économiques appuie l'idée que si les conditions d'un démarrage d'un tel projet ne sont pas encore réunies, du fait d'un niveau très élevé d'incertitude, les enjeux économiques pour la Polynésie française sont potentiellement importants.

Par rapport au scénario de base, pour lequel les encroûtements, même avec une teneur élevée en cobalt, ne portent pas une rentabilité suffisante pour envisager un projet minier, le principal élément différenciant est la quantité totale de cobalt produit.

Dans le scénario de base +60, pour une quantité de 4 500 tonnes de cobalt produit, la rentabilité atteint un plancher de 10 % (en considérant des prix supérieurs de 60 % à leur niveau moyen de la période 1984-2013). Selon ce scénario, les revenus fiscaux issus de la mine seraient inférieurs à ceux correspondant à un niveau d'IS de 30 %.

Dans le scénario favorable +60, en considérant une production de 10 000 tonnes de cobalt (soit 10 % du marché mondial en 2014), le TRI atteindrait cette fois un niveau de 20 %, avec des conséquences importantes sur les recettes fiscales de la Polynésie française. Dans ce dernier scénario, les TRI simulés se rapprochent des niveaux de TRI des projets miniers terrestres (environ 30 %), sans toutefois les égaler.

Au final, les deux scénarii de rentabilité présentés ici amènent à la conclusion que si les perspectives de développement d'un projet d'encroûtements sont limitées à court et moyen terme, il est possible qu'un tel projet puisse représenter un apport très important à plus long terme.

Un tel développement ne pourra se produire que si les incertitudes technologiques et économiques sont levées, par l'acquisition de nouvelles

données sur les caractéristiques géologiques des encroûtements, les avancées permises par la R&D sur les technologies d'extraction et de traitement du minerai, et si les tendances favorables qui traversent le marché mondial du cobalt se confirment à moyen terme.

De ce fait, la Polynésie française devrait exercer une veille sur ces dimensions techniques et économiques, en participant et en favorisant aussi les programmes d'exploration.

4 Bibliographie

AGARWAL B., HU P., PLACIDI M., SANT H.O, ZHOU J.J., 2012 - *Feasibility Study on Manganese Nodules Recovery in the Clarion-Clipperton Zone, The LRET Collegium 2012 Series*, Volume 2, University of Southampton.

ANDREWS B., FILPSE J., BROWN F., 1983 - *The Economic Viability of a Four-Metal Pioneer Deep Ocean Mining Venture*, Texas A&M University, Octobre.

AUTY R., 2007 - Natural resources, capital accumulation and the resource curse, *Ecological Economics* 61, 627-634.

BOUGAULT H., SAGET P. 2011 - Les Encroûtements Cobaltifères De Polynésie Française. *Mines et Carrières* 6 Industrie Minérale – oct 2011-n°185 - Hors série p 70-85.

CHARLES C. *et al.*, 1990 - Views on Future Nodule Technologies Based on Ifremer-Gemonod Studies, *Materials and Society*, Vol 14, pp 299-326.

CHUNG J.S., LIU S., 2005 - The proceedings of the Sixth (2005) ISOPE Ocean Mining Symposium : Changsha, Hunan, China.

DYMENT J., LALLIER F., LE BRIS N., ROUXEL O., SARRADIN P.-M., LAMARE S., COUMERT C., MORINEAUX M., TOUROLLE J. (coord.), 2014 – Les impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales marines profondes. Expertise scientifique collective, Rapport CNRS – Ifremer, 930 p. environ

ECORYS, 2014 - Study to investigate the state of knowledge of deep-sea mining, Final Report for the European Commission, Rotterdam/Brussels, 28 août.

ERTEN B., OCAMPO J. - 2013, Super Cycles of Commodity Prices Since the Mid-Nineteenth Century, World Development.

FMI, 2012 -, Régimes fiscaux des industries extractives: conception et application, préparé par le Département des finances publiques, approuvé par Carlo Cottarelli, 15 août.

GOTO K., YAMAZAKI T., NAKATANI N., ARAI R., 2010 - Preliminary Economic Feasibility Analysis Of Cobalt-Rich Manganese Crust Mining For Rare Metal Recovery, *Proceedings of the ASME 2010, 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering* June 6-11, 2010, Shanghai, China

HE G., MA W., SONG C., YANG S., ZHU B., YAO H., JIANG X., CHENG Y., 2011 - Distribution characteristics of seamount cobalt-rich ferromanganese

crusts and the determination of the size of areas for exploration and exploitation, *Acta Oceanol. Sin.*, 2011, Vol. 30, No. 3, P. 63-75

HILLMAN C.T., GOSLING B.B., 1985 - Mining Deep Ocean Manganese Nodules: Description and Economic Analysis of a Potential Venture, US Bureau of Mines, IC 9015, 19p.

JANKOWSKI P., 2012 - NI43-101 Technical Report 2011: PNG, Tonga, Fiji, Solomon Islands, New Zealand, Vanuatu and the ISA (No. NAT008). Nautilus Minerals Inc., 121 pp.

KOJIMA K., 1997 - Review of Studies on Manganese Nodules Processing, *Proc 2nd ISOPE Ocean Mining Symp*, Seoul, pp 19-22.

MARTEL-JANTIN B., LAMOUILLE B., BOUGAULT H., LE SUAVE R., FOUQUET Y., BONNEVILLE A., TROLY G., 2002 - Evaluation stratégique et prospective préliminaire des encroûtements polymétalliques sous-marins de la ZEE de la Polynésie française. Rapport confidentiel BRGM/RP-50842-FR

MARTINO et PARSON, 2011 - A comparison between manganese nodules and cobalt crust economics in a scenario of mutual exclusivity. S Martino, LM Parson. *Marine Policy* 36 (3), 790-800.

PARK S.H, YANG H.C., 2009 - A Technical and Economic Evaluation of Cobalt-rich Manganese Crusts, *Ocean and Polar Research*, June, Vol. 31(2):167-176.

SOREIDE F. *et al.*, 2001 - Deep Ocean Mining Reconsidered a Study of the Manganese Nodule Deposits in Cook Island, *Proc 4th ISOPE Ocean Mining Symp*, Szczecin, pp 88-93.

STEVENS, 2003 - Resource Impact: Curse or Blessing? – A Literature Survey, *The Journal of Energy Literature*, Volume IX Number 1 June, pp 3-42.

YAMAZAKI T., PARK S.-H., SHIMADA S. YAMAMOTO T. 2002 - Development of Technical and Economical Examination Method for Cobalt-Rich Manganese Crusts, *Proceedings of The Twelfth (2002) International Offshore and Polar Engineering Conference Kitakyushu*, May 26–31, Japan.

YAMAZAKI T., 2008 - Model mining units of the 20th and the economies, *Technical paper for ISA Workshop on Polymetallic Nodule Mining Technology-Current Status and Challenges Ahead*-Feb. 18-22, Chennai, India.

YAMAZAKI T *et al.*, 1995 - Geotechnical Parameters and Distribution Characteristics of the Cobalt-Rich Manganese Crust for the Miner Design, *Int J Offshore and Polar Eng*, Vol 5, pp 75-79.

ZAIGER, 1995 - Solution mining of Johnston Island manganese crusts: An economic evaluation, OCEANS '95. MTS/IEEE. Challenges of Our Changing Global Environment. Conference Proceedings, 9-12 octobre.

Expertise collégiale

Ressources minérales profondes en Polynésie française

Contributions intégrales

Expertise collégiale réalisée par l'IRD,
à la demande de l'État et de la Polynésie française.

IRD Éditions
INSTITUT DE RECHERCHE POUR LE DEVELOPPEMENT

Collection Expertise collégiale
Marseille, 2016

Coordination éditoriale

Laure Vaitiare ANDRÉ

Relecture technique des contributions intégrales et mise en forme

Danielle GRANIER

Carmen PELLET

Laure Vaitiare ANDRÉ

Coordination de fabrication

Catherine PLASSE

Duplication de la clé USB et interactivité :

Giga Services / Poisson-Soluble.com

Cette clé USB regroupe la version numérique de la synthèse en français et en anglais, ainsi que l'ensemble des contributions intégrales des experts du collège.

Pour citer cet ouvrage :

LE MEUR P.-Y., COCHONAT P., DAVID C., GERONIMI V., SAMADI S. (coord.), 2016 –
Les ressources minérales profondes en Polynésie française. Marseille, IRD Éditions,
coll. Expertise collégiale, bilingue français-anglais + tahitien, 288 p. + clé USB.

© IRD, 2016

ISSN : 1633-9924

ISBN : 978-2-7099-2191-6

Liste des experts

Membres du collège des experts

NOM	DISCIPLINE	INSTITUTION	PAYS
Nicholas ARNDT	Géochimie, exploitation économique de la ressource	Université de Grenoble	France, Canada, Afrique du Sud
Tamatoa BAMBRIDGE	Anthropologie juridique, pluralisme, tenure marine/terrestre	CNRS, USR Criobe, Moorea	Polynésie française
Patrice CHRISTMANN	Géologie, stratégie des ressources minérales	BRGM, direction de la stratégie, Orléans	Métropole
Pierre COCHONAT	Géosciences marines, explorations sous-marines, ressources minérales et énergétiques	ex-Ifremer, Paris	Métropole
Carine DAVID	Droit public, droit de l'environnement, pluralisme juridique	Université de la Nouvelle Calédonie, Nouméa	Nouvelle Calédonie
Christian JOST	Géographie de l'environnement, risques, impacts sur les milieux	Université de la Polynésie française, Papeete	Polynésie française
Vincent GERONIMI	Economie du développement, matières premières	Université de Versailles St-Quentin	Métropole
Pierre-Yves LE MEUR	Anthropologie politique, gouvernance des ressources et de l'environnement	IRD, UMR Gred, Nouméa	Nouvelle Calédonie
Sarah SAMADI	Biologie, évolution, faune des monts sous-marins	Muséum national d'histoire naturelle, Paris	Métropole
Antonino TROIANELLO	Droit public, droit économique, réglementation des matières premières	Université de la Polynésie française, Papeete	Polynésie française

Sommaire interactif

- ▶ I-00. Glossaire
Le collège
- ▶ I-0. Introduction : spécificités et phases du projet minier
P. Christmann, N. Arndt, P. Cochonat, V. Geronimi, P.-Y. Le Meur
- ▶ **Axe I : Connaissance, représentations et économie de la ressource**
Coordinateur : V. Geronimi
- ▶ I-1. Représentations polynésiennes, pratiques culturelles et usages sociaux de la ressource et de son environnement
T. Bambridge, P.-Y. Le Meur, C. Jost
- ▶ I-2. Que sait-on du patrimoine géologique sous-marin de la Polynésie française ?
N. Arndt, P. Cochonat, P. Christmann, V. Geronimi
- ▶ I-3. Opportunités économiques
P. Christmann, N. Arndt, P. Cochonat, V. Geronimi
- ▶ I-4. Quels potentiels supplémentaires apporterait une extension du plateau continental juridique ?
P. Cochonat. Experts Consultés : B. Loubrieu, W. Roest
- ▶ I-5. Scenarii économiques relatifs aux encroûtements cobaltifères
V. Geronimi, P. Christmann, P.-Y. Le Meur
- ▶ I-6. Diffusion et répartition de la rente : enjeux de soutenabilité
V. Geronimi, P.-Y. Le Meur
- ▶ **Axe II : Capacités de gouvernance : règles, responsabilités, acteurs (étatiques et non étatiques)**
Coordinateur : C. David
- ▶ II-1. La répartition des compétences entre l'État et la Polynésie française s'agissant des ressources minérales marines profondes : un besoin de clarification
A. Troianiello, C. David
- ▶ II-2. Contraintes et référentiels juridiques
C. David, A. Troianiello
- ▶ II-3. Les évolutions du droit national et polynésien envisageables en matière d'autorisation et d'exploitation des ressources minérales marines profondes
A. Troianiello, C. David

- ▶ II-4. Organisation de la participation des groupes d'acteurs impliqués / à impliquer
P.-Y. Le Meur, T. Bambridge, C. David
- ▶ II-5. Acteurs et gouvernance : enjeux, positionnements, intérêts, attentes
T. Bambridge, P.-Y. Le Meur
- ▶ II-6. Dispositifs d'administration et de gouvernance existants ou nécessaires
T. Bambridge, C. David, P.-Y. Le Meur

- ▶ **Axe III : Enjeux technologiques de l'exploration et de l'exploitation**
Coordinateur : P. Cochonat
- ▶ III-1. Quelles sont aujourd'hui les technologies connues pour l'exploration et l'extraction des ressources minérales profondes ressources identifiées en Polynésie française
P. Cochonat, S. Samadi, N. Arndt.
Experts Consultés : J. Denegre, H. Bougault
- ▶ III-2. Quels sont les acteurs, leurs rôles respectifs et les moyens disponibles pour l'exploration des ressources minières sous-marines ?
P. Cochonat, P. Christmann, S. Samadi
- ▶ III-3. Quelles sont les tendances des évolutions technologiques dans l'exploration des ressources minières sous-marines ?
P. Cochonat, P. Christmann, S. Samadi, N. Arndt
Experts consultés : J. Denegre, H. Bougault
- ▶ III-4. Quelles sont les tendances des développements technologiques pour l'exploitation des ressources minières sous-marines, adaptés à la Polynésie française?
P. Cochonat, P. Christmann, S. Samadi, N. Arndt, V. Geronimi
Experts consultés : J. Denegre, H. Bougault
- ▶ III-5. Infrastructures et compétences humaines disponibles en Polynésie française ou dont celle-ci doit se doter pour accueillir une filière minière sous-marine
T. Bambridge, P Cochonat. Expert consulté : J. Denegre

- ▶ **Axe IV : Enjeux environnementaux de l'exploration et de l'exploitation**
Coordinateur : S. Samadi
- ▶ IV-1. Écosystèmes et milieux concernés : état des connaissances
S. Samadi, C. Jost
- ▶ IV-2. Impacts écologiques : vulnérabilité et résilience
S. Samadi, C. Jost

- ▶ IV-3. Interférences de l’exploration/exploitation minière sous-marine
avec les autres activités
T. Bambridge, C. Jost
- ▶ IV-4. Recommandations socio-environnementales
T. Bambridge, S. Samadi, P.-Y. Le Meur, C. Jost
- ▶ **Axe V : Question transversale**
Coordinateur : N. Arndt
- ▶ V-1. Quels enseignements tirer des projets d’exploration en cours ?
N. Arndt, S. Samadi, P. Christmann