



Impact de la dilution opérationnelle sur le rendement métallurgique de l'or

Mémoire

Mathieu Boudreau

Maîtrise en génie des matériaux et de la métallurgie - avec mémoire
Maître ès sciences (M. Sc.)

Québec, Canada

Impact de la dilution opérationnelle sur le rendement métallurgique de l'or

Mémoire

Mathieu Boudreau

Sous la direction de :

Jocelyn Bouchard, directeur de recherche
René del Villar, codirecteur de recherche

Résumé

Ce mémoire rend compte d'une étude avec un minerai aurifère pour quantifier l'effet de la dilution excédentaire sur l'extraction de l'or. Depuis une quinzaine d'années, une tendance d'augmentation de la profondeur des mines souterraines est observée au Canada et dans le monde. Lorsque ces exploitations souterraines atteignent des profondeurs supérieures à 1000 m, elles deviennent sujettes à de fortes pressions et tensions causées par la roche. Cependant, l'effet résultant sur l'extraction du minerai est difficilement quantifiable occasionnant une dilution opérationnelle excédentaire à celle planifiée. Le projet de maîtrise analyse l'impact de cette dilution excédentaire sur le traitement du minerai d'une mine d'or située dans la région de l'Abitibi (nord-ouest du Québec). Pour ce faire, deux types de dilution sont considérés : la roche stérile et le remblai. Les résultats du test de Bond et de données de cyanuration issues de la littérature illustrent dans quelle mesure le taux d'alimentation peut être augmenté pour mitiger l'effet de cette dilution excédentaire et la perte de production en or. La discussion étudie également les points positifs et négatifs du montage conçu pour l'automatisation de la cyanuration du projet.

Table des matières

Résumé	iii
Table des matières	iv
Liste des tableaux	vii
Liste des figures	viii
Remerciements	x
Avant-propos	xi
Introduction	1
1 Théorie	4
1.1 Comminution	4
1.2 La chimie de l'or	6
1.3 Cyanuration	9
1.3.1 Effet de certains paramètres sur l'extraction	11
1.4 Dilution opérationnelle	14
1.5 Conclusion	16
2 Procédure expérimentale	18
2.1 Provenance du matériel de test	18
2.2 Concassage	20
2.3 Test de Bond	20
2.3.1 Protocole	20
2.3.2 Planification des expériences	21
2.4 Courbe de broyage	22
2.5 Préparation des échantillons pour la pyroanalyse	22
2.6 Préparation des échantillons pour l'analyse par absorption atomique	23
2.7 Cyanuration	23
2.7.1 Protocole	23
2.7.2 Planification des expériences	24
2.7.3 Traitement post-échantillonnage des données des capteurs	24
2.7.4 Réconciliation des données	25
2.8 Conclusion	29
3 Montage et essais préliminaires	30

3.1	Montage	30
3.1.1	Fonctionnement	31
3.1.2	Logiciel d'acquisition de données	40
3.1.3	Instruments de mesure	46
3.1.4	Précision des mesures, sources d'incertitude et problèmes rencontrés	51
3.1.5	Améliorations	56
3.2	Essais préliminaires	59
3.2.1	Essais de Bond	59
3.2.2	Cyanuration	60
3.3	Conclusion	61
4	Résultats et Analyse des données	62
4.1	Tests de Bond	62
4.2	Essais de cyanuration	65
4.2.1	Récupération	65
4.2.2	Cinétique	67
4.2.3	Cyanure	69
4.2.4	pH	71
4.3	Mitigation de la dilution opérationnelle	72
4.3.1	Calcul de la récupération en fonction du temps pour les différents mélanges	74
4.3.2	Cas 1 : Conservation des conditions d'opération nominales	77
4.3.3	Cas 2 : Augmentation du tonnage pour mitiger la diminution de teneur	77
4.4	Conclusion	79
	Conclusions	80
	A Courbe de broyage	82
	B Script Lowess	84
	C Test d'indépendance entre des variables aléatoire	86
C.1	Valeur moyenne de concentration en cyanure vs valeur moyenne précédente de concentration en cyanure	87
C.2	Valeur moyenne de concentration en cyanure vs valeur moyenne de masse ajoutée de cyanure	88
C.3	Valeur moyenne précédente de concentration en cyanure vs valeur moyenne de masse ajoutée de cyanure	88
C.4	Script Matlab pour le test d'indépendance de deux variables aléatoires	88
	D Script pour la réconciliation des données	91
D.1	Réconciliation pour l'or	91
D.2	Réconciliation pour le cyanure	92
	E Résultats des essais préliminaires pour le calcul de l'indice de Bond	98
	F Composition chimique du minerai et du stérile	99
	G Résultats de cyanuration	100

G.1 Essai 1-1	100
G.2 Essai 1-2	103
G.3 Essai 1-3	106
G.4 Essai 1-4	109
G.5 Essai 1-5	112
G.6 Essai 2-1	115
G.7 Essai 2-2	118
G.8 Essai 2-3	121
G.9 Essai 2-4	124
G.10 Essai 2-5	127

Bibliographie	130
----------------------	------------

Liste des tableaux

1.1	Stabilité de plusieurs complexes d'or	7
1.2	Mécanisme de dissolution de l'or	11
1.3	Temps de dissolution dans une solution alcaline cyanurée pour plusieurs miné- raux présents dans les minerais d'or	15
2.1	Planification des expériences pour le test de Bond	22
3.1	Étapes pour la séquence de mesurage du cyanure libre	37
3.2	Variabilité sur la mesure automatique du volume de solution cyanurée	55
3.3	Variabilité sur la mesure automatique du volume de solution cyanurée et de solution de dilution	56
4.1	Analyse de la variance pour les essais de Bond	63
4.2	Analyse statistique entre les deux séries de cyanuration.	66
4.3	Analyse statistique sur la cinétique entre les deux séries de cyanuration.	69
4.4	Analyse statistique entre les deux séries de cyanuration.	71
4.5	Rendement par tranche granulométrique (de Andrade Lima, 2001)	73
4.6	Données de l'alimentation à la cyanuration en cas d'augmentation du taux d'alimentation	75
4.7	Rendement et proportion de la classe granulométrique en fonction du mélange et de P_{80}	76
4.8	Quantité d'or extraite pour des conditions nominales d'opération	77
4.9	Quantité d'or extraite pour des conditions compensatoires d'opération	78

Liste des figures

1.1	Énergie spécifique de fragmentation en fonction de la taille des particules pour les différentes lois de la comminution	6
1.2	Stabilité de l'élément à former un complexe avec l'or	8
1.3	Diagramme de polarisation de la dissolution de l'or pour différentes concentrations de chlore.	10
1.4	Effet de la température sur la concentration en oxygène dissout	13
1.5	Méthode de minage à long trou (Shannon et al., 2012).	16
1.6	Dilution opérationnelle lors du minage à long trou	17
2.1	Résumé de l'utilisation des matériaux de tests.	19
2.2	Étapes de concassage.	20
2.3	Effet de l'algorithme LOWESS sur des données de pH pour un interval de temps de 120 minutes.	25
2.4	Taux de consommation du cyanure en fonction du temps pour une expérience .	28
2.5	Schématisation de la matrice d'incidence pour la réconciliation du cyanure. . .	28
3.1	Schéma simplifié du montage expérimental.	31
3.2	Diagramme de fonctionnement du montage automatisé.	32
3.3	Réacteur expérimental de cyanuration	33
3.4	Chicane pour aider à la suspension des particules.	35
3.5	Porte-échantillons rotatif.	36
3.6	Système d'analyse de la concentration en cyanure libre et de prise d'échantillons	41
3.7	Écran principal du programme d'automatisation	43
3.8	Programme simplifié d'automatisation.	43
3.9	Exemple de programmation avec Labview.	45
3.10	Profil de température pour une expérience de 24 heures se déroulant au mois de juillet	47
3.11	Impact sur les mesures du pH du changement d'électrode	53
3.12	Erreur causée par le Na^+ lors de la mesure du pH (Emerson Process Management, 2010)	53
3.13	Concentration en cyanure de la solution de dilution dans le temps	55
3.14	Effet de quantité de stérile dans un échantillon sur la teneur en or du solide . .	61
4.1	Droite prédictive et ensemble de données ajustées	63
4.2	Effet de la quantité de remblai sur la quantité d'or à l'alimentation de l'usine .	64
4.3	Récupération en fonction du temps pour l'ensemble des tests.	65
4.4	Comparaison entre la récupération mesurée et la récupération calculée à l'aide d'un modèle de cinétique de 2 ^e ordre	68

4.5	Récupération linéarisée en fonction du temps pour chaque série de tests.	69
4.6	Diagramme de boîtes à moustaches pour le contrôle du cyanure lors des essais.	70
4.7	Consommation cumulée en cyanure pour l'ensemble des tests	70
4.8	Diagramme de boîtes à moustaches pour le contrôle du pH lors des essais. . . .	71
4.9	Consommation du NaOH en fonction du test.	73

Remerciements

Tout d'abord, j'aimerais remercier mon directeur Jocelyn Bouchard et mon co-directeur René del Villar, dont le support continu et les nombreuses suggestions et conseils m'ont permis de venir à bout du travail. Un gros merci à Vicky Dodier pour ses recommandations et son aide que ce soit à la conception du montage et pour les analyses. Merci aux étudiants diplômés en métallurgie extractive, particulièrement Kevin et Jean-François, mais également Maryam et Anthony pour les nombreuses discussions qui ont été sources d'inspiration. Merci également à Clauter pour son aide lors des tests de Bond et de la détermination des courbes de broyage. Merci à Daniel Marcotte pour son aide précieuse lors de la conception du montage. Finalement, merci à l'ensemble des étudiants diplômés qui ont rendu ces dernières années beaucoup plus plaisantes.

Avant-propos

La recherche scientifique est la pierre angulaire de l'avancée économique et environnementale de l'extraction métallurgique. Tout métallurgiste est à même de percevoir comment les progrès scientifiques ont permis d'améliorer : a cinétique de réaction et la récupération par l'innovation et l'optimisation des techniques d'extraction ; le contrôle et la stabilité des procédés par les avancées dans les techniques de mesure, la réconciliation des données et la modélisation.

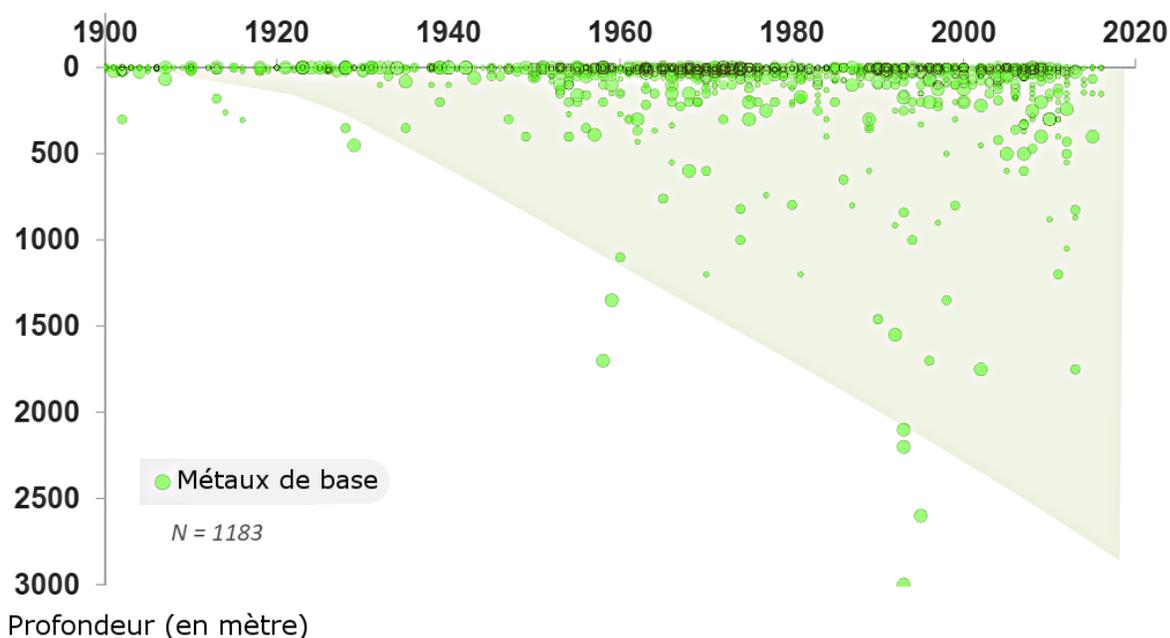
C'est pour participer à cet avancement scientifique et offrir ma contribution au domaine de connaissances que j'ai entamé cette maîtrise et ce projet de recherche sur l'impact de la dilution opérationnelle sur le rendement métallurgique de l'or.

Le chemin de la démarche scientifique est sinueux, difficile à parcourir et parfois ne mène nul part. Le projet de recherche a été concluant pour le questionnement relié à la comminution et la conception d'un montage automatisé de lixiviation. Par contre, une grande déception subsiste : les échantillons des types de dilution minière se sont finalement avérés non représentatifs. Conséquemment, l'objectif premier du projet de recherche (comprendre l'impact de la dilution opérationnelle sur l'extraction de l'or de la mine Westwood) n'a pas pu être concluant.

Une certaine partie du chemin a été arpentée, j'espère que les résultats du travail pourront servir aux futurs lecteurs.

Introduction

Il y a au Québec, un grand potentiel pour les mines profondes (>1000 m). Présentement, trois de ces mines sont exploitées dans la province (Laronde, Westwood et Éléonore) et la prospection pour en exploiter d'autres est toujours en cours. Les gisements en profondeur sont de plus en plus viables économiquement et recherchés et cela partout dans le monde comme on peut le constater sur la figure suivante.



Profondeur des gisements découverts par année depuis le début du 20^e siècle (Schodde, 2017).

Plus grande est la profondeur et plus grands sont les défis à surmonter pour une exploitation rentable et sécuritaire. L'historique du Québec dans ce domaine est plutôt récent et très peu d'études porte sur cette problématique particulière. Le seul cas répertorié est celui de la mine Lac Shortt (Tolgyesi, 1995). Cette dernière dû fermer prématurément à cause de dilution opérationnelle beaucoup plus élevée et de teneur plus faible que prévu. La dilution

opérationnelle était de 32,6% plus élevée que les attentes.

Les études de faisabilité permettent d'évaluer la rentabilité économique d'une mine. Bien entendu, la justesse de ces études est dépendante de la qualité et de la quantité de l'information disponible. Il est donc nécessaire de bien connaître et comprendre tous les facteurs pouvant affecter le rendement économique de la mine. Dans le cas des mines souterraines profondes, plusieurs facteurs demeurent peu connus et peu documentés. Ces exploitations souterraines utilisent généralement la méthode de minage par « chambres vides et longs trous » qui est caractérisée par de grandes ouvertures et, de ce fait, par une dilution opérationnelle importante souvent variable et plus élevée que prévu. L'impact de cette dilution excédentaire sur le rendement métallurgique est un facteur qui a peu été étudié. Jusqu'à maintenant, les études de faisabilité au concentrateur supposent que la teneur minimale de son alimentation est celle du gisement avec une considération pour un certain facteur de dilution. Cette dilution contamine en moyenne de 15 à 25% le minerai mais peut atteindre jusqu'à 60% massique pour certains chantiers et exploitations. Il est donc primordial de bien comprendre l'impact de cette dilution excédentaire sur le rendement métallurgique et sur la consommation de réactifs.

Dans ce projet de recherche, on veut évaluer l'impact de cette dilution excédentaire sur les circuits de comminution et de cyanuration à partir du cas d'étude de la mine d'or Westwood située dans la région de l'Abitibi-Témiscamingue et exploitée par la Corporation Iamgold. De plus, on cherche à étudier comment les conditions d'opération du concentrateur peuvent être ajustées de façon à mitiger les pertes économiques encourues lors d'une dilution opérationnelle de l'alimentation supérieure aux prévisions. Deux alternatives d'opération sont considérées :

1. Maintenir les conditions normales d'opération et diminuer ainsi la production d'or et des revenus.
2. Augmenter le débit d'alimentation pour maintenir la production en or mais en assumant une perte de métal au rejet.

En effet, cette deuxième option se traduit normalement par un impact sur la distribution granulométrique qui devient plus grossière, si la charge et le temps de séjour au broyeur demeurent raisonnables, et cause une diminution de la récupération à l'étape de cyanuration en raison d'une réduction du temps de séjour, d'un ralentissement de la vitesse de dissolution et potentiellement d'une augmentation des pertes en or inaccessible.

Cela étant, plusieurs questions demeurent :

- Quel est l'impact de la dilution opérationnelle lors du broyage ?
- Quel est son impact lors de la cyanuration ?
- Comment faire pour mitiger les impacts négatifs liés à ce contaminant ?

Pour répondre à ces questions, deux types de dilution opérationnelle sont considérés : la roche stérile et le remblai. Le stérile est la roche encaissant le gisement et dont la teneur en éléments de valeur n'est pas suffisamment élevée pour justifier l'exploitation. Le remblai est un "ciment" qui permet de remplir les chantiers déjà exploités. Ce dernier peut se retrouver avec le minerai lorsqu'un chantier adjacent est exploité. Lors des tests, la quantité de ces deux types de dilution opérationnelle est variée selon une planification factorielle d'expérience avec un agencement cubique. Deux tests principaux permettent vérifier les questions énoncées ci-dessus : le test de Bond pour la comminution et des tests de cyanuration en béccher ouvert à l'aide d'un montage automatisé.

Comme toute chose ne va pas toujours comme on le souhaite, le travail n'a pas été concluant pour les tests de cyanurations à cause de différents problèmes qui sont expliqués dans la section 3.2.2. Les essais de cyanuration ont plutôt permis d'évaluer la capacité du montage automatisé à obtenir de bons résultats de cyanuration et des données intéressantes sur la consommation de réactifs et l'expérience en général. L'impact de la dilution opérationnelle sur la cyanuration ne pourra donc pas être évalué. Par contre une tentative de répondre à la question de mitigation des effets négatifs de la dilution est faite en utilisant des données tirées de la littérature.

Le mémoire se décline de la façon suivante :

- le chapitre 1 porte sur les aspects théoriques du sujet,
- le chapitre suivant porte sur la procédure expérimentale et l'aspect théorique du traitement des données,
- le 3^e chapitre traite du montage expérimentale et des essais préliminaires,
- suit le chapitre 4 sur les résultats et, finalement,
- la conclusion.

Chapitre 1

Théorie

Tout projet de recherche repose en partie sur le travail de recherche qui a été fait antérieurement. Afin de continuer dans cette optique, ce chapitre présente les principaux éléments théoriques pertinents au projet. Dans ce projet, ceux-ci portent sur la comminution, la chimie de l'or, la cyanuration et finalement, la dilution opérationnelle. Ces sujets seront abordés dans les prochaines sections.

1.1 Comminution

La comminution d'un minerai consiste en la réduction de la dimension d'un matériau d'une taille grossière à une taille plus fine. Cette étape de la chaîne d'extraction minérale regroupe à la fois le concassage et le broyage. Une certaine quantité d'énergie est fournie au minerai pour permettre sa fragmentation. Ce principe de base de la comminution a donné lieu à de nombreuses théories tentant d'expliquer et de décrire la relation entre l'énergie fournie et le changement dimensionnel du matériau. La théorie de comminution la plus ancienne, appelée dans la littérature la première loi de comminution, a été formulée par [von Rittinger \(1867\)](#). Cette loi postule que l'aire des nouvelles surfaces créées lors du processus de comminution est directement proportionnelle à l'énergie fournie pour la fragmentation. Selon Rittinger, la surface totale de particules possédant un diamètre uniforme d est proportionnelle à $1/d$. L'énergie est donc inversement proportionnelle à la diminution de taille de particule. L'énergie à fournir pour faire passer les particules d'une taille d_1 à une taille d_2 suit l'équation suivante :

$$W_R = C_R \left(\frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_1} \right) \text{kWh/t} \quad (1.1)$$

où C_R est une constante propre au matériau.

La deuxième loi de la comminution est proposée par [Kick \(1885\)](#). Celui-ci suggère que l'énergie de fragmentation soit proportionnelle à la diminution de volume des particules issues de la fragmentation. Selon Kick, l'énergie nécessaire à la réduction d'une taille de particule d_1 à une taille d_2 prend la forme suivante :

$$W_K = -C_K \ln \left(\frac{d_2}{d_1} \right) \quad (1.2)$$

Comme ni la loi de Rittinger qui s'intéresse uniquement aux variations des surfaces, ni la loi de Kick qui s'intéresse uniquement aux variations des volumes, ne s'accordaient avec les résultats d'opérations industrielles de broyage et de concassage, [Bond \(1952\)](#) proposa la 3^e loi de la comminution. Cette dernière loi de la comminution établit que l'énergie de fragmentation est proportionnelle à la longueur de nouvelles fissures produites lors du processus de comminution. Pour des particules de forme similaire, l'énergie de fragmentation est inversement proportionnelle à la racine carrée de la taille moyenne de la distribution de particules. Sous forme mathématique, cette loi prend alors la forme suivante :

$$W_B = W_i \left(\frac{10}{\sqrt{d_2}} - \frac{10}{\sqrt{d_1}} \right) \quad (1.3)$$

Où d_1 et d_2 représentent l'ouverture de la maille d'un tamis laissant passer 80% de la masse du lot considéré, soit l'alimentation et le passant. Le terme W_i , communément appelé indice de Bond, est propre à un minerai donné.

Selon les travaux de [Walker et al. \(1937\)](#), les trois théories de la comminution sont toutes des cas particuliers de l'équation différentielle suivante :

$$\frac{dE}{dx} = -C \frac{1}{d^n} \quad (1.4)$$

Où E est l'énergie correspondant à un changement dimensionnel de d . En résolvant cette équation différentielle avec des valeurs de n égale à 2, 1 ou 1,5, il est possible d'obtenir respectivement la loi de Rittinger, celle de Kick et celle de Bond. Selon les travaux de [Hukki](#)

(1961), les trois lois sont approximativement correctes pour un certain intervalle spécifique de dimensions de particules. En effet, la loi de Kick est approximativement bonne pour des particules très grossières (diamètre supérieur à 10 cm), celle de Rittinger donne une bonne approximation lorsque la taille des particules est inférieure à 100 μm et finalement, celle de Bond se situe entre les deux autres. C'est pourquoi la loi de Bond est celle qui est retenue comme standard en industrie pour le broyage. Comme on peut le constater sur la figure 1.1, chacune des lois permet d'établir une approximation de l'énergie requise à la fragmentation sur un intervalle relativement restreint.

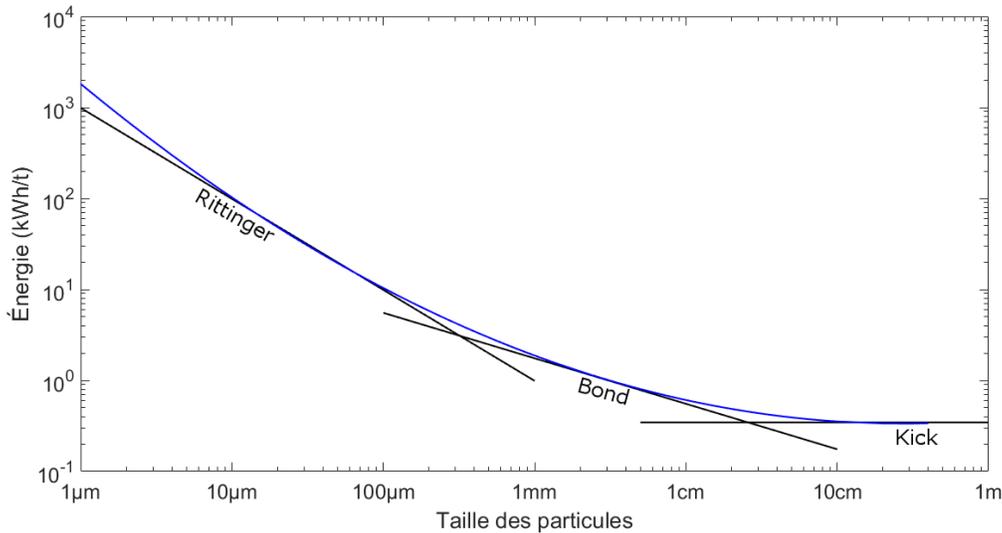


FIGURE 1.1 – Énergie spécifique de fragmentation en fonction de la taille des particules pour différentes lois de comminution. On retrouve en noir la loi de Kick, de Rittinger et de Bond et, en bleu, la loi unificatrice de Walker. Les données présentées sont fictives. Inspiré de Hukki (1961)

1.2 La chimie de l'or

La découverte de l'or remonte à l'antiquité où sa beauté, sa malléabilité et sa faible réactivité en ont fait un métal extrêmement prisé. L'or est le plus noble des métaux et ne réagit ni avec l'oxygène ni avec le soufre que cela soit dans l'eau ou dans l'air. En nature, on le retrouve habituellement sous sa forme métallique généralement associée à l'argent (Habashi, 1999). Les composés de calavérite (AuTe_2), de stibnite (AuSb_2) et de maldonite (Au_2Bi) sont également possibles et représentent des défis supplémentaires à l'extraction (Zhang et al., 2010 ; La Brooy et al., 1994).

Tableau 1.1 – Stabilité de plusieurs complexes d’or

Or(I)		Or(III)	
Complexe	Stabilité	Complexe	Stabilité
$\text{Au}(\text{CN})_2^-$	2E38	$\text{Au}(\text{CN})_4^-$	1E56
$\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$	5E28	AuI_4^-	5E47
$\text{Au}(\text{CS}(\text{NH}_2)_2)_2^+$	2E23	$\text{Au}(\text{SCN})_4^-$	1E42
AuI_2^-	4E19	AuBr_4^-	1E32
$\text{Au}(\text{SCN})_2^-$	1, 3E17	AuCl_4^-	1E26
AuBr_2^-	1E12		
AuCl_2^-	1E9		

On retrouve communément l’or en solution sous les états d’oxydation aureux (Au(I)) et aurique (Au(III)). Tous les complexes aurifères convenables à l’extraction hydrométallurgique de l’or font partie de ces groupes. On peut également retrouver l’or sous les états d’oxydation -1, +2, +4 et +5. Par contre, ces états sont plutôt des curiosités académiques (Nicol et al., 1987).

La thermodynamique prédit que ni les cations aureux, ni les cations auriques sont stables en solution aqueuse et qu’ils sont réduits par l’eau en or métallique lorsque présents en solution. Pour réussir à maintenir l’or en solution, un agent oxydant et un ligand complexant doivent être introduits puisqu’aucune réaction ne peut se produire sans la présence de ces deux agents en solution (Nicol et al., 1987). Par exemple, l’acide chlorhydrique, qui est un puissant ligand complexant lorsque mis en contact avec l’or ne produit aucune dissolution de l’or (en réalité une petite quantité d’or est mise en solution, mais la cinétique est extrêmement lente). De même, l’acide nitrique, qui est un puissant agent oxydant n’est pas non plus capable de dissoudre le précieux métal par lui-même. Par contre, lorsque ces deux acides sont présents ensemble, ils forment un mélange acide que l’on appelle l’aqua regia et qui peut facilement dissoudre l’or.

Il existe une grande quantité de complexes d’or ayant chacun leur stabilité propre. On peut voir dans le tableau 1.1 (Egan, 2007) certains de ces complexes dont les ligands les plus populaires sont le cyanure ($\text{Au}(\text{CN})_2^-$), le thiosulphate ($\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$), le thiocarbamide ($\text{Au}(\text{CS}(\text{NH}_2)_2)_2^+$) et le chlore (AuCl_4^-).

L’obtention d’un complexe aureux (AuL_2^+) ou aurique (AuL_4^+) en présence d’un certain ligand dépend de la force de l’agent oxydant et du potentiel de réduction de l’ion en présence du

ligand. En général, l'ion aureux forme des complexes plus stables avec des ligands contenant des atomes faiblement donneurs d'électrons tels que S, C, Se et P, alors que l'aorique forme des complexes avec les donneurs d'électrons plus électronégatif ou dure tel que le N, O, F, Cl, etc. (Nicol et al., 1987). Le nombre de coordination préféré pour l'or aureux est de 2 et pour l'aorique est de 4. L'aureux a tendance à former des complexes linéaires alors que l'aorique forme plutôt des complexes carrés planaires.

L'or possède des ions métalliques de type B, c'est-à-dire que la stabilité des complexes est inversement proportionnelle à l'électronégativité du ligand donneur d'électrons. La figure 1.2 présente les éléments ayant une bonne stabilité avec l'or. Notamment, on peut y constater la stabilité de l'antimoine et du tellure que l'on peut retrouver dans certains minéraux avec l'or, mais également le carbone qui offre une excellente stabilité sous la forme de cyanure. Ce dernier est le ligand le plus conventionnel pour l'extraction de l'or et une section entière (1.3) y est consacrée.

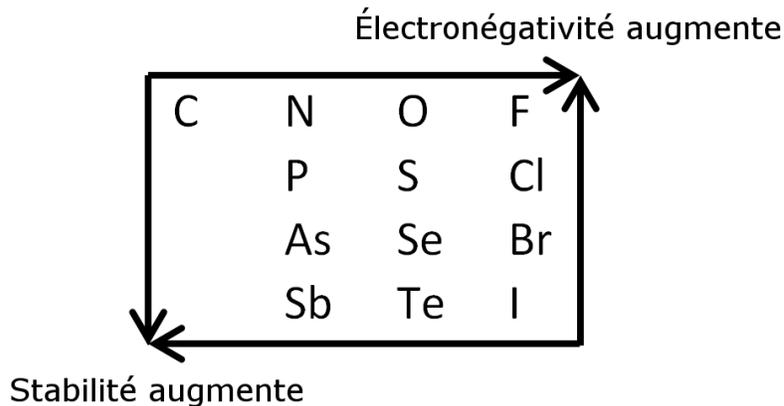
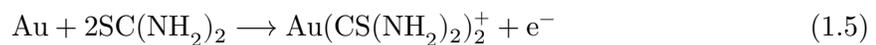


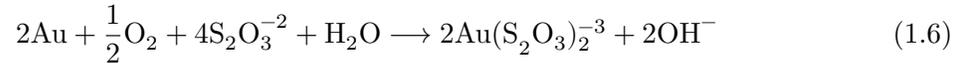
FIGURE 1.2 – Stabilité de l'élément à former un complexe avec l'or

Outre l'utilisation du cyanure pour la lixiviation, l'utilisation de la thiourée ou du thiosulphate sont des options qui ont été étudiées pour la lixiviation de l'or. Dans le cas de la thiourée, le complexe $\text{Au}(\text{CS}(\text{NH}_2)_2)_2^+$ est formé à un potentiel inférieur à 0,6 V, d'après la réaction chimique suivante :



En laboratoire, les récupérations sont excellentes avec la thiourée, par contre son coût plus élevé que celui du cyanure, sa consommation élevée et le manque de connaissance dans les étapes subséquentes de récupération de l'or en font une méthode de lixiviation moins intéressante qu'avec le cyanure (La Brooy et al., 1994).

La formation d'un complexe stable de thiosulphate d'or suit la réaction suivante :



Son utilisation demeure principalement académique à cause de problème lié à la formation d'un film passif de soufre à la surface de l'or (La Brooy et al., 1994). Malgré cela, une certaine avancée a été obtenue par la Corporation Barrick Gold au concentrateur GoldStrike où un procédé d'extraction à l'aide de thiosulphate est utilisé depuis 2014 (Barrick Gold, 2019).

Les halogènes (Cl, Br et I) sont également très réactifs avec l'or. À l'état gazeux, le brome est particulièrement réactif et produit du Au_2Br_6 lors d'une réaction exothermique à température de la pièce (Nicol et al., 1987). Mis en solution, les halogènes peuvent servir à faire la lixiviation de l'or. Cette technique d'extraction est utilisée principalement en laboratoire où les coûts élevés ne représentent pas un facteur prohibitif. Il n'en demeure pas moins qu'il y a toujours de la recherche pour la réintroduction d'une extraction de l'or par le chlore notamment par l'entreprise de Thetford Mines, Dundee Sustainable Technologies (Lemieux et al., 2017). L'extraction de l'or par chloration (procédé Plattner) était la seule méthode utilisée antérieurement à la découverte du cyanure à la fin du 19^e siècle. On peut voir dans la figure 1.3, le comportement anodique de l'or lorsqu'en présence de chlore dans une solution acide et à un potentiel de plus de 1V et de moins de 1,4V.

1.3 Cyanuration

Le cyanure est utilisé pour la lixiviation de l'or depuis la fin du 19^e siècle. De fait, en 1887, McArthur et Forrest développèrent le procédé de cyanuration suivi par la précipitation par l'ajout de la poudre de zinc (cémentation) (Swiecki, 2019; Fleming, 1992). La découverte de ce procédé fut un énorme succès : la consommation mondiale en cyanure en 1889 n'excédait pas 50 tonnes, alors qu'en 1905, elle atteint 10 000 tonnes (Habashi, 1967). Ce succès est

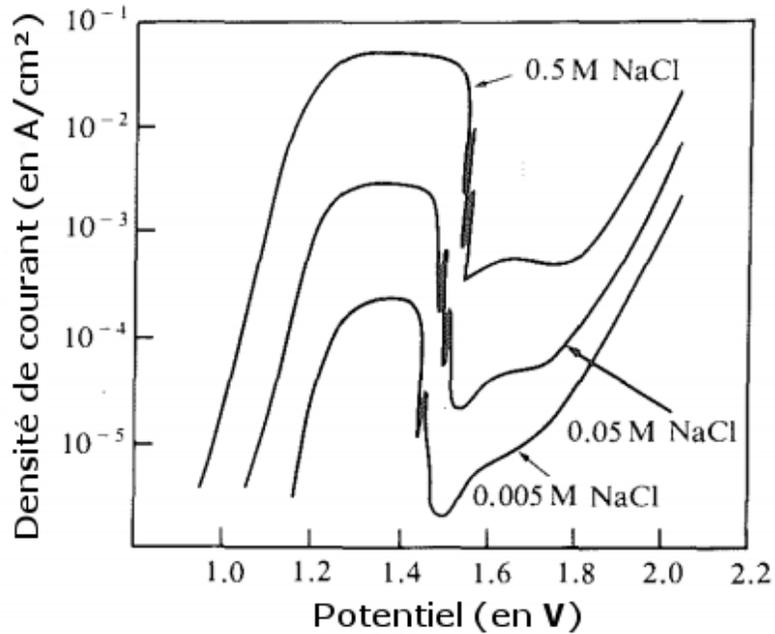
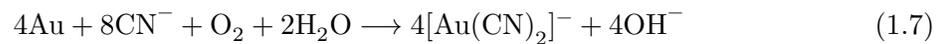


FIGURE 1.3 – Diagramme de polarisation de la dissolution de l'or dans une solution de 0,5M d'acide sulfurique et pour différentes concentrations de chlore (Nicol et al., 1987).

attribué à la grande stabilité du cyanure d'or qui permet de dissoudre le métal à de très faibles concentrations de cyanure et de garder le complexe en solution même lorsqu'il n'y a plus de cyanure dans la solution (Fleming, 1992).

Cette réaction de lixiviation utilise le cyanure sous forme généralement de NaCN ou de KCN comme agent complexant selon la réaction globale suivante :



Cette dernière réaction chimique combine la réaction d'oxydation de l'or, la formation du complexe et la réduction de l'oxygène à la surface du métal, selon les réactions chimiques suivantes (Habashi, 1999) :

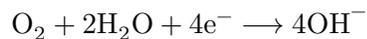
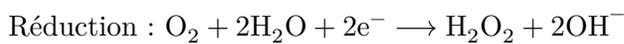


Tableau 1.2 – Mécanisme de dissolution de l’or

1	$\text{CN}_{(b)}^- = \text{CN}_{(i)}^-$	Diffusion du CN^- de la solution vers la surface de l’or
2	$\text{Au}_{(s)} + \text{CN}_{(i)}^- = \text{Au}(\text{CN})_{(ads)}^-$	Adsorption du cyanure sur l’or
3	$\text{Au}(\text{CN})_{(ads)}^- = \text{Au}(\text{CN})_{(ads)}^0 + e^-$	Oxydation de l’or
4	$\text{Au}(\text{CN})_{(ads)}^0 + \text{CN}_{(i)}^- = \text{Au}(\text{CN})_{2(i)}^-$	Formation du complexe
5	$\text{Au}(\text{CN})_{2(i)}^- = \text{Au}(\text{CN})_{2(b)}^-$	Diffusion du complexe dans la solution
6	$\text{Au}_{(s)} + 2\text{CN}_{(b)}^- = \text{Au}(\text{CN})_{2(b)}^- + e^-$	Mécanisme global

Les mécanismes intrinsèques de la cyanuration de l’or sont encore constamment étudiés et remis en question. Les mécanismes généralement acceptés sont : l’adsorption du CN^- sur la surface de l’or, l’oxydation de l’or par l’oxygène, la formation du complexe de cyanure d’or et finalement la diffusion du complexe dans la solution (Senanayake, 2005). Les étapes proposées sont présentées dans le tableau 1.2.

Selon certains auteurs (Senanayake, 2005; Nicol et al., 1987), la cinétique de la réaction est contrôlée par la formation d’un film passif à la surface de l’or lors de l’adsorption du cyanure pour former du $\text{Au}(\text{CN})_{(ads)}^0$ à l’étape 2 du tableau 1.2. La présence de certaines impuretés (argent, cuivre et plomb) permet d’améliorer la cinétique par des mécanismes encore incompris (Nicol et al., 1987). Plusieurs études ont également mis en évidence l’impact de la concentration de l’oxygène et du cyanure sur la cinétique (Habashi, 1999; Fleming, 1992). Lorsque la concentration en cyanure est inférieure à 60 ppm, la diffusion de ce dernier contrôle la cinétique de la réaction, alors qu’au-delà de cette valeur, la diffusion de l’oxygène en solution devient le processus limitant (Fleming, 1992).

1.3.1 Effet de certains paramètres sur l’extraction

Effet de la concentration en cyanure

L’effet de la concentration en cyanure libre sur la cinétique de lixiviation a été longuement étudié par de nombreux chercheurs. Grâce à la grande stabilité du complexe $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$, la réaction chimique peut se produire à de très faible concentration de cyanure (Nicol et al., 1987). Pour obtenir une bonne cinétique, le consensus est qu’au-delà d’une concentration de 60 ppm de cyanure la cinétique de lixiviation n’est pas affectée par l’augmentation de la concentration en cyanure (Fleming, 1992). En dessous de cette limite, l’impact du changement de

concentration a un effet linéaire.

L'ajustement du cyanure est généralement fait à partir d'ajouts de NaCN ou bien de KCN. Lors de l'extraction de minerai très riche tel que les concentrés d'or lixiviés en cyanuration intensive, l'utilisation de KCN permet d'obtenir de meilleurs rendements. Selon Nicol et al. (1987), l'ion sodium du NaCN peut former un précipité d'un sel d'aurocyanure de sodium qui passivise les surfaces des grains d'or et limite la cinétique et la récupération.

Effet de la concentration en oxygène

La lixiviation de l'or par le cyanure est largement contrôlée par la diffusion de l'oxygène pour permettre l'oxydation de l'or métallique. Lorsque le cyanure libre se trouve en concentration suffisante dans le réacteur (plus de 60 ppm pour un minerai peu réactif), la cinétique est principalement contrôlée par la concentration d'oxygène en solution et sa diffusion jusqu'aux grains d'or (Fleming, 1992). Tous les paramètres pouvant affecter la concentration d'oxygène en solution ont un impact sur la cinétique de la réaction. Trois facteurs principaux peuvent affecter la concentration d'oxygène : la température, la pression atmosphérique, l'utilisation d'oxygène pur.

L'effet de la température sur la solubilité de l'oxygène à pression constante est assez bien connu. L'augmentation de la température fait diminuer la concentration en oxygène dissout comme montré dans la figure 1.4.

La pression atmosphérique augmente directement la quantité de gaz pouvant se trouver en solution. L'augmentation de la pression est notamment utilisée dans la lixiviation intensive où la vitesse de lixiviation est grandement améliorée et des temps de séjour de 3-4 heures sont possibles (Nicol et al., 1987).

L'utilisation d'oxygène pur permet d'augmenter la pression partielle d'oxygène en solution (Fleming, 1992). Puisque l'air est composé à 21% d'oxygène, l'azote est le gaz ayant la pression partielle la plus élevée dans l'air. En retirant ce gaz, on peut augmenter de beaucoup la cinétique de la réaction tant que l'accès à l'oxygène demeure l'étape limitante de la réaction.

Effet de la température

Selon Habashi (1999), la température a un effet positif sur la cinétique de lixiviation jusqu'à une valeur de 85°C. Par contre, la solubilité de l'oxygène est inversement proportionnelle à la température. Si la concentration en oxygène dissout n'est pas maintenue, l'effet global sur la cinétique est négatif.

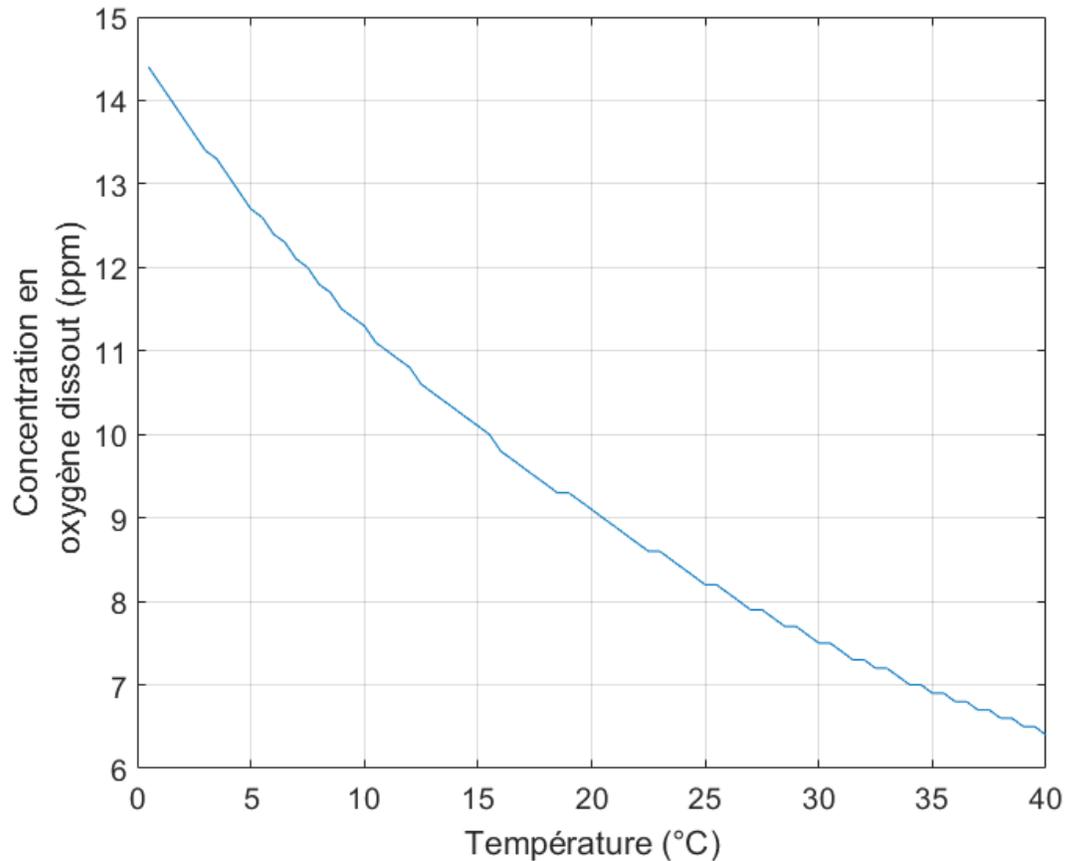


FIGURE 1.4 – Effet de la température sur la concentration en oxygène dissout à 1 atm (données provenant de Wilde et al. (1999))

Effet de l'agitation

L'agitation favorise la diffusion de l'oxygène dissout et du cyanure (Habashi, 1999). Elle permet d'augmenter la cinétique de lixiviation jusqu'à un certain maximum.

Effet des ions étrangers

Certains ions étrangers ont des effets positifs alors que d'autres ont des effets négatifs sur la cinétique de lixiviation. Les ions à effets négatifs peuvent être catégorisés selon trois effets principaux : passivation de l'or, consommation du cyanure ou de l'oxygène et adsorption de l'or dissout (preg-robbing).

Des effets positifs sur la cinétique ont été observés lors de la présence en faible concentration d'ions tel que Pb^{+2} , Hg^{+2} , Bi^{+3} et Tl^{+} (Habashi, 1999 ; Nicol et al., 1987). Selon Habashi (1967), l'effet accélérant est attribué aux métaux qui ont un potentiel négatif dans les conditions de dissolution. Ces derniers inhibent la formation d'une couche passivante à la surface de l'or (Nicol et al., 1987).

Le Pb^{+2} est l'ion le plus utilisé pour accélérer la cinétique lors des cyanurations. Ce dernier est généralement ajouté sous forme de PbNO_3_2 qui, en plus d'augmenter la vitesse de dissolution, permet de précipiter les sulfures (Srithammavut, 2008 ; Habashi, 1999). Il a été observé qu'en trop grande concentration, le Pb^{+2} a un effet néfaste sur la cinétique.

D'autres ions sont reportés comme n'ayant pas d'impact sur la lixiviation de l'or (Na^{+} , K^{+} , Cl^{-} , NO_3^{-} et SO_4^{-2} (Habashi, 1999)). Plusieurs autres ions et minéraux ont des effets négatifs pouvant affecter la consommation de cyanure et d'oxygène, passiver la surface de l'or et adsorber le cyanure d'or en solution.

Les sulfures sont généralement très réactifs en solution alcaline et en présence de cyanure, le tableau 1.3 présente le taux de dissolution de plusieurs minéraux après 24 heures (Habashi, 1967). Ces derniers ne sont pas nuisibles à la cyanuration mise à part la consommation du cyanure et de l'oxygène. À forte concentration de ces deux réactifs, la cinétique de lixiviation n'est pas affectée (Nicol et al., 1987). Selon Nicol et al. (1987), la pyrite pourrait causer la passivation lorsqu'il y a contact galvanique entre l'or et la pyrite.

Outre les sulfures, le CaOH_2 utilisé pour l'ajustement du pH a un effet retardant/passivant sur la lixiviation lorsque le pH est assez élevé (supérieur à 10,8) (Habashi, 1999). Certains chercheurs (Habashi, 1999 ; Nicol et al., 1987) proposent qu'il y aurait passivation de la surface de l'or par du dioxyde de calcium. Par contre, le calcium lorsque présent sous la forme de CaCl n'a pas d'impact mesurable sur la cyanuration (Nicol et al., 1987).

Tableau 1.3 – Temps de dissolution dans une solution alcaline cyanurée pour plusieurs minéraux présents dans les minerais d'or

		Minéral	% dissout en 24 heures	
Minéral d'or	Calaverite	AuTe_2	Facilement dissout	
Minéral d'argent	Argentite	Ag_2S	Facilement dissout	
	Cerargyrite	AgCl	Facilement dissout	
	Proustite	Ag_3AsS_3	Peu soluble	
	Pyrargyrite	Ag_3SbS_3	Peu soluble	
Minéral de cuivre	Azurite	$\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$	94,5	
	Malachite	$\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$	90,2	
	Chalcocite	Cu_2S	90,2	
	Cuprite	Cu_2O	85,5	
	Bornite	Cu_5FeS_4	70,0	
	Enargite	Cu_3AsS_4	65,8	
	Tetrahedrite	$\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$	21,9	
	Chrysocolla	CuSiO_3	11,8	
	Chalcopyrite	CuFeS_2	5,6	
	Minéral de zinc	Smithsonite	ZnCO_3	40,2
		Zincite	ZnO	35,2
		Hydrozincite	$\text{Zn}_5(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_6$	35,1
		Franklinite	$(\text{Fe,Mn,Zn})\text{O}(\text{Fe,Mn})_2\text{O}_3$	20,2
		Sphalerite	ZnS	18,4
Gelamine		$\text{H}_2\text{Zn}_2\text{SiO}_4$	13,4	
Willemite		Zn_2SiO_4	13,1	
Minéral de fer		Pyrrhotite	FeS	Facilement dissout
	Pyrite	FeS_2	Peu soluble	
	Hematite	Fe_2O_3	Peu soluble	
	Magnetite	Fe_3O_4	Pratiquement insoluble	
	Siderite	FeCO_3	Pratiquement insoluble	
	Minéral d'arsenic	Orpiment	As_2S_3	73,0
Realgar		As_2S_2	9,4	
Arsenopyrite		FeAs	0,9	
Minéral d'antimoine	Stibnite	Sb_2S_3	21,1	
Minéral de plomb	Galena	PbS	Soluble à haute alcalinité	

Finalement, la matière carbonée présente dans le minerai n'a pas d'impact retardant sur la cyanuration. Par contre, les cyanures d'or peuvent s'adsorber sur des éléments carbonés et diminuer grandement la récupération.

1.4 Dilution opérationnelle

À ce jour, il n'existe aucune étude qui s'intéresse aux impacts de la dilution opérationnelle sur le rendement métallurgique d'un concentrateur. La documentation qui se penche uniquement sur cette problématique dans le contexte de l'exploitation souterraine où celle-ci est due aux techniques d'exploitation et à certains facteurs géologiques.

Dans les mines profondes, on utilise généralement la méthode de minage à long trou. Cette technique est caractérisée par de grandes ouvertures et par une dilution opérationnelle importante (Laflamme, 2014). Cette technique consiste au dynamitage d'un chantier perpendiculaire à la direction des tunnels. Chaque chantier est indépendant et connecté par un tunnel à sa base et par un tunnel supérieur. Dans le cas où un chantier adjacent a déjà été exploité, ceux-ci sont remblayés avec un matériel cimenté (remblai). On peut voir sur la figure 1.5 une représentation de cette technique de minage.

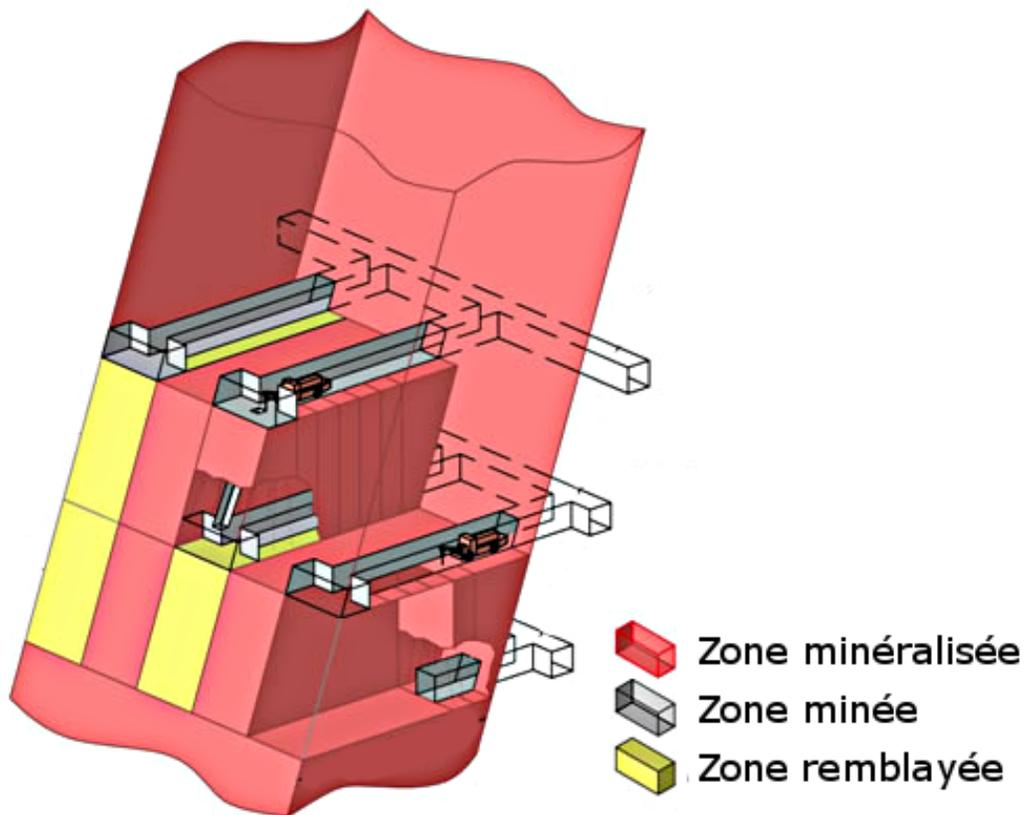


FIGURE 1.5 – Méthode de minage à long trou (Shannon et al., 2012).

Puisque cette technique est peu sélective, lors de l'étape de dynamitage des chantiers une certaine quantité de la roche environnante (remblai ou stérile) peut se retrouver avec le minerai et diminuer ainsi la teneur en or. La figure 1.6 représente bien le phénomène.

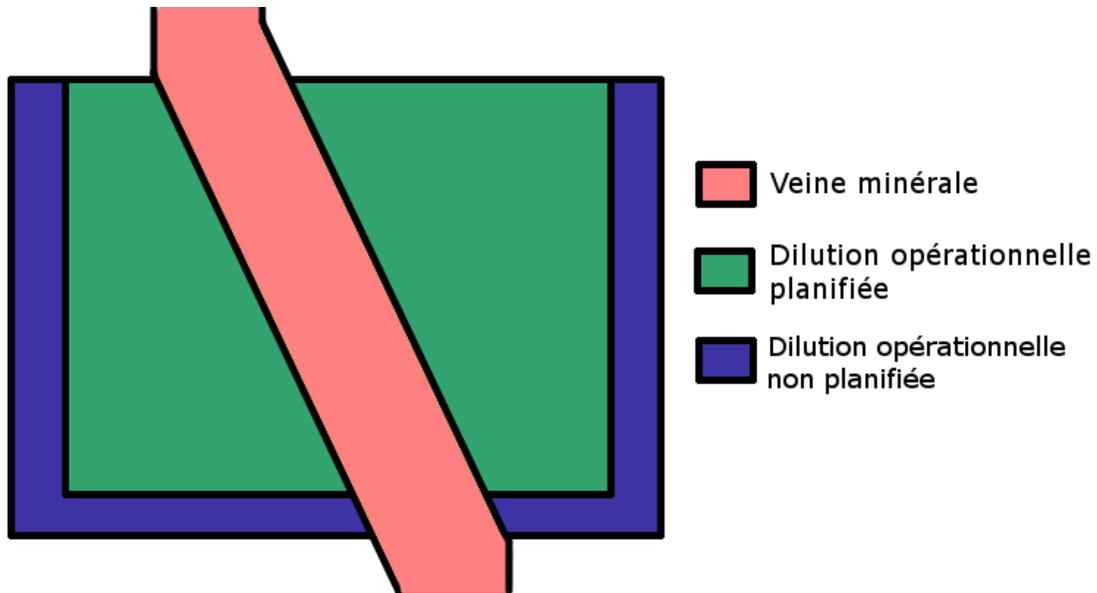


FIGURE 1.6 – Dilution opérationnelle lors du minage à long trou. Une certaine quantité de dilution est planifiée. Dans les mines profondes, il n'est pas rare d'avoir une plus grande quantité de dilution que ce qui avait été planifiée (Shannon et al., 2012).

Jusqu'à maintenant, l'effet de cette dilution opérationnelle au concentrateur n'a jamais été étudiée et des façons de mitiger les impacts économiques négatifs, qui peut causer une dilution opérationnelle additionnelle, restent encore à être trouvées.

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, il a été question des éléments théoriques associés avec le projet de recherche. On y retrouve notamment les lois de Bond, Kick et Rittinger reliant l'énergie et le changement dimensionnelle d'un minerai, les aspects théoriques de l'extraction de l'or et de la chimie de cet élément et, finalement, le principe d'extraction du minerai dans une mine profonde où la dilution opérationnelle excédentaire est très fréquente. Ces éléments sont les fondations sur lequel repose les procédures expérimentales dont traitera le prochain chapitre.

Chapitre 2

Procédure expérimentale

Tout projet de recherche doit baser ses résultats et leur analyse sur des procédures expérimentales solides. Ce chapitre présente l'ensemble de cette méthodologie ainsi que des informations sur les échantillons testés et le traitement des données expérimentales. Deux tests sont particulièrement importants lors du projet : le test de Bond pour déterminer l'énergie à fournir lors du broyage du minerai et le test de lixiviation pour comprendre l'impact de la dilution opérationnelle et de la taille moyenne des particules sur le rendement de l'étape d'extraction. Les différents éléments abordés seront présentés plus en détails dans les sections suivantes.

2.1 Provenance du matériel de test

Le minerai et les deux types de dilution utilisées proviennent de la mine Westwood exploitée par la corporation Iamgold en Abitibi-Témiscamingue. Pour obtenir des échantillons non contaminés, un géologue de la mine a choisi des secteurs représentatifs du gisement pour faire les prélèvements du minerai et du stérile. Environ 150 kg de minerai et 40 kg de stérile ont été ainsi collectés et envoyés à l'Université Laval. Le minerai fut prélevé à l'aide d'une pioche et de pelle dans le toit d'un chantier avant le dynamitage. Le stérile provient d'une zone non minéralisée à proximité du chantier. Finalement, le remblai a été échantillonné directement à l'usine produisant ce matériau à partir d'additifs et de rejets du concentrateur. La figure 2.1 résume l'emploi de chacune des espèces minérales.

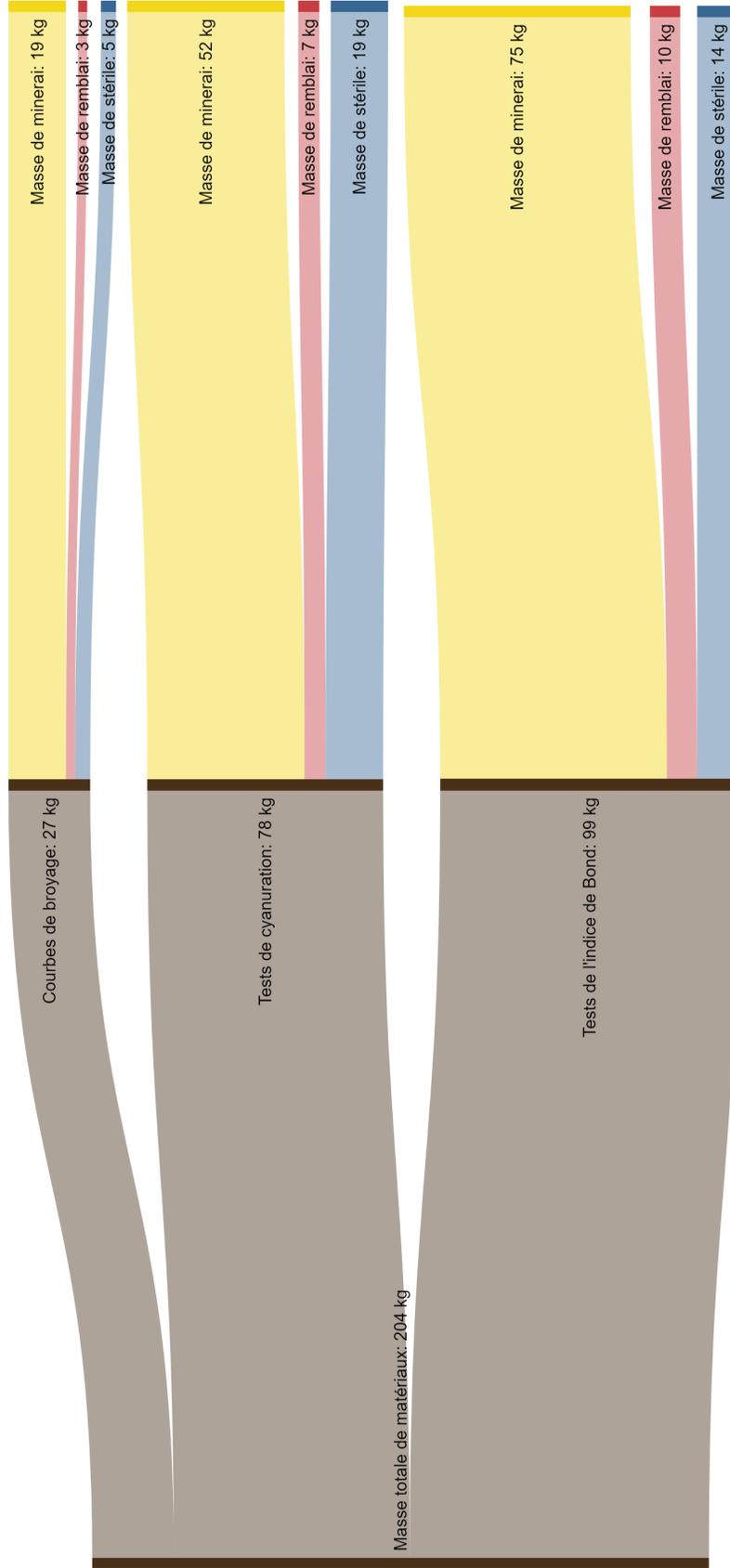


FIGURE 2.1 – Résumé de l'utilisation des matériaux de tests.

2.2 Concassage

Le concassage du matériel provenant de la mine a été fait à l'aide de deux concasseurs à mâchoires suivis d'un concasseur à rouleaux. La procédure consiste à faire passer le matériau granulaire, dont les fragments peuvent aller jusqu'à 15 cm, à une taille maximale de 3380 μm (soit 100% passant un tamis de 6 mailles). Pour ce faire, on alimente le minerai au premier concasseur à mâchoires réglé à une ouverture d'environ 6 cm. la décharge de celui-ci est classifiée manuellement sur un tamis de 6 mailles pour retirer les particules fines. Celles retenues alimentent le second concasseur à mâchoires ayant une ouverture de 1 cm. Le passant est conservé pour les tests de Bond et le retenu est fragmenté par le concasseur à rouleaux possédant une ouverture d'environ 1 mm. Suite à cette étape, ce dernier est encore tamisé à 6 mailles. Le refus est retourné au concasseur à rouleaux jusqu'à ce qu'il ne reste plus de particules plus grossières que la dimension du tamis. La figure 2.2 présente les étapes de concassage.

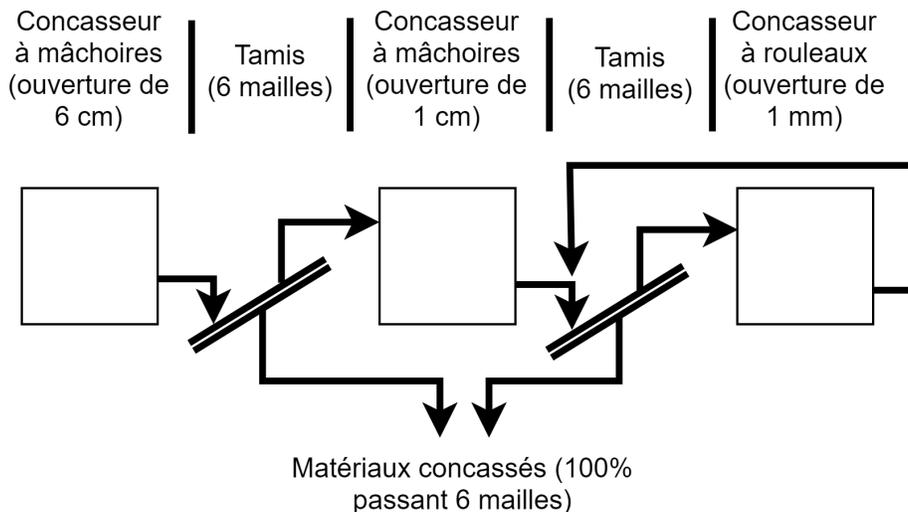


FIGURE 2.2 – Étapes de concassage.

2.3 Test de Bond

2.3.1 Protocole

Pour ces essais, le protocole standard proposé par Bond en 1961 est suivi à la lettre (Bond, 1961). Tout d'abord, la totalité du minerai utilisé doit passer un tamis de 6 mailles et sa dis-

tribution granulométrique doit être connue. De plus, le broyeur et les boulets utilisés doivent respecter certains critères : broyeur cylindrique de 30,5 par 30,5 cm avec les extrémités arrondies, la paroi est lisse avec une porte latérale de 10,2 par 20,3 cm pour le chargement et le déchargement des boulets et du minerai, la vitesse de rotation est de 70 rpm. Finalement, la charge de boulets est d'environ 20125 g.

L'objectif du test est de mesurer la quantité d'énergie requise pour atteindre une charge circulante de 250%. Pour ce faire, dans un cylindre gradué de 1000 ml, on mesure et ensuite pèse 700 ml du mélange minéral. Ce volume est alors introduit dans le broyeur avec la charge de boulets. L'appareil de broyage est mis en marche pour un temps équivalent à 100 tours. Lorsque complété, le minerai est tamisé à l'aide d'un tamis de 140 mailles. Le passant est pesé pour calculer la quantité de fines produites par révolution du broyeur (Gbp) et le retenu (minerai grossier) est retourné au broyeur. La masse dans le broyeur est complétée avec du mélange minéral frais pour atteindre la masse initiale

Les étapes précédentes sont reprises en faisant varier le nombre de tours jusqu'à atteindre une masse passante de 1/3,5 de la masse à broyer. Le test se poursuit jusqu'à ce que la Gbp atteint l'équilibre ou que sa tendance d'augmentation ou de diminution s'inverse.

La quantité moyenne de fines produites par révolution des trois derniers cycles est utilisée pour les calculs. Plusieurs autres données sont aussi nécessaires à la détermination de l'indice de Bond (W_i) : la dimension en micromètres du tamis laissant passer 80% des particules du matériau tant pour l'alimentation (F_{80}) que pour le passant (P_{80}), la taille en micromètres du tamis utilisé (P_1) et finalement la Gbp en g/révolution. La formule utilisée pour calculer le W_i en kWh/t pour les broyeurs à boulets est la suivante :

$$W_i = 0,907 \frac{44,5}{P_1^{0,23} Gbp^{0,82} \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)} \quad (2.1)$$

2.3.2 Planification des expériences

Plusieurs mélanges de minerai et de dilution (stérile et remblai) ont été testés pour l'essai de Bond. Pour maximiser la quantité d'information qu'on dérive de chaque essai, les expériences ont été planifiées de manière factorielle. Ceci consiste à utiliser des niveaux bas, normal et haut de stérile et de remblai et de tester chacune des combinaisons possibles. Les niveaux utilisés correspondent à des pourcentages massiques de 5%, 10% et 15% pour le remblai et

de 10%, 20% et 30% pour le stérile. En tout, neuf tests ont été nécessaires. Pour évaluer la variabilité des tests (la variance des essais), deux répétitions ont été faites au niveau moyen. Le tableau 2.1 résume la planification des tests de Bond.

Tableau 2.1 – Planification des expériences pour le test de Bond

	Nombre de niveaux	Niveaux
Remblai	3	5% / 10% / 15%
Stérile	3	10% / 20% / 30%

2.4 Courbe de broyage

Pour produire les courbes de broyage, 2 kg de matériel sont nécessaires pour chaque test. La procédure à suivre est la suivante. Premièrement, le minerai et 1,2 l d'eau sont introduits dans un broyeur à barres. Celui-ci est alors mis en marche pour une durée de 5 minutes. Lorsque le temps de broyage est complété, la pulpe est retirée du broyeur, séchée et tamisée dans une série de tamis allant de 212 μm (65 mailles) à 38 μm (400 mailles). Après tamisage, les étapes précédentes sont répétées trois autres fois pour obtenir un temps total de broyage de 20 minutes. Le minerai est réutilisé pour chacun de ces tests. Les données obtenues permettent de tracer un graphique reliant le P80 et le temps de broyage. On peut retrouver ces données dans l'annexe A.

2.5 Préparation des échantillons pour la pyroanalyse

Les échantillons envoyés à la pyroanalyse sont préalablement homogénéisés à plusieurs reprises pour éviter tout risque de ségrégation. Le minerai est ensuite divisé à plusieurs reprises avec un séparateur de minerai pour atteindre une masse d'environ 30 g. S'il y a une différence de masse supérieure à 5% entre deux lots séparés, la séparation est recommencée.

Lorsque l'échantillon de 30 g est obtenu, il est pulvérisé pendant environ deux minutes pour atteindre un P80 d'environ 10 μm . La teneur en or de chaque échantillon est déterminée par pyroanalyse au laboratoire de caractérisation du COREM, un consortium québécois de recherche et développement dans le domaine du traitement des minerais.

2.6 Préparation des échantillons pour l'analyse par absorption atomique

La concentration en or dans les échantillons de liquide obtenus lors des essais de cyanuration est évaluée à l'aide d'un appareil d'absorption atomique MP-AES (Microwave Plasma-Atomic Emission Spectrometer). Lors des essais de cyanuration, des échantillons entre 7 et 10 ml sont prélevés à l'aide du système automatique. Leur volume est mesuré pour calculer la quantité d'or retirée du réacteur et ils sont gardés au froid jusqu'à l'analyse par absorption atomique qui nécessite environ 2 ml de solution.

2.7 Cyanuration

2.7.1 Protocole

Pour les expériences de cyanuration, 2 kg de minerai dilué sont fragmentés dans un broyeur à barres pour une durée de temps déterminée à l'aide des courbes de broyage pré-évaluées. La fraction solide utilisée lors du broyage est de 63%. Ensuite, la pulpe est filtrée et séchée à environ 60 °C durant la nuit. Après le séchage, le minerai est homogénéisé et 200 g sont prélevés pour la pyroanalyse. Les 1800 g restants alimenteront l'étape de cyanuration.

Les tests de cyanuration se déroulent à 50% de solides pour une durée de 24 heures. Au début de l'expérience, le pH est ajusté à l'aide de NaOH entre 11,0 et 11,3 selon l'expérience. Cette variation de la consigne du pH d'une expérience à l'autre est due à des problèmes reliés à l'électrode tel que cela est discuté dans la section 3.1.4. La variabilité du pH demeure toutefois sans effet sur la réaction puisque l'ajustement est fait à l'aide de NaOH (Habashi, 1999). Pour le cyanure libre, la concentration visée est de 500 ppm. Cette consigne est ajustée après chaque mesure du cyanure à l'aide d'une solution de NaCN très concentrée.

Durant le test, le cyanure et le pH sont maintenus constants automatiquement. Le pH est ajusté en temps réel et le cyanure aux intervalles de temps suivant : 15, 30, 60, 120, 240, 480, 960, 1440 minutes. Des échantillons de solution sont également pris à ces intervalles de temps pour mesurer la concentration en or dans la solution par absorption atomique.

Après 24 heures de cyanuration, c'est-à-dire lorsque le test est complété, la solution est filtrée et le solide restant est séché et conservé pour la pyroanalyse. Pour chaque test, le minerai

cyanuré et d'alimentation est analysé une seule fois. La variance des mesures est estimée en répétant deux fois l'analyse de l'alimentation et du rejet.

2.7.2 Planification des expériences

À l'origine, la planification des expériences pour la cyanuration devait suivre les mêmes niveaux que ceux utilisés les essais de Bond (section 2.3.2) avec un troisième facteur soit la distribution granulométrique. Des problèmes détaillés dans la section 3.2.2 ont contraint à revoir cette planification.

Les tests de cyanuration sont divisés en deux ensembles de cinq tests chacun. La première série de tests a été effectuée à l'aide d'un mélange de 12,5% de stérile, 7,5% de remblai et 80% de minerai. La seconde série était composée de 100% de minerai.

2.7.3 Traitement post-échantillonnage des données des capteurs

Pour enlever les données aberrantes et lisser les données récoltées des tests de cyanuration, un algorithme régression locale non-paramétrique a été utilisé (MathWorks, 2018). Cet algorithme est communément appelé LOWESS, un acronyme anglais pour « locally weighted scatterplot smoothing ».

Son principe consiste à estimer la position sur l'axe des ordonnées de chaque point de l'ensemble de données à l'aide d'une droite de régression, en se servant d'un certain nombre des points les plus proches du point considéré en leur appliquant une certaine pondération (weight) en fonction de la distance sur l'abscisse entre le point considéré et le point voisin en question.

La fonction de pondération utilisée pour faire les régressions locales est la suivante :

$$w_{i,j} = \left(1 - \left| \frac{x_i - x_j}{d(x)} \right|^3 \right)^3 \quad (2.2)$$

où x_i est le point considéré dans l'ensemble des données, x_j est l'un des plus proche voisin (par exemple, si le nombre de proches voisins est 3, les points évaluées seront x_{i-1}, x_i, x_{i+1}), $d(x)$ est la distance maximale sur l'abscisse entre x_i et x_j et, finalement, $w_{i,j}$ est la pondération du point x_j à appliquer lors de la régression linéaire par la méthode des moindres carrés au point x_i .

La régression linéaire locale pondérée est effectuée en appliquant les pondérations calculées précédemment au calcul de régression par la méthode des moindres carrés pour le point considéré et ses plus proches voisins. La valeur filtrée sur l'axe des ordonnées pour le point considéré x_i est calculée à partir de la droite de régression.

L'algorithme d'ajustement des données recommence les calculs pour tous les points x_i de l'ensemble de données.

La figure 2.3 présente un exemple de l'effet de l'algorithme. L'algorithme de lissage est présenté à l'annexe B

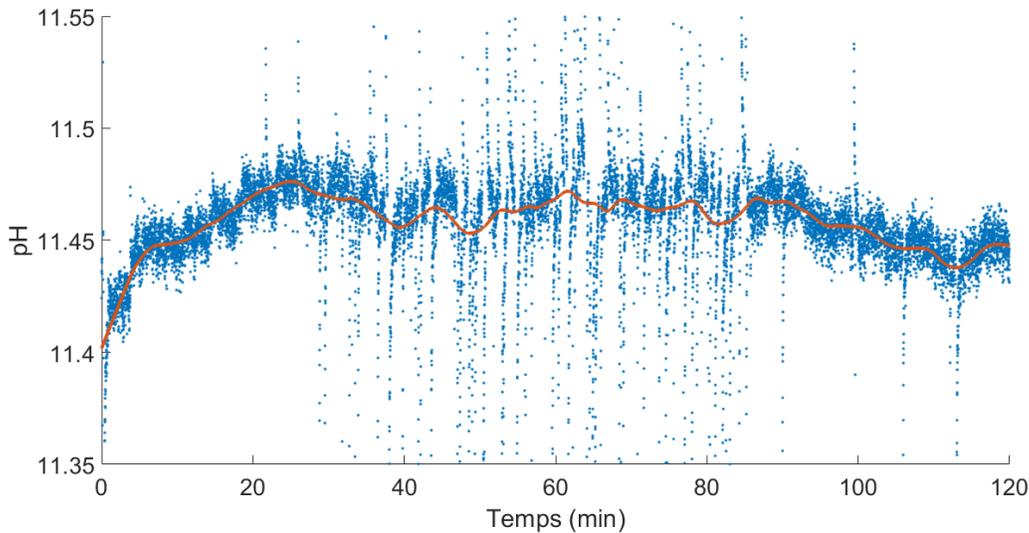


FIGURE 2.3 – Effet de l'algorithme LOWESS sur des données de pH pour un interval de temps de 120 minutes. Les points en bleu sont les données non modifiées et la ligne rouge correspond aux données après ajustement. Les données sont extrêmement variables à certains moments à cause de problèmes reliés à l'électrode pH lors de certains tests.

2.7.4 Réconciliation des données

Les mesures obtenues dans les expériences sont inévitablement entachées d'erreur. Les sources d'erreur sont nombreuses et peuvent provenir de l'appareil de mesure, de la transmission du signal, des fluctuations sur l'alimentation électrique, d'une mauvaise installation d'un appareil de mesure ou d'un mauvais calibrage. Il est possible d'augmenter la robustesse des mesures par réconciliation des données lorsqu'on respect trois critères :

- pouvoir relier les mesures entre elles à l'aide d'un modèle, par exemple un bilan de masse en état stationnaire où la masse à l'entrée est égale à la masse de la même espèce à la

sortie ;

- avoir une redondance de mesures, c'est-à-dire, être en mesure de corréler une variable à partir de plusieurs mesures indépendantes ;
- avoir des erreurs de mesure aléatoires seulement (pas d'erreurs grossières).

Lorsque ces trois critères sont respectés, on utilise une méthode de minimisation des moindres carrés contraints par le modèle. Pour un système en état stationnaire les données réconciliées sont obtenues par l'équation suivante :

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{y} - \mathbf{V}\mathbf{A}'(\mathbf{A}\mathbf{V}\mathbf{A}')^{-1}\mathbf{A}\mathbf{y} \quad (2.3)$$

Où \mathbf{y} est le vecteur des variables mesurées ($M \times 1$) pour M variables mesurées, $\hat{\mathbf{y}}$ est le vecteur ($M \times 1$) des variables réconciliées, \mathbf{V} est la matrice diagonale ($M \times M$) des covariances des mesures et, finalement, \mathbf{A} est appelé la matrice d'incidence ($M \times p$) qui permet de décrire les liens qui relient les variables à chaque nœud p .

La matrice des covariances des données réconciliées est obtenue par l'équation :

$$\text{Cov}(\hat{\mathbf{y}}) = \mathbf{W}\mathbf{V}\mathbf{W}' \quad (2.4)$$

Où \mathbf{W} représente une simplification du terme $\mathbf{I} - \mathbf{V}\mathbf{A}'(\mathbf{A}\mathbf{V}\mathbf{A}')^{-1}\mathbf{A}$ et \mathbf{I} est la matrice identité dans ce dernier terme.

Dans le cadre de ce mémoire, les mesures pour l'or et pour le cyanure ont été réconciliées. Dans le cas de l'or, il y a de la redondance dans les données de sorte qu'il est possible d'utiliser l'équation 2.3 pour minimiser le bilan de masse suivant :

$$m_{Au,s}(0) - m_{Au,s}(n) - m_{Au,l}(n) = 0 \quad (2.5)$$

où les variables représentent la masse d'or présente dans le minerai (s) et dans la solution (l) au début de l'expérience (0) et à la fin de la même (n). A priori, il n'y a pas d'or initialement en solution et ce terme n'est donc pas tenu en compte dans l'équation 2.5.

La réconciliation des mesures du cyanure est un peu plus complexe, car le taux de variation du cyanure (masse/minute) ne peut pas être mesurée et le système n'est pas à l'état stationnaire :

$$\frac{dm_{CN}}{dt} = D_{CN,ajout} - D_{CN,conso} \quad (2.6)$$

En considérant des points de mesures ponctuels dans le temps et en supposant que les ajouts et la consommation sont les seules sources pouvant faire varier la masse de cyanure, on peut ramener le système dynamique précédent à une équation de bilan stationnaire de masses :

$$m_{CN}(n-1) - m_{CN}(n) + \sum_{i=n-1}^n (m_{CN,ajout}(i) - m_{CN,conso}(i)) = 0 \quad (2.7)$$

où les masses de cyanure (m_{CN}) au temps $n-1$ et n sont mesurées, la masse de cyanure ajoutée dans l'intervalle de temps ($m_{CN,ajout}$) entre $n-1$ et n est également connue et, finalement, la masse de cyanure consommée ($m_{CN,conso}$) dans l'intervalle de temps entre $n-1$ et n n'est pas connue mais peut être calculée à l'aide des autres données connues. Pour s'assurer que ce dernier calcul n'apporte pas de covariance pour la variable, l'indépendance statistique entre les variables mesurées est vérifiée à l'annexe C.

En pratique, les données disponibles ne permettaient pas d'avoir de la redondance. Pour remédier à ce manque d'information, on a utilisé une méthode de réconciliation de données en régime stationnaire basée sur la moyenne d'un paramètre (Bagajewicz et Jiang, 2000). Cette méthode de réconciliation est basée sur le principe statistique que, pour des expériences répétées normalement distribuées et indépendantes de moyenne μ et d'écart-type σ ($N(\mu, \sigma)$), la moyenne des mesures d'un paramètre est un meilleur estimateur de sa vraie valeur qu'un point individuel. Cette dernière moyenne suivra une distribution $N(\mu, \sigma/\sqrt{n})$ pour n expériences.

Pour garder l'unicité de chaque test et pour respecter l'écart-type des lectures et des points moyens une méthode de réconciliation prédicteur-correcteur a été utilisée pour corriger les données calculées à un modèle de la moyenne des taux de consommation (Bai et al., 2005). Une courbe exponentielle modélise les points jusqu'à un temps de 240 minutes où le taux de consommation de cyanure se stabilise à environ 0,1 mg/min comme on peut le voir dans figure 2.4. L'équation suivante permet d'ajuster les données du taux de consommation du cyanure au modèle (Bai et al., 2005) :

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{y}_{\text{modèle}} + (\mathbf{I} + \mathbf{V}\mathbf{R}^{-1})^{-1}(\mathbf{y} - \mathbf{y}_{\text{modèle}}) \quad (2.8)$$

Où $\hat{\mathbf{x}}$ sont les mesures ajustées du taux consommation du cyanure (vecteur $M \times 1$), $\mathbf{y}_{\text{modèle}}$ sont les données du modèle (vecteur $M \times 1$), \mathbf{y} sont les valeurs calculées de la consommation par minute (vecteur $M \times 1$), \mathbf{R} est la matrice de covariance du modèle ($M \times M$) et \mathbf{V} est la matrice de covariance des mesures ($M \times M$).

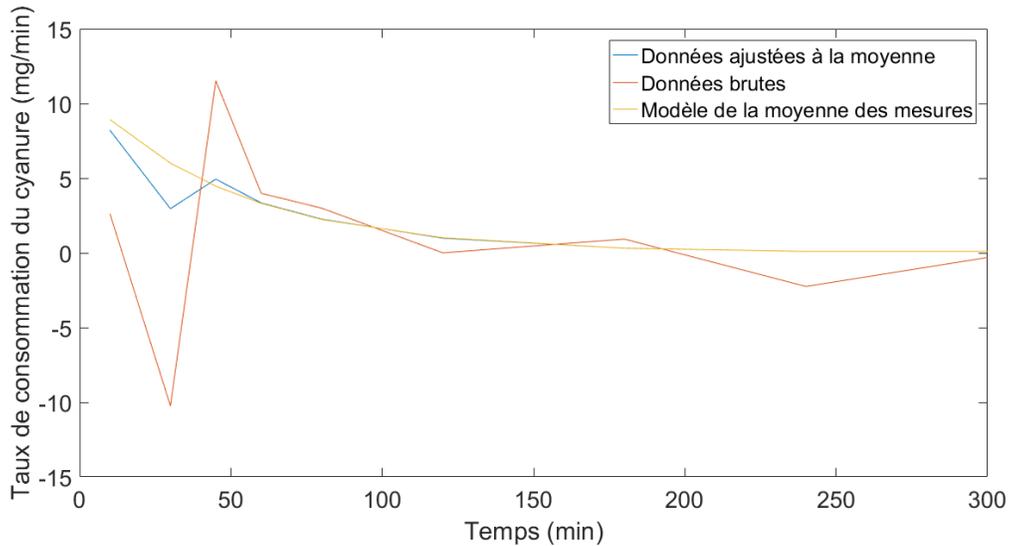


FIGURE 2.4 – Taux de consommation du cyanure en fonction du temps pour une expérience

Après réconciliation des taux de consommation du cyanure, l'ensemble de données (quantité de cyanure précédente et présente, taux de consommation et ajout de cyanure) est réconcilié à l'aide de l'équation 2.3 en respectant la matrice d'incidence présentée par la figure 2.5. Les algorithmes pour la réconciliation de l'or et du cyanure sont présentés dans l'annexe D

2.8 Conclusion

Ce chapitre a établi la méthodologie et les processus de traitement des données propres au projet. Deux ensembles d'essais sont particulièrement importants pour le projet : la quantification de l'indice de Bond et les tests de cyanuration. Pour chacun de ces tests, plusieurs niveaux de remblai, stérile et minéral ont été expérimentés pour comprendre l'impact de la dilution opérationnelle lors du broyage et de la cyanuration. Lors des cyanurations, 2 niveaux de taille moyenne de particule permettent de simuler l'aide du montage automatisé une aug-

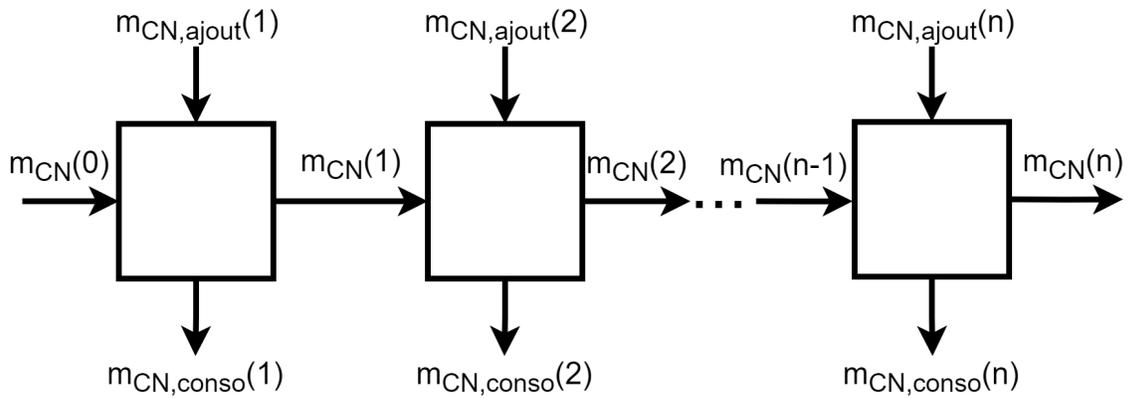


FIGURE 2.5 – Schématisation de la matrice d'incidence pour la réconciliation du cyanure.

mentation du débit massique d'alimentation. Le prochain chapitre portera notamment sur la conception du montage automatisé et sur les essais préliminaires.

Chapitre 3

Montage et essais préliminaires

La conception du montage représente un des grands défis du projet. Ce chapitre détaille les différents éléments composant le montage automatisé :

- le réacteur,
- la mesure du cyanure libre,
- l'échantillonnage,
- le programme d'acquisition de données,
- les instruments de mesures,
- l'ajout de réactif.

En plus du montage, les essais préliminaires accomplis pour l'essai de Bond et la lixiviation sont présentés avec certains résultats et une discussion sur les difficultés rencontrées et les améliorations apportées.

3.1 Montage

Pour faciliter l'acquisition d'une grande quantité de données, obtenir un meilleur contrôle du procédé et prendre des échantillons à des intervalles plus courts et de manière autonome hors des heures normales d'activité, un montage automatisé a été conçu en s'inspirant des travaux de Bissonnette (1987) et de Ling et al. (1996).

Le montage a été conçu pour contrôler le pH et la concentration en cyanure ainsi que pour permettre l'acquisition automatisée des données. Le microcontrôleur USB-6002 de National

Instruments a été choisi pour faire l'intermédiaire entre les différentes sondes et appareils de mesure, les différents actionneurs et l'ordinateur. L'ensemble des calculs et du suivi de l'expérience est fait à partir d'un programme développé à l'aide du langage de programmation et de l'interface Labview. Les détails de ce programme sont présentés dans la section 3.1.2. Les sous-sections suivantes présenteront tous les détails du fonctionnement du montage, les sources d'erreur des appareils de mesure, les possibilités d'amélioration et les difficultés rencontrées.

3.1.1 Fonctionnement

La figure 3.1 présente le diagramme de fonctionnement simplifié du montage expérimental. Celui-ci peut être schématisé en trois éléments principaux : un réacteur de trois litres de capacité où se déroule la réaction et dans lequel le pH et la température sont mesurés, le système d'échantillonnage pour la mesure de la concentration en cyanure et finalement, le système d'ajout du cyanure et du NaOH. La figure 3.2 est une schématisation du montage avec plus de détail sur les différents flux et composantes.

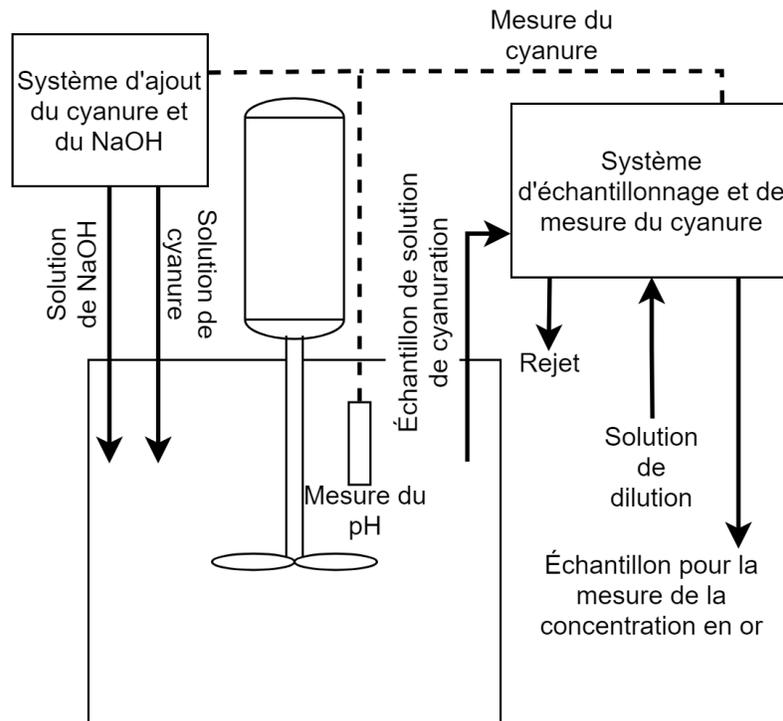


FIGURE 3.1 – Schéma simplifié du montage expérimental. Les flèches pleines correspondent aux flux de liquide ou de gaz et les lignes pointillées aux signaux électriques.

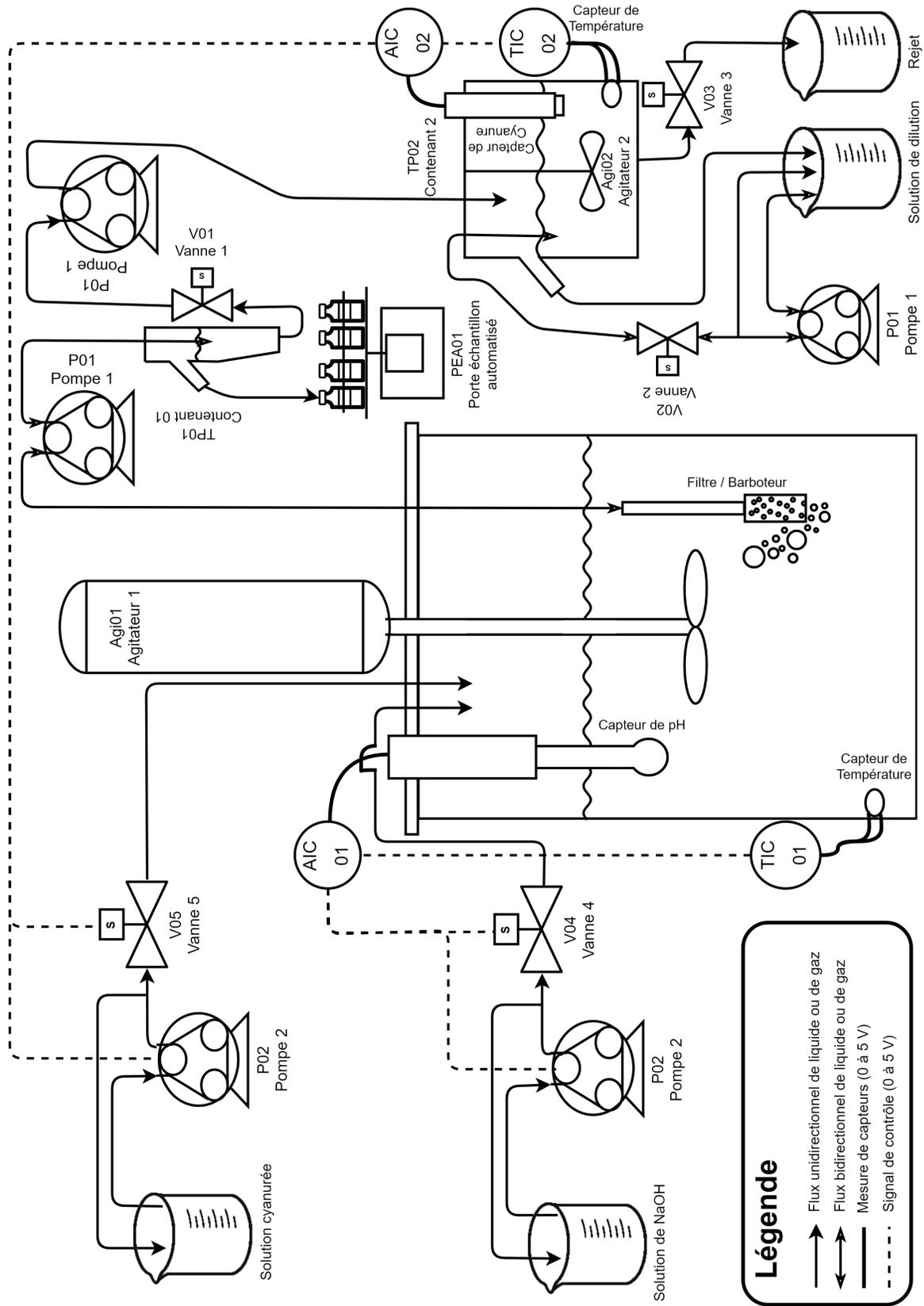


FIGURE 3.2 – Diagramme de fonctionnement du montage automatisé.

Réacteur

Le réacteur expérimental a été fabriqué à partir d'un cylindre d'acrylique de 15,2 cm de diamètre et 45 cm de hauteur. La base et le couvercle sont également faits en acrylique d'une épaisseur de 2,5 cm et 1,25 cm respectivement. Ce matériau résiste bien aux solutions basiques et il est relativement facile à assembler et usiner. Le réacteur, conçu pour manipuler des lots de 2 kg de minerai, est présenté à la figure 3.3

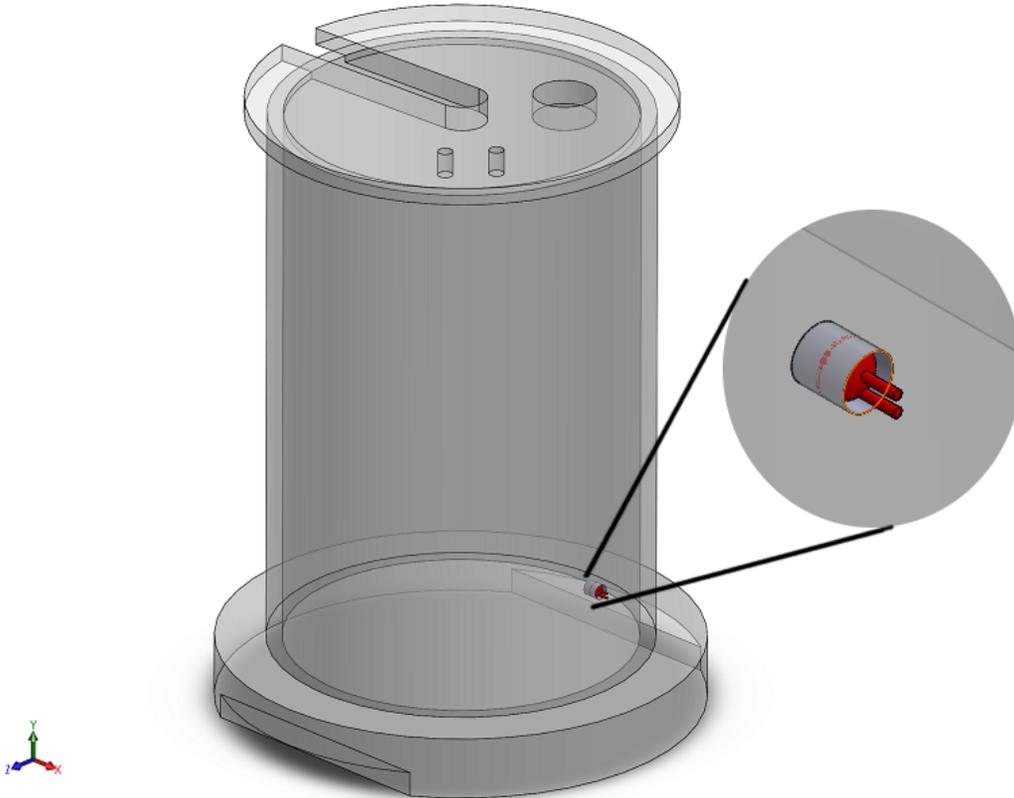


FIGURE 3.3 – Réacteur de cyanuration. On retrouve dans le haut le couvercle avec les orifices pour les tuyaux, le pH-mètre, l'agitation et le barboteur/filtre. Dans le bas de la paroi, on peut voir en rouge l'emplacement de la thermistance.

On retrouve plusieurs ouvertures dans le couvercle du réacteur :

- deux trous d'environ 1,6 mm sont situés au $2/3$ du rayon pour permettre d'insérer les deux tuyaux d'alimentation de réactifs, un pour l'ajout de solution du cyanure et l'autre pour l'ajout de solution de NaOH pour le contrôle du pH ;
- un trou au centre du couvercle pour permettre d'insérer la tige de l'agitateur ;

- une fente faisant tout le rayon du couvercle permettant de le retirer sans avoir à enlever l'agitateur à chaque fois ;
- une ouverture permettant d'insérer la sonde de pH.

Une thermistance est installée dans la partie inférieure du réacteur pour permettre la mesure de la température et l'ajustement de la mesure du pH en conséquence. Cette thermistance est glissée à travers la paroi par d'un trou percé dans le bas du réacteur. De la colle de polyépoxydes (époxy) a été utilisée pour reboucher l'ouverture.

Pour favoriser la suspension des particules durant les essais, une chicane représentée à la figure 3.4 peut être insérée à l'intérieur du réacteur. Cette chicane est faite à partir de latte d'acrylique. Une des languettes est mise en forme en la chauffant pour lui donner une forme circulaire possédant un diamètre légèrement supérieur au diamètre intérieur du réacteur. Lorsqu'elle est placée dans le réacteur, celle-ci est comprimée par la paroi, ce qui l'empêche de bouger lorsque l'agitation est en marche. Fixées perpendiculairement sur la languette circulaire, on trouve deux autres lattes d'acrylique d'une largeur de 5 cm qui font toute la hauteur du réacteur et qui font office d'obstacle à la pulpe lors de l'agitation et brisent l'écoulement laminaire. Ces dernières étaient à l'origine fixées avec de la colle époxy. Cependant, les joints ne résistaient pas à l'abrasion par les particules et à l'alcalinité de la solution. Un mélange de chloroforme et d'acrylique solubilisé s'est révélé une solution beaucoup plus durable.

Principe du système de mesure du cyanure libre

Le système de mesure de cyanure est un système assez complexe qui demande la dilution de la solution cyanurée avant l'analyse. En effet, les électrodes de cyanure sont conçues pour l'analyse de solution ayant moins de 50 ppm de cyanure libre. Autrement, la durée de vie de l'électrode et la qualité de la lecture en sont affectées.

Puisque la concentration en cyanure lors de l'expérience se situe à environ 500 ppm, la dilution de la solution cyanurée par un facteur 10 est une contrainte minimale à atteindre. Pour ce faire, deux volumes précis sont mesurés. Dans le système actuel, le volume de solution est de 2,1 ml et le volume de dilution (pH 11) est de 47 ml.

Pour obtenir ces volumes, le principe est le même pour la solution cyanurée et pour la solution de dilution. La solution à mesurer est pompée dans le contenant qui dispose d'une vanne

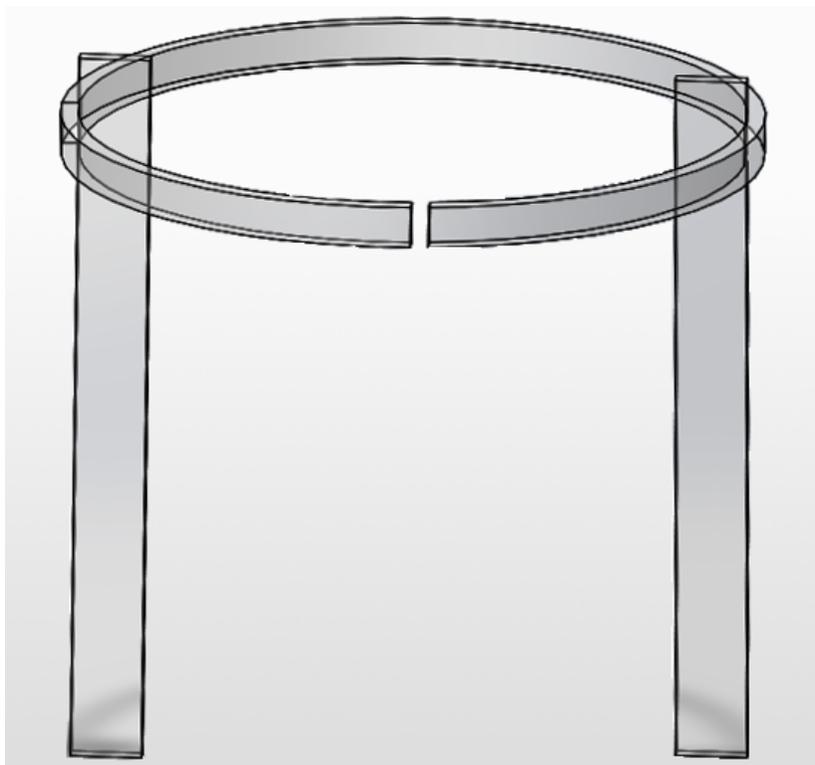


FIGURE 3.4 – Chicane pour aider à la suspension des particules.

solénoïde au fond pour le transfert de la solution lorsque le volume désiré a été atteint. Un tuyau d'alimentation se situe à mi-hauteur. La position verticale de ce tuyau est ajustable et elle peut être modifiée pour obtenir un volume différent. Les solutions sont pompées par des pompes péristaltiques jusqu'à ce que le niveau de solution dans le récipient dépasse celui du tuyau. Lorsque cette condition est atteinte, les pompes fonctionnent dans le sens inverse vidant l'excédent du contenant. Cette technique a permis d'obtenir une précision sur les volumes de $\pm 2,5\%$.

Lorsque le volume requis de solution provenant du réacteur est obtenu, la vanne s'ouvre et la solution est pompée vers la solution de dilution où l'analyse se produit. Les étapes plus détaillées sont présentées dans la sous-section suivante nommée "étapes de la mesure du cyanure".

Filtration de la pulpe et aération

La filtration de la pulpe a été faite à l'aide d'un barboteur d'aquarium en carbure de silicium. Bien que sa fonction première ne soit pas la filtration, le barboteur a été très efficace pour

obtenir une solution claire tel que requise pour l'analyse du cyanure et la détermination de la concentration en or. Lorsque l'analyse n'est pas en cours, le barboteur est utilisé pour l'aération du réacteur et maintenir un bon niveau d'oxygène en solution.

Échantillonnage

L'échantillonnage pour l'analyse en or de la solution est aussi fait de façon automatique. Lors du remplissage du récipient pour la mesure du volume de solution cyanurée, un trop-plein permet d'acheminer la solution vers le porte-échantillons. Ce dernier comporte 6 emplacements pour des bouteilles où la solution est conservée. Le porte-échantillons est muni d'un moteur pas à pas (stepper motor) qui permet contrôler la position et de bloquer le porte-échantillons à des positions précises. On peut voir une représentation du porte-échantillons à la figure 3.5

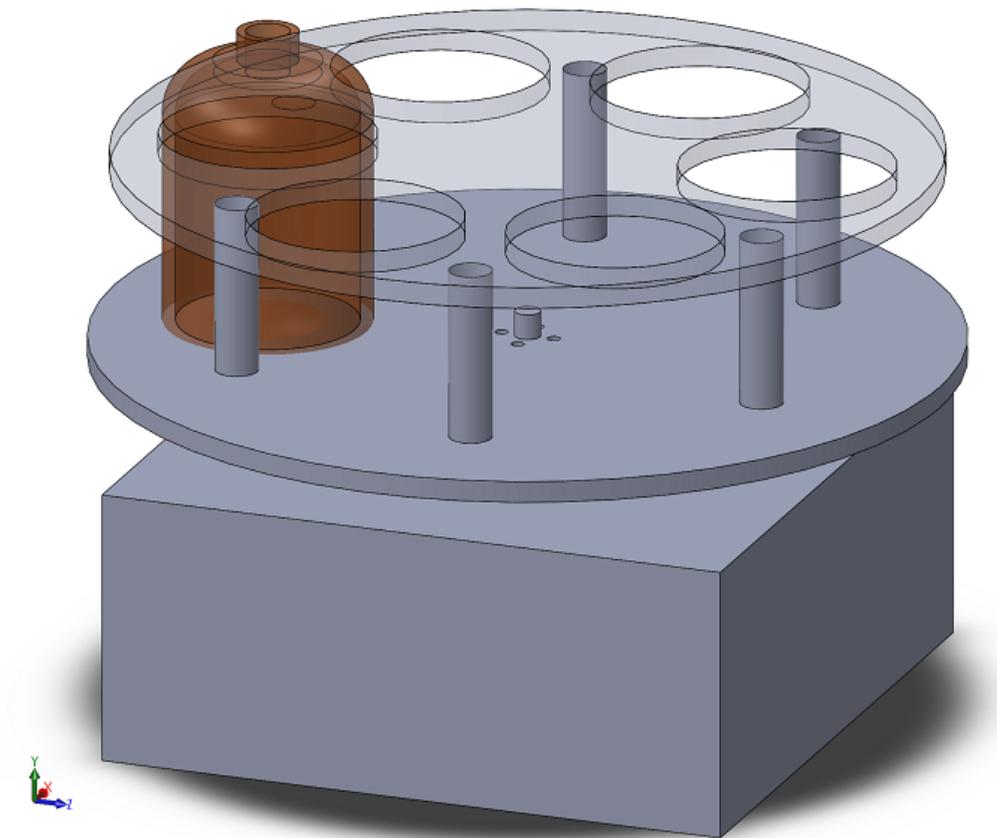


FIGURE 3.5 – Porte-échantillons rotatif.

Étapes de la mesure du cyanure

Le principe de la mesure du cyanure est assez simple sur papier, mais il devient complexe en pratique et demande de nombreuses étapes en raison du type d'équipement utilisé et des contraintes d'opération. En effet, le détecteur pour la mesure du cyanure a des limites d'opération qui sont présentées sommairement dans la sous-section 3.1.1.

En plus du détecteur, la pompe péristaltique constitue également une contrainte majeure de la conception du système expérimental car elle possède un seul axe avec plusieurs têtes. Cela permet de pomper plusieurs flux dépendant l'un de l'autre en parallèle. Cependant, pour avoir des flux indépendants, 3 vannes ont dû être ajoutées au système. Le système complet est schématisé dans la figure 3.6.

En tout, 10 étapes sont nécessaires à la prise d'échantillons et à la mesure du cyanure libre. Ces étapes sont présentées au tableau 3.1. L'étape d'aération du réacteur reste en vigueur tout au long de l'expérience, sauf lors des échantillonnages. Chaque étape a une durée déterminée et le temps total de la séquence est d'environ 10 minutes. Le pompage de l'échantillon prend 2 à 5 minutes, l'analyse 1 à 2 minutes et finalement le nettoyage, 4 à 7 minutes.

Tableau 3.1 – Étapes pour la séquence de mesurage du cyanure libre

	Fonction
Étape 0	
—	Aération du réacteur expérimental, la pompe P01-1 fonctionne dans le sens antihoraire transférant de l'air du barboteur au réacteur.
—	Remplissage du contenant TP02, la pompe P01-3 fonctionne dans le sens horaire et la vanne V02 est en position ouverte ce qui permet le remplissage de TP02 par la solution de dilution. Lorsque le niveau de solution dans TP02 atteint la hauteur du trop-plein, la solution retourne par gravité dans le bécher de solution de dilution. À cette étape, la vanne V03 est en position fermée.
—	La pompe P01-2 tourne en direction horaire et la vanne V01 est en position ouverte à cette étape. Il se produit un transfert d'air vers le contenant TP02 qui n'a pas d'impact particulier

- Cette étape demeure active pour l'ensemble de la période expérimentale sauf lors de la séquence d'échantillonnage et d'analyse du cyanure libre.

Étape 1

- Initialisation de la séquence d'échantillonnage. Rotation de PEA01 de 60° pour laisser la place à une bouteille vide.
- Mise en marche de la pompe P01-1 en direction horaire et fermeture de la vanne V01. La solution du réacteur est transférée via la filtre vers le contenant TP01. Un agglomérat de particules minérales se forme au niveau du filtre aidant la filtration. Cet agglomérat est brisé lorsque la direction de la pompe est inversée pour transférer de la solution ou par le passage de l'air vers le réacteur.
- Accumulation de la solution expérimentale dans le contenant TP01 jusqu'à atteindre le détecteur LC-01, moment où deux scénarios sont possibles : arrêt du remplissage, dans le cas où seulement la mesure du cyanure est faite ou continuation de la séquence pour un certain temps permettant le débordement du trop-plein de TP01 dans une bouteille de PEA01, dans le cas de la prise d'un échantillon pour l'analyse de la concentration en or (7-10 ml).
- Transfert de la solution de dilution de TP02 vers le béccher à l'aide de la pompe P01-3 fonctionnant en sens antihoraire. La vanne V02 est en position ouverte et la V03 est en position fermée. Le niveau de solution dans TP02 va s'arrêter à la pointe de l'aiguille (voir schéma 3.6) pour un volume d'environ 50 ml.
- L'étape 1 peut durer entre 2 et 4 minutes.

Étape 2

- Mise à niveau du TP01 : la pompe P01-1 fonctionne en sens antihoraire pour transférer la solution vers le réacteur. Le niveau dans TP01 atteindra la pointe de l'aiguille ce qui représente un volume d'environ 2 ml. La hauteur de l'aiguille peut être variée pour changer le volume de solution.
- La pompe P01-3 fonctionne en sens horaire. Pour éviter de transférer la solution de dilution, la vanne V02 est en position fermée.
- Cette étape dure 30 s.

Étape 3

- Transfert de la solution expérimentale de TP01 vers TP02. Après l'ouverture de la vanne V01, la pompe P01-2 démarre dans le sens horaire pour faire le transfert de la solution.
- La pompe P01-3 fonctionne dans le sens horaire à cette étape. Pour éviter le transfert de la solution de dilution vers le TP02, la vanne V02 est à l'état fermée. La boucle de recirculation permet d'éviter la surpression.
- Cette étape dure 20 s.

Étape 4

- Analyse de la solution dans le contenant TP02. La pompe P01 est mise à l'arrêt après le transfert de la solution expérimentale.
- L'étape dure entre 20 secondes et plus d'une minute. L'étape 4 se termine si la mesure du cyanure est constante ou bien si le temps écoulé dépasse deux minutes.

Étape 5

- Vidange du contenant d'analyse TP02 par l'ouverture de la vanne V03. L'écoulement de la solution se fait par gravité.
- Après 45 s, le réservoir TP02 est vidé.

Étape 6

- Remplissage du contenant d'analyse avec de la solution de dilution pour permettre le nettoyage de TP02.
- Après 40 secondes, la pompe P01 est arrêtée et la vanne V03 est ouverte pour un premier nettoyage de TP02
- L'étape prend environ 90 secondes.

Étape 7

- Remplissage du contenant d'analyse avec de la solution de dilution pour le nettoyage de TP02 et du tuyau entre TP01 et TP02. La pompe P01-3 fonctionne dans le sens horaire pour remplir TP02. Après 45 secondes, la pompe est arrêté. Le niveau de liquide dans le contenant TP02 dépasse l'aiguille sans atteindre le trop-plein.

Étape 8

- La pompe P01-2 est mise en marche dans le sens antihoraire pour transférer une certaine partie de la solution de dilution vers TP01. Parallèlement, la pompe P01-1 fonctionne dans le sens horaire, pompant la solution expérimentale vers le contenant TP01 ce qui limite beaucoup le nettoyage.
- Cette étape dure environ 20 secondes.

Étape 9

- La solution de nettoyage se trouvant dans le tuyau entre TP01 et TP02 est retournée vers TP02 en faisant fonctionner la pompe P01-2 dans le sens horaire. Par le fait même, la solution expérimentale pompée par P01-1, mais se trouvant toujours dans le tuyau, est retournée dans le réacteur expérimental.
- La durée est la même que celle à l'étape 8

Étape 10

- Vidange de la solution se trouvant dans TP02 par l'ouverture de la vanne V03.
 - Après cette étape, qui prend environ 45 secondes, la séquence d'échantillonnage se termine et la procédure retourne à l'étape 0 jusqu'à la prochaine analyse.
-

3.1.2 Logiciel d'acquisition de données

Un programme développé à partir de l'environnement Labview permet d'effectuer l'acquisition de données à partir de l'ordinateur. Ainsi on assure le suivi de l'expérience et on permet aussi la sauvegarde des données ainsi que de l'établissement des consignes et des paramètres pour le contrôle de l'expérience. Dans cette sous-section, le programme et le logiciel sont présentés de façon à permettre à un utilisateur ultérieur de pouvoir continuer le développement du programme. Par contre, les informations ici présentées se limiteront aux grandes lignes du fonctionnement et de l'architecture du programme pour faciliter la navigation lors d'une éventuelle modification de celui-ci.

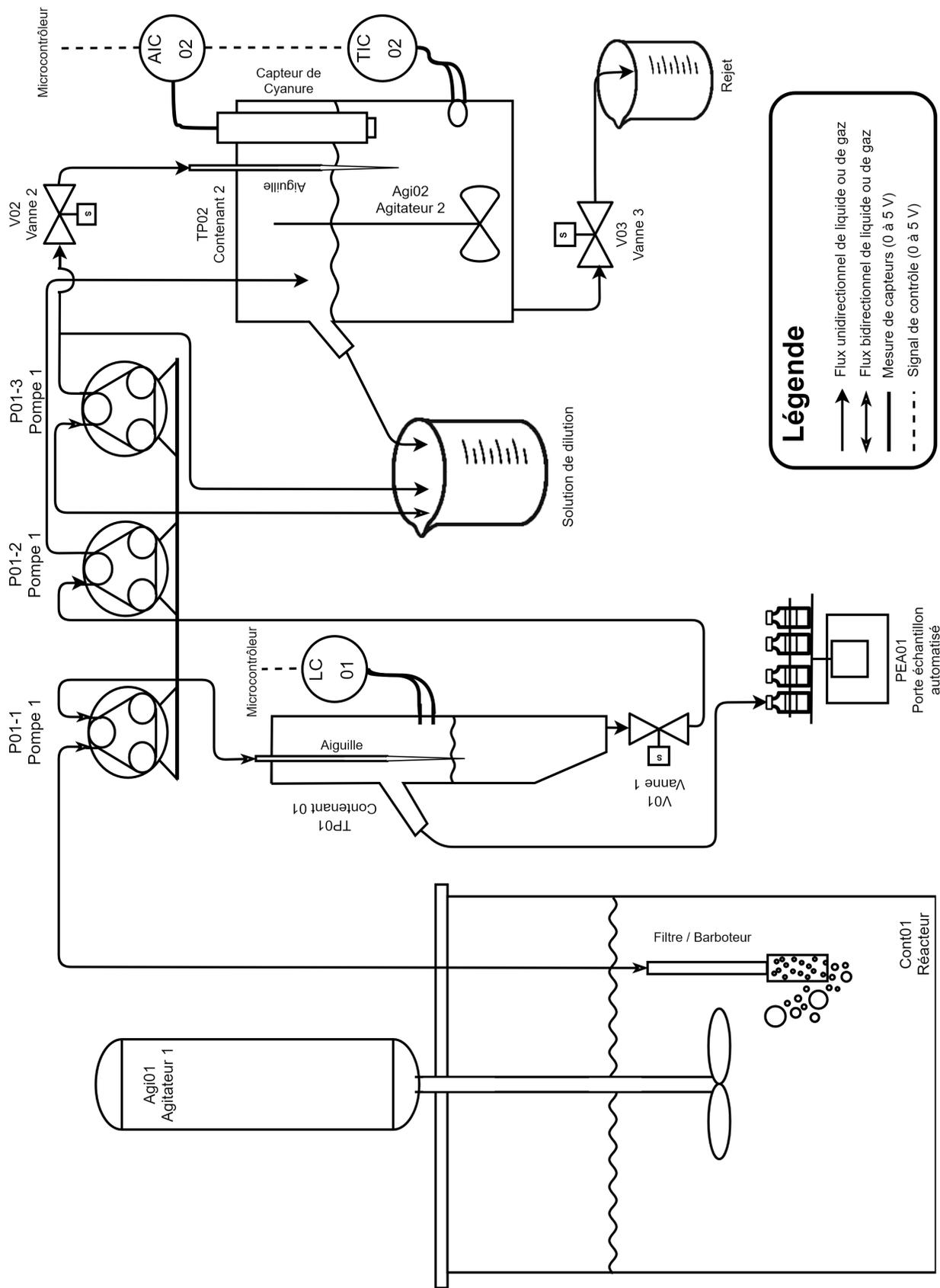


FIGURE 3.6 – Système d'analyse de la concentration en cyanure libre et de prise d'échantillons

Fonctionnalité

Le programme d'automatisation comporte de nombreuses fonctionnalités pour permettre le suivi de l'expérience et de vérifier le fonctionnement correct de certains équipements tels que les vannes, les pompes et capteurs. L'écran principal du programme d'automatisation de l'expérience de cyanuration est présenté dans la figure 3.7. On y retrouve les différentes mesures faites lors des tests, le moment du début de l'expérience et celui de la fin, le temps avant le prochain échantillonnage, l'heure actuelle, un diagramme montrant les différentes composantes en action (pompes et vannes) et les appareils de mesure présentement branchés, le contrôle individuel des actionneurs et finalement des graphiques temporels des différentes mesures. Les autres onglets importants du programme sont aussi accessibles à partir de cet écran.

En plus de l'écran principal, trois autres fenêtres sont aussi accessibles : la fenêtre de configuration, la fenêtre pour le calibrage et finalement, une fenêtre pour le réglage des minuteries (appelé « timing ») durant la mesure du cyanure libre et lors de la prise d'échantillons. Dans la fenêtre de configuration on retrouve les paramètres les plus importants de l'expérience : le moment de chaque échantillonnage et mesure du cyanure, le temps total du test, la consigne de pH et du cyanure, des variables pour le ratio de dilution lors de l'analyse du cyanure, la masse de solide lors de l'expérience, le débit d'ajout de la solution de pH et de cyanure et la concentration du cyanure en solution. Toute cette configuration peut être sauvegardée dans un fichier de données (ConfigurationFile.ini).

Comme son nom l'indique, la fenêtre de calibrage permet l'étalonnage des instruments de mesure (thermistances, pH-mètre, électrode de potentiel d'oxydoréduction pour le cyanure). Dans le cas du calibrage des thermistances, un seul point de mesure est suffisant où l'ordonnée à l'origine de la droite est modifié contrairement à la pente de la droite. Deux points demeurent préférables pour un meilleur ajustement. Pour les électrodes, deux points sont nécessaires ainsi que la température de la solution. Une nouvelle pente et une nouvelle ordonnée à l'origine sont alors déterminées. Les paramètres des courbes peuvent également être changés de façon manuelle.

Finalement, la section « timing » permet de modifier la durée des différentes étapes lors de l'échantillonnage et la mesure du cyanure. La longueur des tuyaux, la distribution granulo-

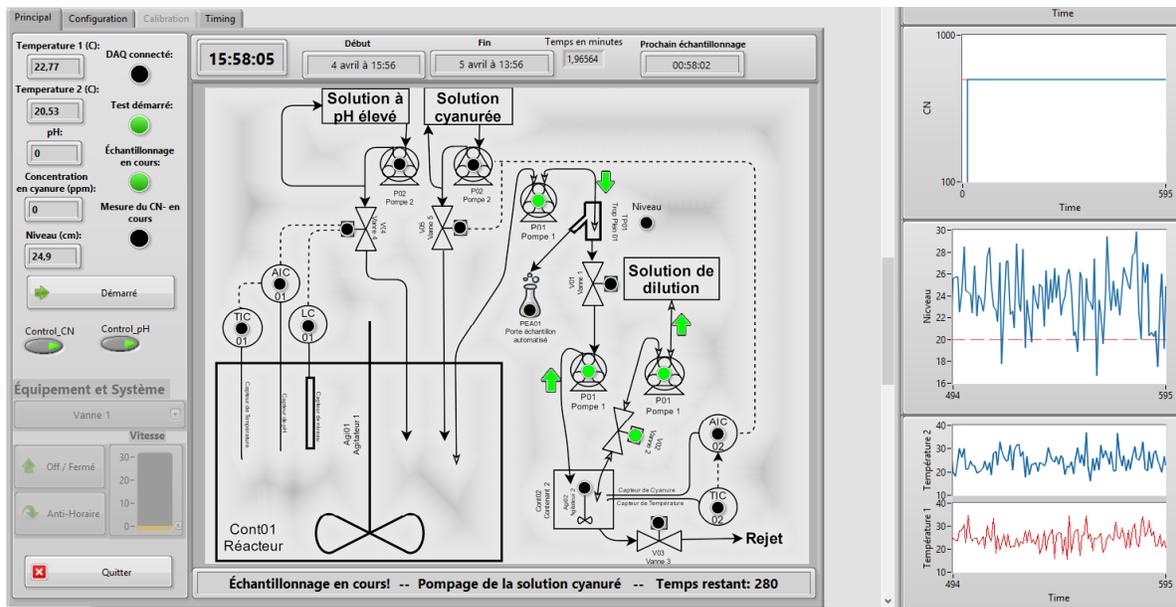


FIGURE 3.7 – Écran principal du programme d'automatisation

métrique du minerai, l'agitation et certains autres facteurs peuvent venir influencer la durée de chaque étape. Une partie de cette variabilité est corrigée à l'aide d'un détecteur de liquide positionné dans le contenant pour la mesure du volume de solution expérimentale.

Fonctionnement

Le programme est constitué d'une séquence d'initialisation suivis de trois boucles principales en parallèle présentée dans la figure 3.8.

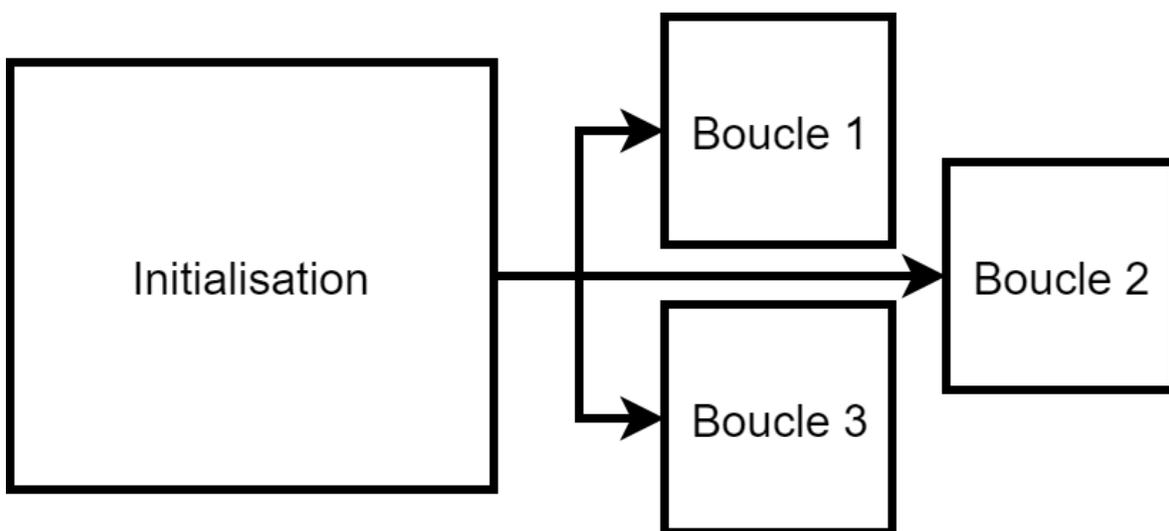


FIGURE 3.8 – Programme simplifié d'automatisation.

L'initialisation permet de s'assurer que chaque variable importante est réinitialisée et garantie la désactivation des vannes et pompes si le programme avait été mal fermé précédemment. Lors de cette étape, les valeurs par défaut de consignes et de calibrage sont également remplacées par celles du fichier de configuration.

Suite à l'initialisation, chacune des boucles en parallèle a des tâches propres. Deux permettent de gérer toute l'information provenant de l'expérience, de décider des actions de contrôle et de communiquer avec le microcontrôleur, tandis que la troisième permet de suivre les interactions avec l'interface graphique et de faire des actions lorsqu'un bouton est pressé (automate avec un nombre fini d'états).

Plus spécifiquement, les tâches de chaque éléments du programme sont les suivantes :

Initialisation

- Initialisation des consignes de contrôle, paramètre de calibrage, temps des étapes d'échantillonnage (fichier : ConfigurationFile.ini).
- Association des positions des ports entrée/sortie (IO - « Input/Output ») et les ports analogiques (AO) du microcontrôleur avec des valeurs définies dans le programme.
- Initialisation des fenêtres et éléments graphiques du programme.

Boucle 1

- Contrôle de l'expérience.
- Contrôle du pH.
- Contrôle de la concentration en cyanure libre.
- Séquence d'échantillonnage et de mesure du CN^- .

Boucle 2

- Automate avec un nombre fini d'états.
- Contrôle les interactions avec l'interface.
- Démarrage de l'expérience.
- Changement de paramètres.
- Ajustement du calibrage des détecteurs.
- Test de l'équipement.

Boucle 3

- Communication avec le microcontrôleur.
- Acquisition de données.
- Transformation des mesures en volt vers des unités d'ingénierie.
- Sauvegarde des données vers un fichier *.xlsx.
- Sauvegarde de certaines valeurs de programmation vers un fichier (suivis du programme).
- Affichage d'informations dans le programme.
- Vérification de l'état du système d'acquisition de données et de certains détecteurs (branché/débranché).

Avantages et désavantages de Labview

Le langage et environnement de programmation Labview comporte de nombreux avantages et inconvénients. Contrairement à la programmation écrite traditionnelle (exemple : Python, C++, Java), les éléments du programme sont produits dans une interface graphique sous forme de boîtes, valeurs numériques, valeurs booléennes, variables et liens reliant les différents éléments du programme tel qu'illustré à la figure 3.9. Labview est donc très visuel et permet de produire des programmes assez complexes.

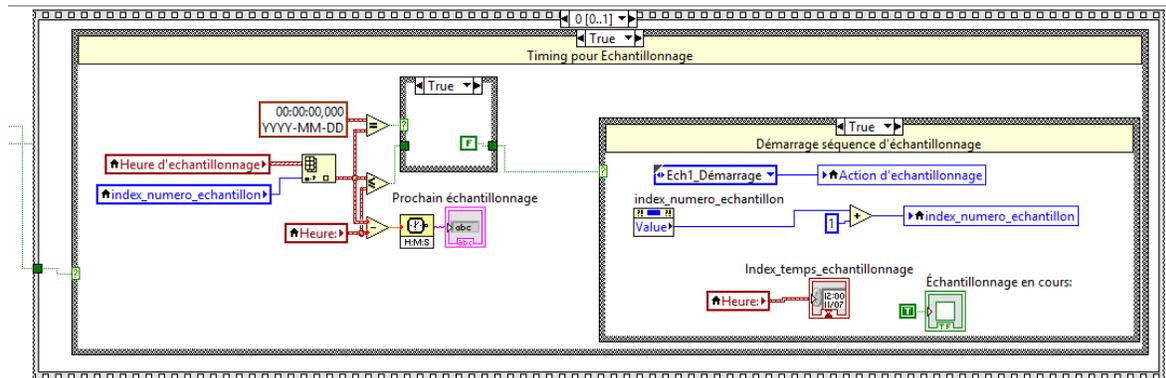


FIGURE 3.9 – Exemple de programmation avec Labview.

Ce langage est très avantageux lorsqu'on a peu de connaissances en programmation. Effectivement, le développement d'interface (boutons, graphiques, tableaux, etc.) est simplifié dans le logiciel ce qui permet de se concentrer sur le contenu plutôt que le contenant. De plus, comme il a été développé pour faire aussi de l'acquisition de données, la communication entre l'ordinateur et le microcontrôleur est relativement facile.

Finalement, un dernier point positif concernant le langage Labview est le fait que beaucoup d'information est disponible en ligne ce qui facilite grandement la solution de problèmes de programmation, un aspect important lorsqu'on débute avec un nouveau langage. Le site internet de National Instruments est assez complet et a permis de répondre à la plupart des questions survenues durant la conception du programme.

L'utilisation de Labview comporte également certains inconvénient. Premièrement, le langage est très fonctionnel lorsque le programme est restreint. Par contre, plus celui-ci prend de l'ampleur plus il devient compliqué de s'y retrouver car le programme prend un grand espace dans la fenêtre de programmation et le nombre de variables et de lignes connectant les différents éléments rendent plus ardu le suivi du programme.

La façon de construire le programme avec des éléments graphiques peut rendre difficile la compréhension du programme pour une autre personne. Bien que le programme soit organisé avec une certaine logique, celle-ci peut être très difficile à suivre selon l'agencement des éléments graphiques.

La procédure « copier et coller » sur des sections du programme qui comportent des éléments similaires est très pénible. Lors d'une copie les variables ne sont pas bien conservées et elles doivent être réajustées une par une. Lorsque le programme est complexe, il est également assez difficile de bien sélectionner tous les éléments à copier.

En sommes, Labview est un bon logiciel pour commencer de petits projets de suivi et de contrôle de procédés. Par contre, plus le programme devient complexe, plus le suivi de la logique de ce dernier peut devenir extrêmement difficile pour des nouveaux utilisateurs.

3.1.3 Instruments de mesure

Le bon fonctionnement du montage nécessite l'acquisition de quatre types différents de données : température, pH, cyanure libre, niveau (dans le petit contenant pour la mesure du volume de solution à analyser). Les capteurs utilisés pour leur mesure produisent une différence de potentiel qui peut être lue par le microcontrôleur et transférée à l'ordinateur. À partir de ces lectures, il est possible de calculer des valeurs dans les unités d'ingénierie appropriées. Les appareils de mesure, les principes de fonctionnement et les équations permettant ces calculs sont présentés dans les sous-sections suivantes pour chacun des types de capteur.

Mesure de la température

Deux thermistances de $10\,000\ \Omega$ permettent de mesurer la température respectivement dans le réacteur de cyanuration et dans le contenant pour l'analyse du cyanure. Ces valeurs servent à corriger la mesure du pH et du cyanure libre puisque la température a un impact sur l'activité des ions détectés par les électrodes. Dans les intervalles de concentration considérés, chaque degré d'écart avec la température de calibration apporte une erreur de 1,2% pour la mesure du cyanure et de 0,1% pour la mesure du pH. Il faut mentionner que la température peut varier beaucoup durant les expériences comme montré dans la figure 3.10. Comme le calibrage des électrodes n'est pas fait pour chaque test, cet ajustement est nécessaire.

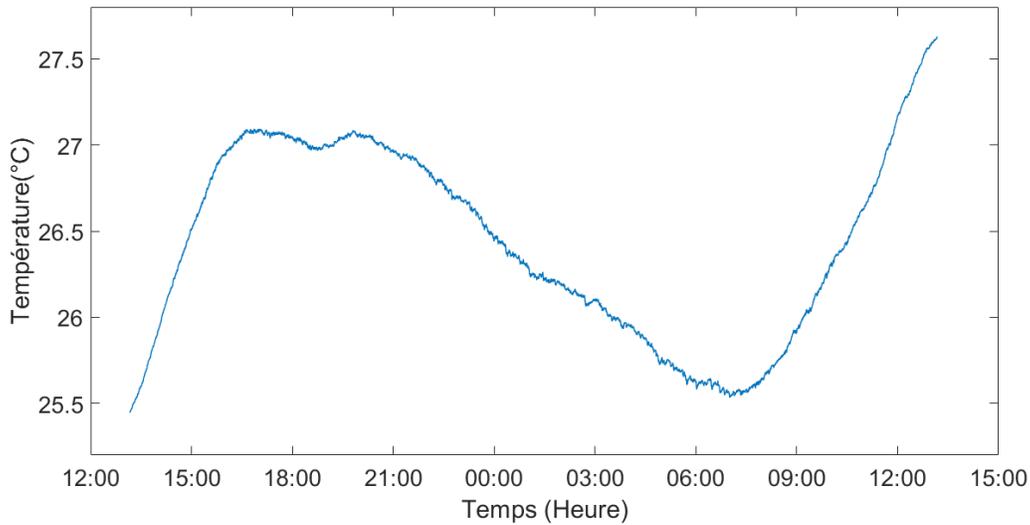


FIGURE 3.10 – Profil de température pour une expérience de 24 heures se déroulant au mois de juillet

Les résistances sont branchées dans un circuit de type diviseur de tension dont la résistance peut être déterminée à partir de l'équation suivante où le voltage de référence (V_{ref}) est de 5 V, la résistance de référence est une résistance de $10\,000\ \Omega$ et V_m est le voltage mesuré :

$$r = \left(\frac{V_{ref}}{V_m} - 1 \right) r_{ref} \quad (3.1)$$

La température peut être calculée à l'aide de l'équation de Steinhart-Hart :

$$\frac{1}{T} = A_r + B_r \ln(R) + C_r \ln(R)^3 \quad (3.2)$$

où la température obtenue est en Kelvin et les constantes A_r, B_r et C_r sont propres au type de thermistance utilisée. Dans la fiche de données des thermistances, les valeurs de A_r, B_r et C_r pour une résistance de $10\,000\ \Omega$ sont respectivement de $1,032\text{E-}3$, $2,387\text{E-}4$ et $1,580\text{E-}7$.

Finalement, le calibrage des thermistances est fait à l'aide d'un seul point de référence à la température de solidification de l'eau. La différence obtenue est additionnée à la température calculée par l'équation de Steinhart-Hart.

Mesure du pH

La mesure du pH est faite avec un pH-mètre muni d'une électrode en verre. Ce type de capteur est dit du type passif puisqu'une source externe d'excitation (voltage ou courant) n'est pas requise (Emerson Process Management, 2010). Cette électrode de potentiel d'oxydoréduction nécessite habituellement une étape d'amplification avant de faire la lecture pour diminuer l'impact du bruit, permettre le transport du signal sur une plus grande distance et lire des voltages négatifs. L'amplificateur utilisé, conçu par la compagnie Vernier, a été spécifiquement développé pour les capteurs du potentiel d'oxydoréduction. Le gain et la compensation pour cet amplificateur, donnés dans les fiches techniques de l'équipement, sont respectivement de $2200\ \text{mV/mV}$ et de $1200\ \text{mV}$. L'effet de l'amplificateur sur la différence de potentiel mesurée est présenté dans l'équation suivante où V_{amp} est le voltage amplifié, G_v est le gain, V est le voltage produit par l'électrode et C_v est la compensation. :

$$V_{amp} = G_v V + C_v \quad (3.3)$$

Lors d'une lecture avec le microcontrôleur, c'est le voltage amplifié qui est mesuré. Celui-ci doit donc être isolé dans l'équation précédente :

$$\begin{aligned} V &= \frac{(V_{amp} - C_v)}{G_v} \\ V &= \frac{V_{amp}}{G_v} - \frac{C_v}{G_v} \end{aligned} \quad (3.4)$$

À partir des valeurs de gain et de compensation, $455\ \text{mV/mV}$ est obtenu pour $1/G_v$ et $545\ \text{mV}$ pour C_v/G_v . Par contre, les fiches techniques indiquent plutôt des valeurs de respectivement $466,875\ \text{mV/mV}$ et $559,793\ \text{mV}$. Ce sont donc ces valeurs qui sont utilisées pour l'amplification de l'électrode de pH et de cyanure.

La relation entre le pH et la différence de potentiel est décrite par l'équation de Nernst :

$$V = V_0 - \frac{RT}{zF} \ln K \quad (3.5)$$

Cette dernière peut être simplifiée pour obtenir l'équation suivante avec la température en Kelvin et les voltages en millivolt :

$$V = V_0 - 0,1984 T \text{ pH} \quad (3.6)$$

Le premier terme, V_0 , est la combinaison de quatre différentes sources de potentiel pouvant affecter la lecture (Emerson Process Management, 2010) :

1. le potentiel de l'électrode de référence à l'intérieur de l'électrode de verre ;
2. le potentiel à la surface interne de l'électrode de verre ;
3. le potentiel de l'électrode de référence Ag/AgCl externe ;
4. le potentiel de jonction liquide.

Le second terme, $-0,1984 T \text{ pH}$ est le potentiel de la surface externe de l'électrode de verre. Il est affecté par la concentration en ion H^+ et par la température. Par convention, la droite du potentiel en fonction du pH passe par 0 millivolt à un pH de 7. En appliquant cette modification à l'équation on obtient :

$$V = V_0 - 0,1984 T (\text{pH} - 7) \quad (3.7)$$

En pratique, cette dernière équation est plus utile lorsque le pH est isolé à gauche de l'équation :

$$\text{pH} = \frac{V - B_{pH}}{-0,1984 A_{pH} (T + 273,15)} + 7 \quad (3.8)$$

Où V est le potentiel de l'électrode de pH en millivolt, T est la température en Celsius. A_{pH} et B_{pH} sont déterminés par calibrage. A_{pH} est un nombre près de 1 et permet d'ajuster la pente de la droite reliant le pH et le potentiel. B_{pH} ajuste l'ordonnée à l'origine et se situe près de 0 mV.

Mesure du cyanure libre

L'électrode pour la mesure du cyanure est une électrode du potentiel d'oxydo-réduction, à l'instar du pH-mètre, et qui fonctionne de façon similaire et suit les mêmes principes mathématiques que cette dernière. Pour ce faire, l'électrode de cyanure possède sur son extrémité une membrane d'argent qui, lorsqu'en contact avec du cyanure libre, se dissout et produit un certain potentiel. Tout comme un pH-mètre, une solution de référence se trouve à l'intérieur de l'électrode.

Selon les fiches techniques, l'électrode peut fonctionner de façon continue uniquement pour des concentrations en cyanure libre en dessous de 50 ppm. Cependant elle peut fonctionner pour une courte durée jusqu'à des concentrations de 260 ppm. Toujours selon la fiche de référence, la concentration minimale pouvant être détectée est de 0,2 ppm. En pratique, lors de tests en laboratoire avec des calibrages adéquats, des concentrations plus faibles que 0,2 ppm ont pu être mesurées.

Tout comme pour l'électrode de pH, la mesure du potentiel de l'électrode de cyanure doit être amplifiée. Comme indiqué dans la sous-section pour la mesure du pH, l'équation qui relie le potentiel amplifié à celui de l'électrode est :

$$V = 466,875 V_{amp} - 559,793 \quad (3.9)$$

La relation entre la concentration molaire de cyanure et le potentiel mesuré, peut être obtenue avec l'équation de Nernst comme indiqué dans la sous-section de la mesure du pH. En résolvant pour la réaction de réduction du cyanure, on obtient la relation suivante :

$$\log[\text{CN}^-] = \frac{V + B_{CN}}{-A_{CN}(T + 273,15)} \quad (3.10)$$

Dans cette équation, le potentiel est exprimé en millivolt, la concentration en mole de cyanure par litre de solution, la température en Celsius et les variables A_{CN} et B_{CN} permettent de calibrer respectivement la pente et l'ordonnée à l'origine de la droite.

Puisqu'il faut diluer la solution cyanurée pour l'analyse, le volume de la solution et du solvant sont ajoutés à cette équation :

$$[CN^-] = 10 \left(\frac{V + B_{CN}}{-A_{CN}(T + 273.15)} \right) \frac{V_{solution} + V_{solvant}}{V_{solution}} \quad (3.11)$$

Mesure du niveau

Lors de la prise d'un échantillon ou lors de l'analyse du cyanure sans la prise d'échantillon, un petit détecteur binaire du niveau permet de déterminer le temps que la pompe doit fonctionner lors de la prise d'un échantillon.

Le fonctionnement du capteur de niveau est relativement simple : un fil de cuivre est connecté à la mise à terre et le second à la borne 5 V de microcontrôleur. Lorsque le liquide atteint la hauteur des fils, le courant peut passer et une différence de potentiel d'environ 2 V peut être mesurée.

3.1.4 Précision des mesures, sources d'incertitude et problèmes rencontrés

Acquisition de données

Le système d'acquisition de données (DAQ) USB-6002 de la compagnie National Instruments permet la lecture de huit instruments de mesure différents simultanément. La précision des lectures faites par le dispositif est reliée à la plus petite différence de voltage qu'il peut lire. Dans le cas présent, la résolution du USB-6002 est 16 bits dans un intervalle de ± 10 volts.

À partir de ces informations, on peut déterminer que l'incertitude sur la mesure pour l'acquisition de données est au minimum de 0,3 mV, tel que démontré par le calcul suivant :

$$\text{Incertainitude} = \pm \frac{20\,000 \text{ mV}}{2^{16}} = \pm 0,3 \text{ mV} \quad (3.12)$$

Lors de la mesure de la température, de la concentration en cyanure et du pH, cette valeur représente la limite minimale de détection entre deux points. Dans leurs unités respectives et dans leur zone de mesure utilisée, cela représente $\pm 0,006$ °C pour la température, $\pm 0,14$ ppm pour le cyanure et $\pm 0,002$ pour le pH.

En pratique, l'incertitude est beaucoup plus élevée. Les instruments de mesure apportent leur propre variabilité et les mesures sont sujettes au bruit électronique au sein du microcontrôleur et environnant. Pour diminuer ces effets lors de l'acquisition de données, chaque

point de mesure est obtenu par une moyenne de 500 points. En supposant que ces points sont distribués suivant une loi normale, il est possible d'obtenir une meilleure approximation de la véritable valeur lorsqu'on procède à des échantillonnages répétés à partir d'une même population (Microchip Technology Inc., 2009). L'erreur-type est l'écart-type de la distribution échantillonnale et correspond à :

$$e = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (3.13)$$

Où σ est l'écart-type de la population ou de l'échantillon et n est le nombre de points mesuré de façon aléatoire et étant distribués normalement.

Mesure du pH

La mesure du pH est faite en continu et elle est affectée par plusieurs sources d'incertitude comme la température, la mesure du voltage, l'équipement utilisé et également la présence d'ions en solution tels que Na^+ . Les incertitudes associées à la température et au microcontrôleur sont discutées dans leurs sections respectives (3.1.4).

Pour ce qui est de l'équipement, certains problèmes ont été rencontrés avec le pH-mètre acheté pour le montage, car son électrode de référence, sous forme de gel, est arrivée à la fin de sa vie utile durant les essais préliminaires et, faute de temps et d'argent, elle a été remplacée par une électrode du laboratoire qui donnait des mesure beaucoup plus variables. La figure 3.11 montre l'impact de la lecture du pH sur une période de 100 minutes pour chacune des deux électrodes. La figure supérieure montre les mesures et le contrôle du pH avec l'électrode d'origine, tandis le graphique inférieur montre celles obtenues avec l'électrode de remplacement (du laboratoire). Dans ce dernier cas, la ligne rouge correspond à des valeurs moyennes obtenues après les tests par une méthode de régression locale (voir la section 2.7.3 pour les détails du calcul). Le contrôle est beaucoup plus difficile après le changement, mais il demeure possible dans une certaine mesure.

Avec le changement d'électrode, une moyenne mobile a été appliquée aux mesures pour permettre de maintenir un contrôle convenable de l'expérience.

La présence d'ions en solution tels que l'ion Na^+ peut également affecter la lecture lorsque le pH de la solution est élevé. Pour des valeurs de pH au-dessus de 11, la présence de ces ions vient fausser la lecture en surreprésentant la quantité d'ions H^+ . La figure 3.12 représente le

phénomène (Emerson Process Management, 2010).

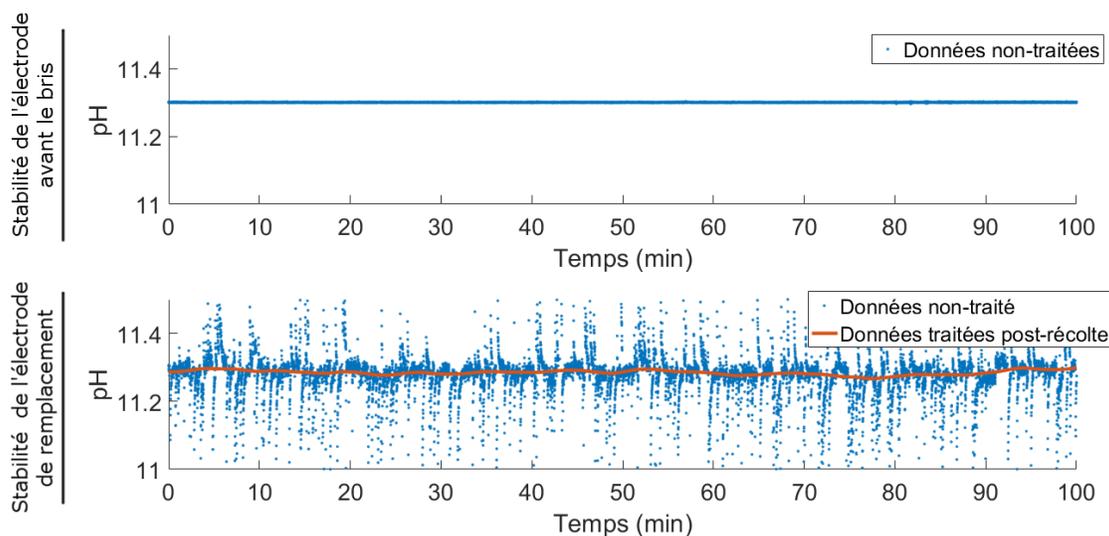


FIGURE 3.11 – Impact sur les mesures du pH du changement d'électrode. En haut : Mesure et contrôle du pH avec l'électrode d'origine / En bas : mesure en contrôle du pH avec l'électrode du laboratoire pour remplacer celle d'origine qui ne fonctionnait plus.

Lors des tests, le sodium provient à la fois du cyanure ajouté sous forme de NaCN et du NaOH utilisé pour ajuster le pH. L'effet demeure assez minime pour les tests de cyanuration puisqu'ils se déroulent à des pH légèrement supérieurs à 11. Il n'en demeure pas moins que cet ion et d'autres tels que les éléments faisant partie du groupe des métaux alcalins, ainsi que l'argent peuvent affecter la lecture du pH.

Mesure de la température

Pour la mesure de la température, il est important d'avoir le moins d'incertitude possible puisqu'elle affecte la mesure du pH et de la concentration du cyanure e, par le fait même leur apporte une incertitude supplémentaire. Pour une mesure de température constante, son erreur-type est d'environ 0,1°C. Pour une moyenne de 100 points, cela représente un écart-type de 0,01°C. Cette incertitude provient essentiellement du bruit au sein du microcontrôleur.

Mesure de la concentration en cyanure libre

Plusieurs sources d'incertitude ont influencé la mesure du cyanure libre lors des essais. Parmi elles, on peut mentionner les volumes utilisés pour la dilution et la contamination dans les

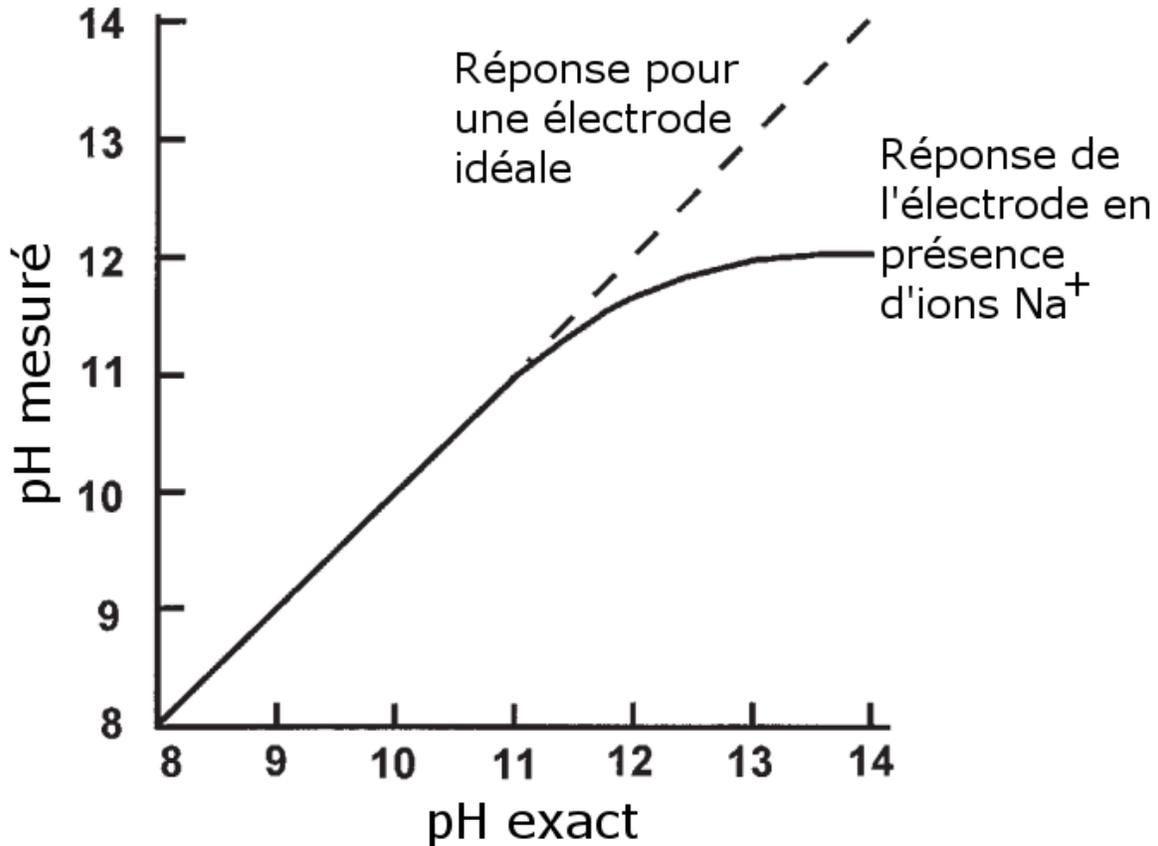


FIGURE 3.12 – Erreur causée par le Na⁺ lors de la mesure du pH (Emerson Process Management, 2010)

tuyaux qui sont dues au montage et pourraient être évitées avec des modifications physiques tel qu'indiqué dans la section 3.1.5. D'autres sources d'incertitude comme celles causées par la mesure de la température ou bien le bruit électrique environnant sont inhérentes à toute mesure avec une électrode et par conséquent elles sont plus difficiles à éviter.

On peut voir dans le tableau 3.2 les résultats d'un test de reproductibilité de la mesure du cyanure faite par le système automatisé pour une solution de 500 ppm de CN⁻ préparée en laboratoire. Les résultats présentés sont les meilleurs qui peuvent être obtenus par le système. L'incertitude sur ce dernier est un peu supérieure à ce que l'on peut obtenir par le titrage par nitrate d'argent.

En pratique, deux sources de contamination viennent interférer avec la lecture. La première provient du liquide cyanuré qui reste pris dans les tuyaux et dans les vannes, venant ainsi modifier le volume et la concentration de la solution cyanurée. Bien entendu, cette contami-

nation est présente lors des tests montrés au tableau 3.2. Par contre, puisque la concentration demeure la même et que les tests sont très rapprochés, la quantité de liquide restant dans les tuyaux reste environ la même. On peut notamment constater l'effet de cette contamination sur la première mesure des résultats présentés au tableau 3.2.

Tableau 3.2 – Variabilité sur la mesure automatique du volume de solution cyanurée

	Concentration mesurée	Concentration ajustée
1	11,7	471,7
2	13,0	522,5
3	12,2	493,6
4	12,7	512,2
	Moyenne	500
	Ecart-type (ppm)	22,4
	Écart-type (%)	4%

Le deuxième type de contamination est causé par le cyanure qui se retrouve dans la solution de dilution. En effet, le nettoyage n'est pas parfait dû à certaines contraintes du montage et il en ressort qu'une quantité de cyanure va s'accumuler dans le béccher de solution de dilution. La figure 3.13 image bien le phénomène : on peut y remarquer que la concentration de cyanure augmente dans la solution de dilution et que cela est relié aux séquences d'analyse. L'augmentation est causée par un nettoyage inefficace suite aux analyses de la concentration de cyanure de la solution provenant du réacteur. On retrouve sur la figure, en rouge, les moments où il y a un échantillonnage (valeur de 1). Les chiffres de concentration de cyanure sont approximatifs puisque le détecteur n'est pas calibré pour ces concentrations. Ils donnent malgré tout une bonne idée de la tendance.

En plus des contaminations, la préparation des volumes de solution et de dilution peut affecter la qualité de la mesure de la concentration en cyanure. Chacun de ces deux volumes a sa propre incertitude et bien entendu ils ne sont pas constants d'une analyse à l'autre. Le tableau 3.3 montre quelques statistiques sur ces mesures.

La mesure des volumes est une autre grande source d'incertitude puisqu'elle affecte à la fois celui de la solution et celui de dilution. Le tableau 3.3 présente la variabilité de la mesure de ces volumes. Dans le cas du volume de solution, il peut arriver que des bulles se forment ou qu'une certaine quantité de liquide soit prise dans la vanne ou dans les tuyaux. Ce liquide emprisonné peut varier d'une mesure à l'autre et affecter les résultats. Malgré cela, les mesures

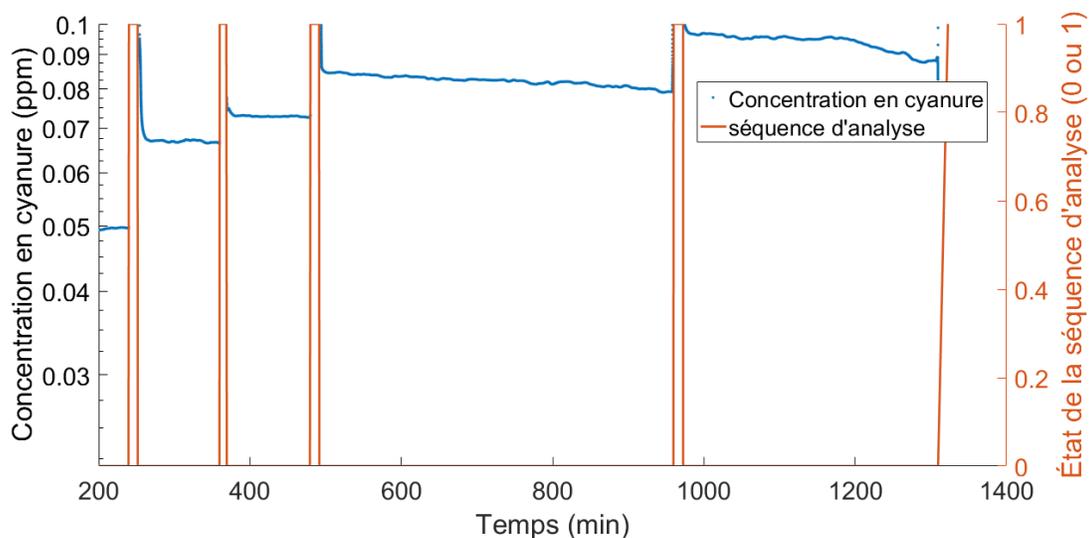


FIGURE 3.13 – Concentration en cyanure de la solution de dilution dans le temps (courbe bleue).

Tableau 3.3 – Variabilité sur la mesure automatique du volume de solution cyanurée et de solution de dilution

Test	Volume de solution mesuré (ml)	Volume de dilution mesuré (ml)
1	3,77	55,8
2	3,80	55,1
3	3,72	57,0
4	3,61	56,4
5	3,71	-
Moyenne	3,72	56,1
Écart-type (ml)	0,07	0,8
Écart-type (%)	2%	1,4%

de la concentration du cyanure libre sont assez fiables pour en faire le contrôle.

La température et le microcontrôleur sont également des sources d’incertitude dans la mesure du cyanure libre. Ces deux cas sont analysés plus en détails dans leur section respective (Mesure de la température (3.1.4) et Acquisition de données (3.1.4)). La température peut avoir un impact notable sur la mesure du cyanure, d’autant plus si elle n’est pas mesurée car chaque variation de 1°C apporte une erreur de 1,2% sur la mesure du cyanure libre. Bien que l’appareil d’acquisition de données cause une certaine incertitude, elle est très faible par rapport aux autres sources d’incertitudes présentées dans cette sous-section.

3.1.5 Améliorations

Des améliorations peuvent être encore apportées au montage. Pour certains éléments comme le système d'analyse du cyanure, le concept au complet est à repenser, alors que d'autres éléments sont fonctionnels, mais pourraient en être améliorés avec de petites modifications. Les améliorations à apporter sur les différentes parties du montage sont présentées dans les sous-sections suivantes.

Système d'ajout des réactifs

Le problème majeur relié au système d'ajout des réactifs concerne l'utilisation d'une même pompe pour transférer plusieurs flux et faire leur contrôle à l'aide de vannes. La difficulté concerne la vanne où le liquide s'y accumule. Par ailleurs, celle-ci est difficile à nettoyer sans défaire une bonne partie du montage (ces vannes sont difficiles d'accès). L'espace sous la hotte étant limité, uniquement les éléments nécessitant souvent une interaction (réacteur, produits chimiques, pompe, etc.) se trouvent à l'avant. De plus, ces derniers équipements n'étaient pas toujours parfaitement étanches lorsque refermés et que la pompe est en fonctionnement, ce qui ne favorise pas un bon contrôle.

La solution la plus simple pour régler ce problème serait d'éliminer complètement les vannes et faire le contrôle avec deux pompes indépendantes. L'ajout d'une vanne dans le montage, bien que nécessaire avec les contraintes économiques du projet, n'a fait qu'augmenter sa complexité. Effectivement, au lieu de contrôler uniquement deux pompes, il a fallu contrôler la pompe et le réglage des vannes. Parmi les soucis expérimentaux ajoutés, on peut mentionner la recirculation des solutions pour éviter que la pression s'accumule et des équipements supplémentaires tel que des vannes, les relais et le filage électrique.

Réacteur

Quelques modifications pourraient être apportées au réacteur pour l'améliorer, notamment sur le positionnement de certains de ses éléments et l'augmentation de la robustesse pour d'autres. La plupart des flux entrants du réacteur (tuyaux, pH-mètre, agitateur, barboteur/filtre) le font à travers son couvercle. Dans certains cas, il aurait été mieux de les fixer sur la paroi latérale. C'est le cas du tuyau du filtre qui aurait été beaucoup plus court, ce qui aurait permis de diminuer le temps de la séquence d'analyse du cyanure. C'est également le cas pour

la thermistance dont le positionnement a effectivement été changé pour être fixé sur la paroi.

Porte-Échantillons

Le porte-échantillons rotatif a très bien fonctionné et répondu aux attentes. Quelques modifications pourraient être apportées sur le nombre d'échantillons pouvant être supportés. Puisqu'il y a huit échantillonnages lors des tests, il serait pratique d'avoir huit emplacements pour les bouteilles. De plus, la solution est transférée d'un gros contenant vers un plus petit. Le porte-échantillons pourrait être amélioré en diminuant la taille des trous pour celle des petites bouteilles. Cela éviterait des manipulations inutiles.

Système d'analyse du cyanure

Le système d'analyse du cyanure a de nombreux problèmes : nettoyage très peu efficace dans les tuyaux, grande incertitude sur la mesure, complexité et séquences longues. Certains de ces problèmes peuvent être améliorés sur le montage actuel quoiqu'il serait plus logique de refaire la conception avec un tout nouveau montage. Les problèmes rencontrés sont associés à deux causes principales : l'utilisation d'une seule pompe pour faire l'action de trois (soit une pompe avec plusieurs têtes pour insérer les tuyaux) et l'utilisation d'une électrode de cyanure pour faire la mesure du cyanure.

L'utilisation d'une pompe à trois têtes a grandement compliqué le système dans son ensemble. La mesure d'un volume précis pour la solution cyanurée et pour celle de dilution oblige à faire fonctionner la pompe dans les deux sens : une direction pour remplir les contenants et une autre pour ajuster le niveau. Pour éviter tout conflit entre les deux, des vannes sont placées à certains endroits stratégiques. Le principe fonctionne généralement bien, mais pour certains tuyaux, la pompe est actionnée dans une direction où la vanne doit être fermée, ce qui nécessite l'ajout d'une boucle de recirculation afin d'éviter la pressurisation.

Dans le cas du nettoyage et pour permettre à la solution ad-hoc de remonter les tuyaux, il faut nécessairement pomper un peu de la solution du réacteur ce qui limite grandement le nettoyage. Ce dernier problème relève clairement d'une conception inadéquate. Avec les équipements actuels, il serait possible d'améliorer le concept et de faciliter le nettoyage en plaçant le contenant pour la mesure du volume de solution de dilution en amont du contenant pour la mesure du volume de solution cyanurée. Il serait alors possible de nettoyer le système

sans trop d'effort à chaque mesure du cyanure. Ce système permettrait d'isoler la solution de dilution du cyanure et d'éviter certaines sources de contamination discutées dans la section 3.1.4.

Le second problème rencontré avec le système d'analyse du cyanure est l'utilisation d'une électrode de cyanure comme instrument de mesure. Au moment de la conception, ce choix semblait le plus logique. Par contre, avec le recul, l'utilisation d'une telle électrode rends le système plus complexe et possiblement moins précis et efficace. Diluer la concentration avant de faire l'analyse apporte son lot d'incertitude. Effectivement, à cause de cette contrainte, la mesure faite devient moins fiable, puisque chaque volume à son degré d'incertitude. De plus, le montage doit être beaucoup plus volumineux, ce qui signifie qu'une plus grande quantité de solution peut rester prise dans les tuyaux et contaminer les analyses subséquentes. Pour remédier à cela, il faudrait revoir la technique d'analyse au complet. L'option la plus raisonnable est d'utiliser une technique d'analyse qui ne nécessite pas une dilution de la solution, telle qu'une méthode chimique avec changement de couleur et une analyse de la solution en temps réel par une méthode de colorimétrie. Cette technique d'analyse est relativement simple à mettre en œuvre et permettrait d'améliorer le montage. C'est également ce type d'analyse (colorimétrie ou spectrophotométrie) qui est faite en usine dans les analyseurs de cyanure du procédé.

3.2 Essais préliminaires

3.2.1 Essais de Bond

Plusieurs essais préliminaires de la procédure de Bond ont été effectués avec un minerai d'or. Les tests avaient pour but de standardiser la procédure, vérifier la variabilité des résultats et, possiblement, améliorer les manipulations.

Difficulté rencontrée et améliorations de la procédure

La procédure de Bond demande le tamisage à une dimension précise à plusieurs reprises. Lors des premiers essais de pratique, cette étape était faite en utilisant un grand tamis sur lequel on aide le passage du matériel fin avec les mains et d'autres outils. Il s'est avéré que cette procédure ajoutait beaucoup d'incertitude sur les résultats. L'utilisation ultérieure d'un

appareil de tamisage automatique a grandement amélioré les résultats.

Résultats des essais

Les essais préliminaires ont permis de déterminer la variabilité du minerai. Suite à l'uniformisation de la procédure, un écart-type de $\pm 0,67$ kWh/t a été obtenu. Cela représente un écart-type relatif de 4,2%. Ces données sont utiles pour confirmer les incertitudes obtenues lors des tests subséquents. L'annexe E présente les principaux résultats de ces tests.

3.2.2 Cyanuration

Plusieurs essais préliminaires ont permis de tester le système automatisé. Les premiers ont été faits uniquement avec de l'eau dans le réacteur, par la suite d'autres ont été réalisés avec de la pulpe et finalement lorsque tout fonctionnait correctement la cyanuration est testée.

Résultats des essais

Dans les essais préliminaires, les principaux résultats obtenus ont permis de valider sur le contrôle automatique et le fonctionnement du montage. Les tests ont permis d'améliorer la procédure expérimentale.

Difficultés rencontrées et améliorations de la procédure

Plusieurs difficultés ont été rencontrées durant les essais préliminaires : mesure du cyanure très contaminée, beaucoup de bruit pour la lecture du pH et finalement, mauvaise source de stérile pour représenter la dilution.

La lecture du cyanure était très contaminée d'un essai à l'autre car on n'avait pas considéré le nettoyage de l'équipement. L'ajout d'étapes de nettoyage à la suite des mesures du cyanure a grandement atténué ce biais.

Un autre problème rencontré était le fait que la lecture du pH était très variable avec l'électrode de pH utilisé. Pour corriger le problème, le calcul d'une moyenne mobile dans le logiciel a permis de diminuer l'impact des valeurs extrêmes.

Finalement, un problème majeur s'est révélé avec les échantillons de roche stérile provenant de la mine. En principe, ceux-ci devaient contenir significativement moins d'or que le minerai.

La figure 3.14 montre l'effet de la fraction en roche stérile dans un mélange stérile/mine-
rai/remblai sur la concentration en or de l'échantillon. On note un effet inverse, des teneurs
anormalement élevées et une variabilité des mesures réalisées par pyroanalyse grande. La te-
neur en or dans certains échantillons de stérile pur chiffrait jusqu'à 200 ppm et les analyses
faites étaient extrêmement variables. À cause de ces résultats, le protocole a dû être modifié
tel que présenté dans la section 2.7.2. La grande variabilité du stérile n'aurait pas permis
d'obtenir de bons résultats et il était impossible dans le fenètre de temps disponible d'obtenir
de nouveaux échantillons et recommencer tout le travail déjà accompli.

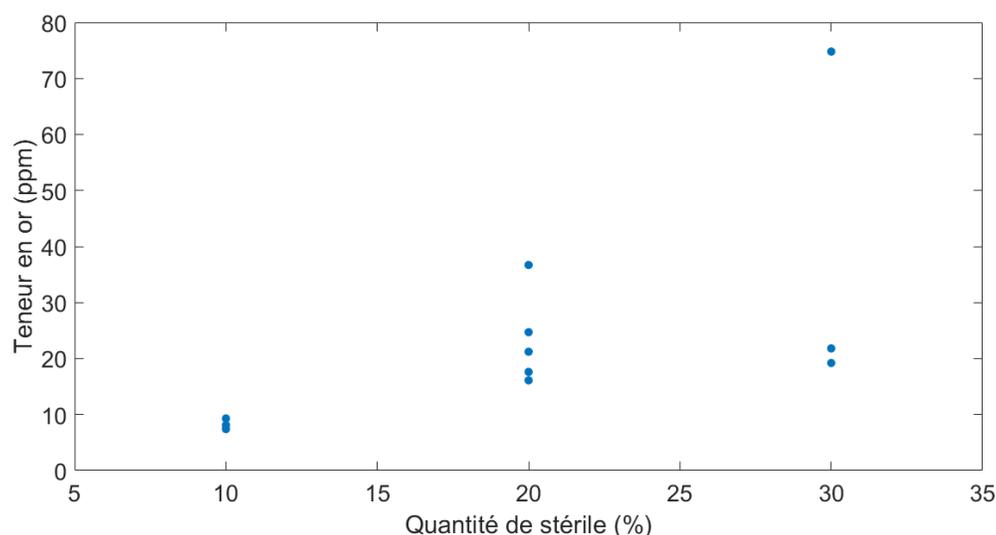


FIGURE 3.14 – Effet de quantité de stérile dans un échantillon sur la teneur en or du solide

3.3 Conclusion

La conception du montage automatisé et les essais préliminaires ont été abordés dans ce cha-
pitre. Le montage expérimental pour la cyanuration permet l'ajustement du pH, du cyanure,
la prise d'échantillon et l'oxygénisation de la solution expérimentale. Les améliorations qui
pourraient être apportées au montage sont également abordées, notamment modifier l'analyse
du cyanure par l'utilisation de la technique de colorimétrie plutôt qu'une électrode du poten-
tiel d'oxydo-réduction. Finalement, le chapitre discute également des essais préliminaires pour
le test de Bond et les cyanurations. Maintenant que tous les éléments techniques et théoriques
ont été traités, les résultats et l'analyse des données peuvent être abordés dans le chapitre
suivant.

Chapitre 4

Résultats et Analyse des données

Dans ce chapitre final, l'analyse des données est faite sur les résultats récoltés lors des tests de Bond et des tests de cyanuration où les éléments suivants sont examinés :

- le rendement en or dans la solution cyanurée,
- la cinétique de la réaction,
- le contrôle du pH,
- la consommation des ions OH^- ,
- le contrôle de la concentration en cyanure libre,
- et la consommation de cyanure.

En plus de ces éléments, la mitigation de la dilution opérationnelle excédentaire est évaluée à l'aide de données théoriques. Bien entendu, ces données permettent de donner une idée de la viabilité du concept, mais ne peuvent pas être considérés comme directement applicables sans faire les tests appropriés.

4.1 Tests de Bond

Les résultats des essais de Bond montrent que l'augmentation de la quantité de remblai dans le mélange amène une diminution de l'indice de Bond, mais que la variation de la quantité de stérile n'a pas d'effet important. Ceci est confirmé par des tests statistiques dont les résultats sont présentés au tableau 4.1 où l'estimé et l'écart-type sont respectivement le coefficient reliant le facteur à l'indice de Bond et son écart-type, t est la statistique de Student et p

Tableau 4.1 – Analyse de la variance pour les essais de Bond

	Estimé	écart-type	t	p
Ordonnée à l'origine	14,065	0,3058	45,996	5,52E-11
Roche stérile	-0,005	0,0105	-0,4786	0,645
Remblai	-0,088	0,0209	-4,2074	0,003

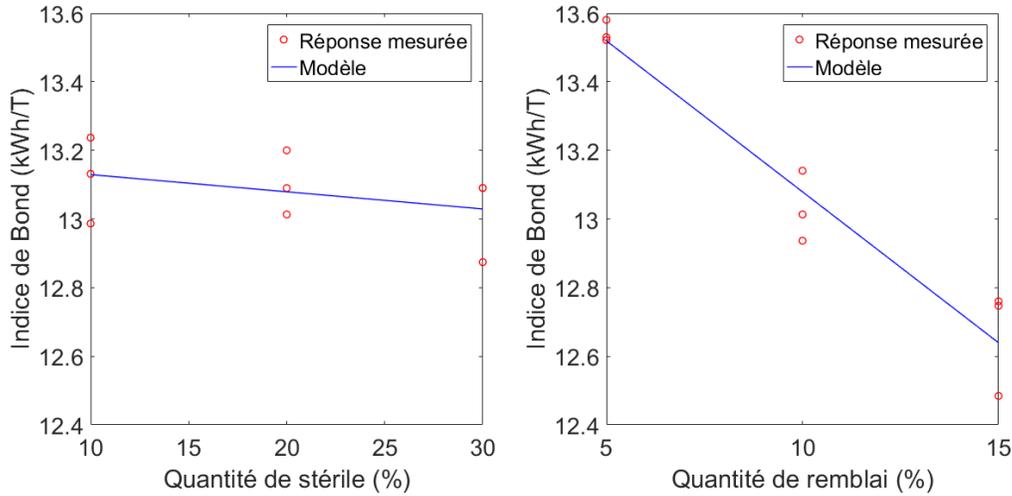


FIGURE 4.1 – Droite prédictive et ensemble de données ajustées

est la probabilité que le facteur soit significatif. Dans cette analyse statistique, le seuil est de 95% et pour que l'effet du changement de composition soit significatif la valeur absolue de la statistique t de Student en valeur absolue doit être supérieure à 2,1. Pour la roche stérile on a obtenu une valeur de 0,48 et pour le remblai, une valeur de 4,2.

Ces résultats sont présentés dans la figure 4.1 par les droites prédictives pour chacun des deux effets. Dans les deux cas, les données ont été ajustées pour enlever l'effet complémentaire c'est-à-dire que les données sont ajustées pour voir uniquement l'impact d'un facteur, donc que l'effet du second facteur est soustrait à la mesure. Un modèle de régression linéaire pour l'effet du remblai explique bien la variabilité de l'ensemble de données, alors que pour la roche stérile, la variabilité ne peut être expliquée. La possibilité d'un effet du deuxième degré ou d'interaction ont également été envisagées. Dans les deux cas, des modèles plus complexes ne permettaient pas de mieux expliquer la variance calculée.

Ces résultats montrent qu'il n'y a pas d'effet notable de la quantité de stérile sur l'indice de Bond. On peut donc supposer que leur composition minérale est très similaire. Pour le remblai, l'indice de Bond diminue de façon proportionnelle à sa fraction massique. Pour mitiger

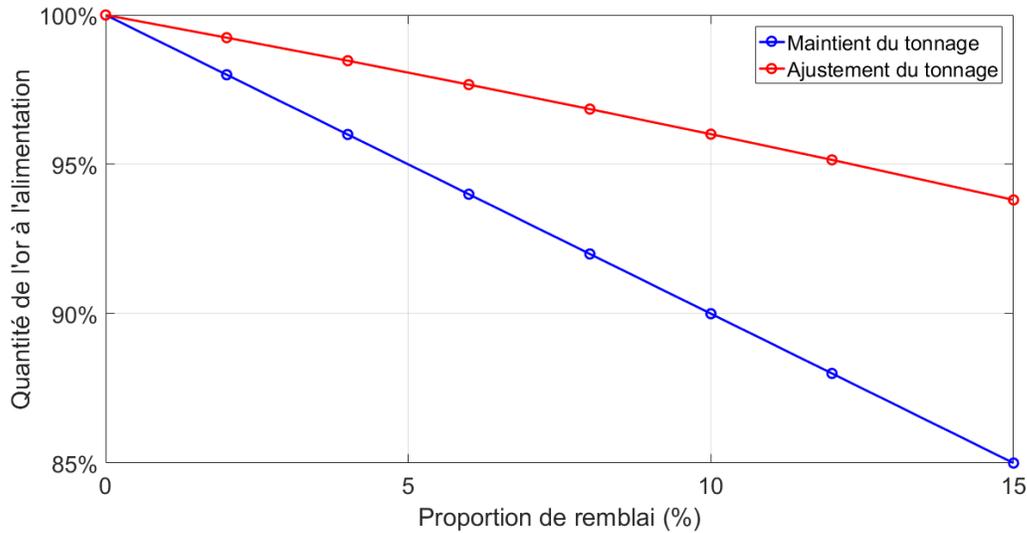


FIGURE 4.2 – Effet de la quantité de remblai sur la quantité d’or à l’alimentation de l’usine

l’impact de la dilution opérationnelle excédentaire sur la quantité d’or produit, une augmentation du tonnage au circuit de broyage ne peut être une option valable dans le cas de la dilution par de la roche stérile. Pour le remblai qui ne contient pas d’or, son indice de Bond est par contre plus faible que celui du minerai. En cas de dilution causée par le remblai, il est avisé d’augmenter le tonnage à la comminution pour mitiger son impact négatif sur le débit massique d’or, de manière à s’approcher de la cible budgétée. La figure 4.2 présente l’impact de la quantité de remblai sur la quantité d’or à l’alimentation du circuit de comminution. Deux cas sont analysés :

1. lorsque le débit à l’alimentation est maintenu ;
2. lorsque celui-ci est augmenté de manière à maintenir la même puissance utilisée que lorsqu’il n’y a aucune dilution et obtenir une même distribution granulométrique de fine et un P_{80} similaire. Il est possible d’augmenter le tonnage car le remblai a un indice de Bond beaucoup plus petit que le minerai.

Dans la figure 4.2, on peut constater que pour 15% de dilution, la quantité d’or alimentant est supérieur en ajustant le taux d’alimentation. Une augmentation du tonnage à un niveau permettant de maintenir l’énergie à fournir lors de la comminution permet de mitiger l’impact de la dilution par le remblai.

4.2 Essais de cyanuration

Même si le matériau reçu de la mine pour simuler la dilution opérationnelle ne répondait pas aux attentes pour l'obtention de résultats de qualité (voir section 3.2.2), les dix tests de cyanuration réalisées ont permis d'évaluer la capacité du montage à obtenir des résultats reproductibles, offrir un contrôle décent et de fournir des données sur la lixiviation et la consommation de réactifs. Ces dix tests sont présentés en deux ensembles distincts. Le premier ensemble de cinq essais (série 1) a été complété avec une alimentation composée d'environ 12,5% de roche stérile, 7,5% de remblai et 80% de minerai. La deuxième série de tests (série 2) a été faite avec un minerai pur sans dilution opérationnelle. Les données brutes des dix tests réalisés se retrouvent à l'annexe G.

4.2.1 Récupération

Dans la figure 4.3, on peut voir la récupération en or en fonction du temps et en fonction du mélange de minerai. Deux principales observations peuvent être tirées de cette figure : la récupération semble plus faible et la variance semble plus élevée pour la série 1 que pour la série 2.

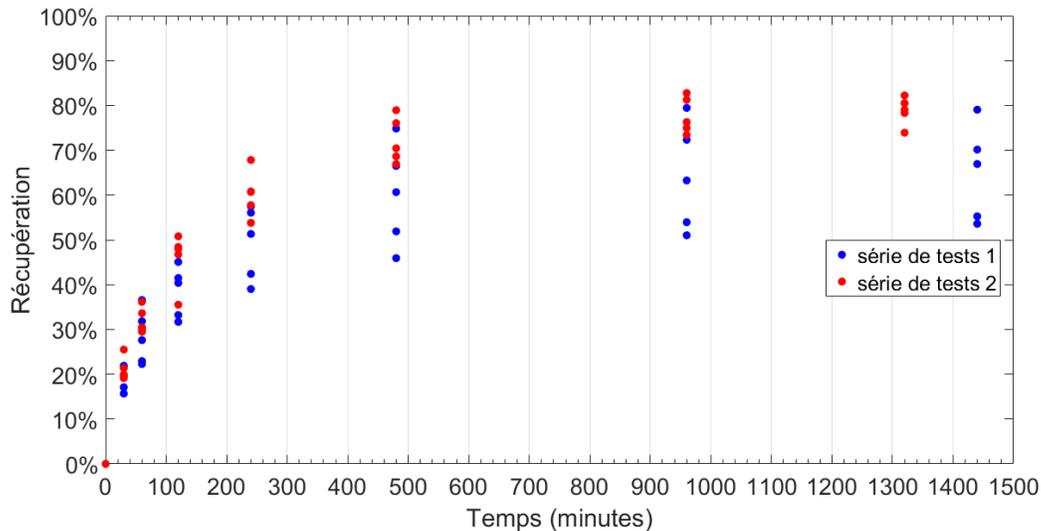


FIGURE 4.3 – Récupération en fonction du temps pour l'ensemble des tests.

Pour s'en assurer, on peut comparer statistiquement la moyenne et la variance des deux séries comme cela est présenté dans le tableau 4.2. Le test de Student au seuil de 5% permet de conclure que l'on peut rejeter l'hypothèse nulle dans le cas des moyennes, donc que les

moyennes entre les deux séries ne sont pas égales. À l'aide du test de Fisher, on peut également conclure à une différence entre les variances.

Tableau 4.2 – Analyse statistique entre les deux séries de cyanuration.

Variable		Série 1	Série 2	Test sur les moyennes		Test sur les variances	
		(n=5)	(n=5)	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
Récupération	Moyenne (Écart-type)	0,65 (0,11)	0,79 (0,03)	-2,79	0,04	11,73	0,04

Cette différence entre les variances et les moyennes est possiblement liée à la présence de roche stérile et de remblai dans le matériau testé lors des essais de la série 1. La pyroanalyse sur des mélanges de différentes compositions de minerai/roche stérile/dilution montre qu'il y a une certaine quantité d'or dans la roche stérile mais que la teneur est assez variable comme indiqué dans la section 3.2.2. Il est donc possible que l'or provenant de la roche stérile soit plus difficile à cyanurer et diminue la récupération lorsqu'il est présent en grande quantité. Quelques hypothèses peuvent être émises à cet égard :

1. la roche stérile contient des particules d'or très grossières demandant un temps de lixiviation plus long ;
2. les particules d'or dans la roche stérile sont très fines et le broyage à une distribution granulométrique à 80% passant 75 µm ne permet une libération complète ;
3. un élément présent dans le stérile passive ou ralentit la lixiviation ;
4. la présence de matière carbonée peut adsorber l'or se trouvant en solution ;

Dans le premier cas, si les particules d'or sont très grossières, il n'est pas impossible d'avoir une plus grande variabilité dans les teneurs en or, ce qu'on appelle l'effet pépite. De plus, le ratio surface/volume est plus faible dans le cas de particules plus grosses, de sorte que l'on peut s'attendre à une cinétique plus lente ce qui ne s'est pas confirmé comme on peut le constater sommairement dans la figure 4.3 et plus en détail dans la sous-section discutant de la cinétique.

Pour le second cas, des particules très fines dans la composante stérile du mélange testé pourraient ne pas être complètement libérées. Par contre, l'or dans la roche stérile serait alors dispersé de façon plus homogène ce qui ne semble pas être le cas avec les résultats obtenus.

La troisième hypothèse indiquée est liée à la présence d'or réfractaire dans la roche stérile. On peut voir la composition chimique du minerai et du stérile dans l'annexe F, où on note la présence importante (4,59% vs 0,8%) d'ions tellure dans l'échantillon de roche stérile. Cet élément peut se lier à l'or et à l'argent pour former un composé (tellurure) pouvant rendre l'or réfractaire (La Brooy et al., 1994). Le cuivre est également plus présent dans la roche stérile que dans le minerai (5,89% vs 0,967%). Lorsque cet élément est sous forme de chalcopryrite, il est possible que l'or soit emprisonné à l'intérieur du minéral ce qui ralentit la cyanuration. La présence d'une plus grande quantité de sulfures, tel que la chalcopryrite, est généralement liée à une consommation plus grande de cyanure et est analysée plus en détail dans la section 4.2.3.

Finalement, il pourrait y avoir de la matière carbonée avec le stérile qui pourrait adsorber l'or en solution. Si tel était le cas, les analyses en XRF présentées en Annexe F ne permettent pas de détecter la présence de carbone. Il n'est donc pas possible de tirer une conclusion pour cette hypothèse, des tests et analyses supplémentaires seraient nécessaires.

4.2.2 Cinétique

La cinétique de chaque essais a été évaluée à l'aide d'une constante de cinétique calculée à partir de l'équation différentielle suivante :

$$\frac{dC_{\text{Au}}}{dt} = k(C_{\text{Au}} - C_{\text{Au}}^{\infty})^2 \quad (4.1)$$

Où C_{Au} est la concentration en or dans la solution, k est la constante cinétique de la réaction et finalement, C_{Au}^{∞} est la concentration à un temps infini. C'est deux constantes sont calculées à partir de la méthode des moindres carrés. L'ordre de la réaction est estimé être du second ordre comme cela est généralement accepté dans la littérature lorsqu'on ne prend pas en compte la concentration de cyanure et d'oxygène (Nicol et al., 1987; Ling et al., 1996). En divisant chaque côté de l'équation par la concentration en or de l'alimentation solide, on obtient l'équation pour la récupération :

$$\frac{dR_{\text{Au}}}{dt} = k(R_{\text{Au}} - R_{\text{Au}}^{\infty})^2 \quad (4.2)$$

En résolvant l'équation différentielle, on peut obtenir l'équation suivante :

$$\frac{1}{R_{Au}^0 - R_{Au}^\infty} - \frac{1}{R_{Au} - R_{Au}^\infty} = kt \quad (4.3)$$

La figure 4.4 compare les récupérations calculées aux récupérations mesurées. On peut y constater que le modèle cinétique de second ordre réussi assez bien à représenter les données.

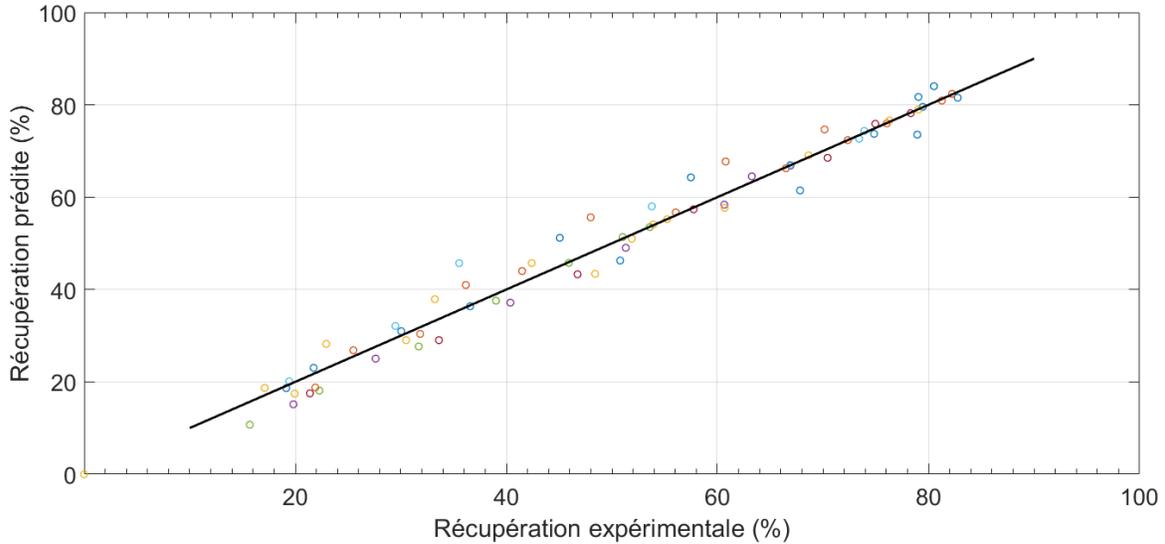


FIGURE 4.4 – Comparaison entre la récupération mesurée et la récupération calculée à l'aide d'un modèle de cinétique de 2^e ordre

La figure 4.5 présente les données linéarisées de la récupération en fonction du temps pour une réaction du deuxième ordre. Le graphique permet de facilement comparer la vitesse de solubilisation des différents tests, où une pente plus élevée représente un temps plus court pour atteindre la récupération finale.

La figure suggère qu'il n'y a pas de différence entre les deux séries. Pour s'en assurer, des tests de Student et de Fisher permettant de comparer les moyennes et les variances ont été réalisés. Les moyennes et les variances des constantes cinétiques ne sont pas significativement différentes pour un seuil de confiance de 95%. On ne peut donc pas rejeter l'hypothèse nulle. Le tableau 4.3 présente les résultats obtenues pour la constante cinétique.

Ces résultats ne sont pas surprenants, selon la littérature, l'or est dissout à un rythme maximal de $3,25 \frac{\text{mg}}{\text{cm}^{-2}\text{h}^{-1}}$ (Nicol et al., 1987). Lorsque le minerai et les conditions de broyage demeurent les mêmes, la libération des particules demeure similaire d'un test à l'autre. Le temps pour

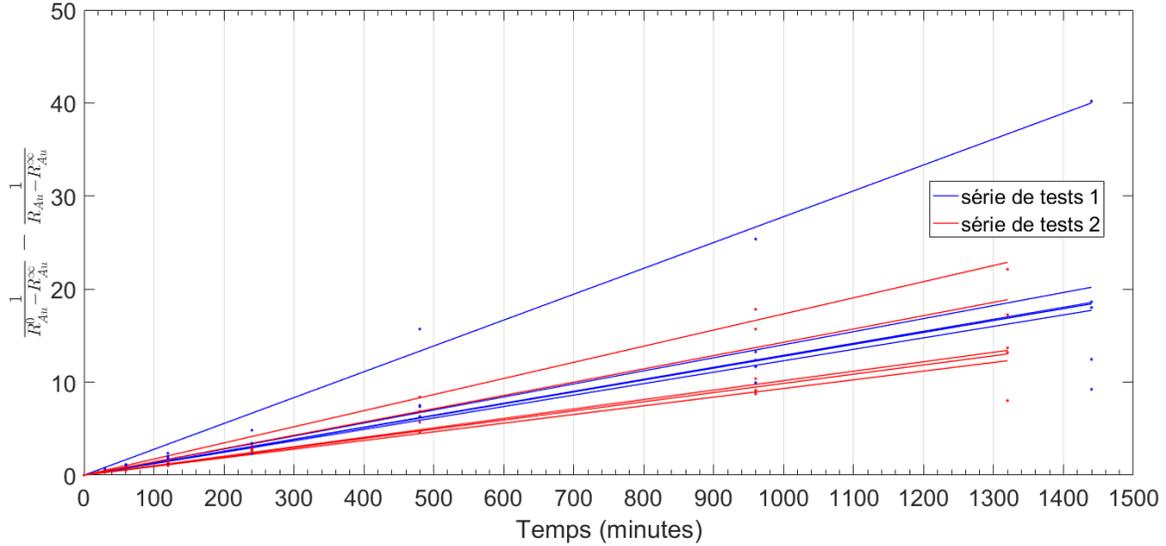


FIGURE 4.5 – Récupération linéarisée en fonction du temps pour chaque série de tests.

Tableau 4.3 – Analyse statistique sur la cinétique entre les deux séries de cyanuration.

Variable		Série 1	Série 2	Test sur les moyennes		Test sur les variances	
		(min^{-1})	(min^{-1})	t	p	F	p
Constante cinétique	Moyenne (Écart-type)	0,016 (0,006)	0,012 (0,003)	0,66	0,54	4,28	0,19

atteindre la récupération maximale ne devrait pas être significativement différent d'un test à l'autre comme cela est constaté avec ces résultats.

4.2.3 Cyanure

Les données pour le contrôle du cyanure sont présentées dans la figure 4.6. On y montre les données pour cinq tests de la série 1 suivis des cinq tests de la série 2 numérotés de un à dix ainsi qu'une ligne pointillée à 500 ppm de cyanure représentant la consigne. Sur l'ensemble des données, la concentration moyenne est de 511 ppm et l'écart moyen par rapport à la consigne de ± 61 ppm. Compte tenu de la grande variabilité sur la lecture du cyanure (dont l'écart-type pouvait monter jusqu'à ± 55 ppm dans les tests préliminaires) et de l'incertitude sur l'ajout du cyanure, il n'est pas surprenant d'obtenir un écart moyen aussi élevé.

En moyenne, la consommation totale en cyanure (CN^-) est de 326 mg par test. Dans la figure 4.7, on observe que la majeure partie du cyanure réagit dans les 200 premières minutes de l'expérience, à cause de minéraux cyanivores tels que les sulfures de fer et de cuivre. Pour

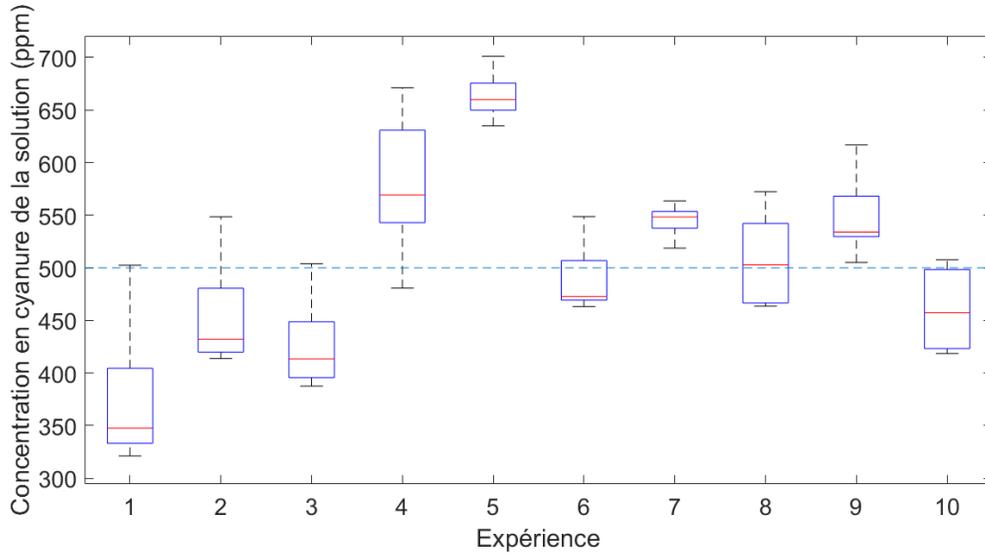


FIGURE 4.6 – Diagramme de boîtes à moustaches pour le contrôle du cyanure lors des essais.

l'expérience complète, on peut attribuer environ 10 à 14 mg de cyanures pour la solubilisation de l'or alors que la fraction restante est due aux réactions parasites.

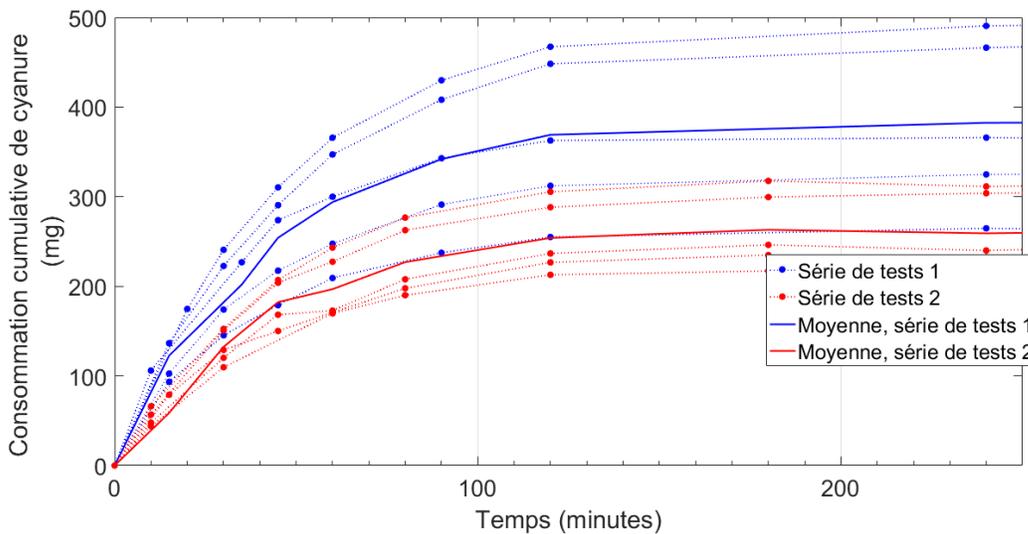


FIGURE 4.7 – Consommation cumulée en cyanure pour l'ensemble des tests (lignes pointillées) pour les 200 premières minutes.

Il n'existe pas de différence statistique entre les deux séries de tests tel qu'on peut le constater dans le tableau 4.4. Le test de Student pour la moyenne et le test de Fisher pour la variance montrent tous deux que celles-ci ne sont pas significativement différentes (valeur t de 1,25 et valeur F de 2,3). Cela s'explique principalement par la grande variabilité des résultats et par

la faible différence de composition dans les deux mélanges. Les données brutes et réconciliées pour la consommation du cyanure se trouvent dans l'annexe G.

Tableau 4.4 – Analyse statistique entre les deux séries de cyanuration.

Variable		Série 1	Série 2	Test sur les moyennes		Test sur les variances	
		(n=5)	(n=5)	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
Cyanure consommé (mg)	Moyenne (Écart-type)	421,5 (76,5)	370,2 (50,4)	1,25	0,25	2,30	0,44

4.2.4 pH

À partir des données récoltées avec les électrodes de pH, le maintien de la consigne et la consommation en NaOH ont été évalués. Dans la figure 4.8, on peut voir un diagramme de boîtes à moustaches des mesures du pH selon chaque essai. La consigne du pH n'est pas la même dans les différents tests, par exemple elle est de 11,3 pour les expériences de 1 à 5, de 11,1 pour les expériences 6 et 7 et, finalement, de 11,0 pour les trois derniers essais.

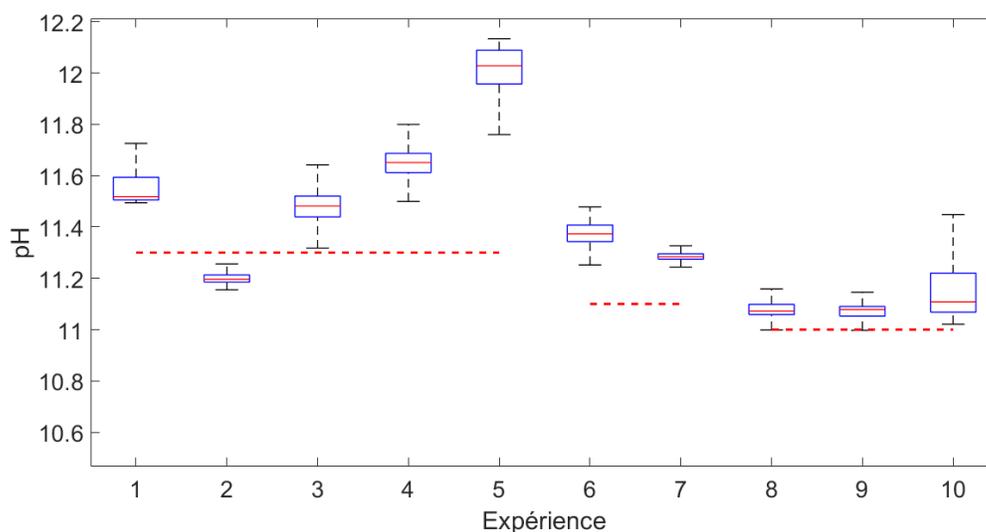


FIGURE 4.8 – Diagramme de boîtes à moustaches pour le contrôle du pH lors des essais. Les lignes pointillées sont les consignes pour chacun des tests.

Sur cette figure, on peut voir qu'en général la concentration moyenne en ions H^+ est supérieure à la consigne de 0,2-0,3 unités de pH. Ceci est relié à la grande variabilité de l'électrode de pH utilisé, dont la problématique a été discutée dans la section 3.1.4. Pour s'assurer de ne pas descendre en dessous de la consigne lors des expériences 1 à 5, des ajouts de NaOH ont été

faits lorsque la valeur lue par l'électrode était inférieure à la consigne, bien que la valeur réelle soit parfois plus haute. Des améliorations à l'algorithme de contrôle ont permis d'obtenir de meilleurs résultats pour le maintien de la consigne lors des tests 8,9 et 10.

Le test 2 est le seul dont la moyenne se situe en dessous de la consigne. Bien que la consigne notée pour ce test ait été de 11,3, il est fort probable qu'il s'agisse d'une erreur et que la consigne ait été changée lors de cette expérience pour 11,1 ou 11,0. Les résultats de pH très élevés pour le test 5 sont dus à des problèmes importants de lecture avec l'électrode de pH lors de la journée du test.

À partir des données de pH ainsi que des ajouts de solution de NaOH et de solution cyanurée, il a été possible d'estimer la consommation totale en NaOH pour chacune des expériences, sauf l'expérience 5 où la consommation est grandement négative contrairement aux autres essais. Un problème est survenu lors de cette expérience avec la vanne pour le contrôle de la solution de pH qui s'est mal refermée.

On retrouve les données de consommation du NaOH dans la figure 4.9. La consommation moyenne est de 215 mg avec une valeur maximale de 410 mg et un minimum de 60 mg. La consommation en NaOH est assez élevée. Pour mettre ces valeurs en perspective, lorsque le pH dans le réacteur est de 11,1, on trouve environ 85 mg de NaOH dans le réacteur. La consommation d'ions H^+ est principalement due aux réactions parasites. Ceci a été discuté dans la section 4.2.3 sur l'analyse de la consommation en cyanure, mais ici on peut ajouter le fait qu'il existe de nombreuses espèces minérales qui peuvent consommer le NaOH. Notamment, dans le minerai et dans le stérile on retrouve du fer en très grande concentration qui, lorsque présent sous la forme de pyrite, peut consommer les hydroxydes.

4.3 Mitigation de la dilution opérationnelle

Cette section s'intéresse à la prémisse de départ du projet : dans le cas d'une dilution opérationnelle excédentaire aux prévisions, est-il préférable de ne rien faire ou bien d'augmenter l'alimentation de l'usine pour tenter d'extraire un peu plus d'or.

Puisque la planification des expériences pour répondre à cette question n'a pas pu être suivie en raison de problèmes reliés aux échantillons provenant de la mine, des données provenant de la littérature seront utilisées. Ces données ont été tirées du travail de de Andrade Lima

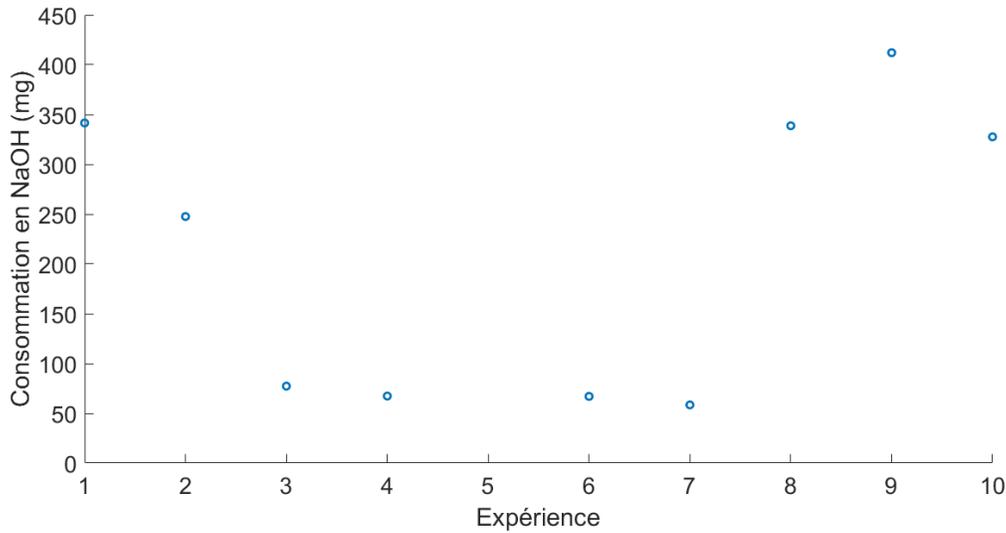


FIGURE 4.9 – Consommation du NaOH en fonction du test.

(2001) qui a accompli des tests de cyanuration pour une durée de 24 heures sur des tranches granulométriques différentes du minerai (en utilisant le minerai retenu entre deux tamis contigus). Les plages granulométriques utilisées et les résultats de cyanuration de littérature sont présentés dans le tableau 4.5.

Tableau 4.5 – Rendement par tranche granulométrique (de Andrade Lima, 2001)

Mailles	65/100	100/150	150/200	200/270	270/400	-400
diamètre moyen (μm)	177	125	88	63	44	30
Temps de cyanuration (min)	Rendement					
0	0%	0%	0%	0%	0%	0%
30	34%	60%	47%	53%	42%	46%
90	49%	66%	50%	64%	58%	75%
180	61%	58%	73%	75%	77%	87%
300	64%	68%	84%	78%	79%	89%
480	68%	78%	84%	81%	87%	91%
720	74%	79%	84%	81%	90%	91%
1440	80%	83%	85%	82%	94%	93%

Pour faire les calculs nécessaires, certaines hypothèses doivent être posées :

1. teneur en or des espèces minérales : 10 g/t pour le minerai, 2 g/t pour le stérile, 0 g/t pour le remblai ;
2. les compositions des mélanges suivent celles proposées dans le tableau 2.1 ;
3. les mélanges suivent tous la même forme de distribution granulométrique pour un P_{80}

- donné, deux niveaux sont supposés : un niveau nominal avec un P_{80} de 74 μm et un niveau compensateur avec une alimentation plus élevée résultant en un P80 plus grossier ;
4. la constante cinétique de lixiviation et la récupération après 24 h sont calculées en fonction de la proportion de chacune des tranches granulométriques pour une taille de distribution granulométrique donnée ;
 5. les indices de Bond pour les mélanges sont ceux obtenus lors de ces essais ;
 6. l'énergie fournie lors du broyage est constante et ne peut pas être augmentée ;
 7. le matériau alimentant le broyeur à boulets a toujours la même distribution granulométrique ;
 8. un temps de séjour à la cyanuration de 1440 minutes est supposé.

À partir ces différentes hypothèses, il est possible de déterminer le P_{80} de la distribution granulométrique dans le cas où l'on veut compenser le manque en or de l'alimentation. En utilisant les données des tests de Bond, on peut calculer le P_{80} à l'aide de l'expression 4.4 :

$$W_B = W_i \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right) \quad (4.4)$$

où F_{80} est la dimension du tamis laissant passer 80% de la masse d'alimentation, W_B est l'énergie fournie lors du broyage et W_i est calculé lors des tests de Bond pour chaque composition. Les résultats sont présentés dans le tableau 4.6.

4.3.1 Calcul de la récupération en fonction du temps pour les différents mélanges

Puisque les données de cinétique pour la cyanuration sont obtenues pour certaines tranches granulométriques et que les courbes de distribution granulométrique des mélanges couvrent plusieurs de ces tranches, il faut calculer le rendement pour chacun des mélanges et P_{80} en fonction du prorata du rendement de chaque tranche granulométrique.

La distribution granulométrique pour le matériau à 74 μm est connue grâce aux données des courbes de broyage mais celle-ci doit être estimée à l'aide de modèles pour les tailles de particules lors de la compensation du manque en or. Dans ces modèles, la forme de la distribution granulométrique connue est maintenue et uniquement le P_{80} est déplacé. Trois

Tableau 4.6 – Données de l'alimentation à la cyanuration en cas d'augmentation du taux d'alimentation

Composition	Indice de Bond	Teneur en or	P_{80} nominal	P_{80} effectif	Taux d'alimentation effectif
(Stérile| Remblai| Minerai)	(kWh/T)	(ppm)	(m)	(m)	(T)
0|0|100	13,93	10	74	74	1
10|15|75	12,8	7,7	74	94	1,3
10|10|80	12,99	8,2	74	88	1,22
10|5|85	13,57	8,7	74	86	1,15
20|10|70	13,01	7,4	74	101	1,35
20|5|75	13,53	7,9	74	98	1,27
20|15|65	12,76	6,9	74	108	1,45
30|5|65	13,53	7,1	74	112	1,41
30|15|55	12,43	6,1	74	122	1,64
30|10|60	13,09	6,6	74	118	1,52

équations pour modéliser la distribution granulométrique à 74 μm ont été considérées : Gates-Gaudin-Schumann (GGS) :

$$Y = \left(\frac{X}{k}\right)^m \quad (4.5)$$

Rosin-Rammler-Bennett (RRB) :

$$Y = 1 - e^{-\left(\frac{X}{X'}\right)^n} \quad (4.6)$$

Gaudin-Meloy (GM) :

$$Y = 1 - \left(1 - \frac{X}{X'}\right)^r \quad (4.7)$$

où Y est la fraction cumulative passante de particule, x est une dimension de particule, k et X' sont des paramètres que l'on peut associer à la taille moyenne des particules et finalement, m , n et r sont des exposants sans dimension associés à la forme de la courbe. L'équation proposée par Rosin-Rammler-Bennett est la meilleure pour représenter les particules fines et grossières de la distribution expérimentale.

Les résultats de cinétique de lixiviation en fonction de la composition et du P_{80} des particules sont présentés dans le tableau 4.7. Ces résultats montrent une récupération maximale de 86,3% lorsqu'il n'y a pas de dilution opérationnelle excédentaire dans l'échantillon et que le P_{80} est maintenu à la valeur nominale. Une récupération minimale de 81,6% est obtenue avec

Tableau 4.7 – Rendement et proportion de la classe granulométrique en fonction du mélange et de P_{80}

		Mélange															
		10|15|75	10|10|80	10|5|85	20|10|70	20|5|75	20|15|65	20|10|70	20|10|70	20|10|70	20|10|70	30|5|65	30|15|55	30|10|60	0|0|100		
Proportion de la classe	% -400	31%	34%	35%	28%	30%	26%	30%	26%	30%	26%	25%	22%	23%	42%		
	% 270-400	17%	18%	18%	16%	16%	15%	16%	15%	16%	15%	15%	13%	14%	20%		
	% 200-270	19%	19%	19%	18%	19%	18%	19%	18%	19%	18%	18%	17%	17%	18%		
	% 150-200	16%	15%	15%	17%	16%	17%	17%	16%	16%	17%	17%	17%	17%	12%		
	% 100-150	13%	11%	11%	15%	14%	17%	14%	14%	17%	17%	18%	20%	19%	7%		
	% 65-100	4%	3%	2%	5%	4%	6%	4%	4%	6%	7%	7%	10%	9%	1%		

		Mélange															
Temps (min)		10|15|75	10|10|80	10|5|85	20|10|70	20|5|75	20|15|65	20|10|70	20|10|70	20|10|70	20|10|70	30|5|65	30|15|55	30|10|60	0|0|100		
Rendement en fonction du temps	0	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%		
	30	48%	48%	48%	48%	48%	48%	48%	48%	48%	48%	48%	48%	48%	47%		
	90	64%	65%	65%	63%	64%	63%	64%	63%	64%	63%	62%	62%	62%	66%		
	180	76%	77%	77%	75%	76%	74%	76%	74%	76%	74%	73%	72%	73%	79%		
	300	81%	81%	82%	80%	80%	79%	80%	79%	80%	79%	79%	77%	78%	83%		
	480	85%	85%	85%	84%	84%	83%	84%	83%	84%	83%	83%	82%	82%	86%		
	720	85%	86%	86%	85%	85%	84%	85%	84%	85%	84%	84%	83%	83%	87%		
1440	88%	88%	89%	87%	88%	87%	88%	87%	88%	87%	86%	86%	86%	89%			

l'échantillon contenant le plus de dilution opérationnelle. Bien entendu, la récupération dans ces résultats n'est pas affectée par la dilution opérationnelle même, mais uniquement par l'impact d'un temps de séjour sur la distribution granulométrique à l'alimentation du circuit de cyanuration.

4.3.2 Cas 1 : Conservation des conditions d'opération nominales

En présence d'une dilution opérationnelle supérieure aux prévisions, mais en conservant les conditions d'opération nominales, on peut s'attendre à obtenir des récupérations similaires (89,5%). Cela signifie que la quantité d'or extraite est proportionnelle à la teneur à l'alimentation. Le tableau 4.8 présente les résultats de la quantité d'or extraite à la fin du procédé d'extraction par rapport au cas sans dilution opérationnelle. L'impact de cette dilution opérationnelle peut être très important comme on peut le constater avec les données présentées où une diminution de 10% peut représenter des millions de dollar.

Tableau 4.8 – Quantité d'or extraite pour des conditions nominales d'opération

Composition (Stérile|Remblai|Minerai)	Fraction de l'or extrait
0|0|100	1,00
10|15|75	0,77
10|10|80	0,82
10|5|85	0,87
20|10|70	0,74
20|5|75	0,79
20|15|65	0,69
30|5|65	0,71
30|15|55	0,61
30|10|60	0,66

4.3.3 Cas 2 : Augmentation du tonnage pour mitiger la diminution de teneur

L'augmentation du tonnage à l'alimentation a un impact négatif sur la comminution en diminuant la quantité d'énergie fournie à chaque tonne de minerai, affectant ainsi le P80, comme on peut le voir dans le tableau 4.6. Elle a également un impact négatif sur la récupération à la cyanuration en diminuant le temps de séjour et la cinétique en générale à cause de la distribution granulométrique plus grossière. L'ensemble des résultats sont présentés dans le tableau 4.9.

Tableau 4.9 – Quantité d’or extraite pour des conditions compensatoires d’opération

Composition (Stérile| Remblai| Minerai)	Facteur d’augmentation du tonnage	Impact du facteur sur la récupération			Récupération finale	Fraction de l’or extrait
		P80	Temps de séjour	Global		
0|0|100	1	1	1	1	89%	1
10|15|75	1,3	0,98	0,99	0,97	87%	0,95
10|10|80	1,22	0,99	0,99	0,98	87%	0,97
10|5|85	1,15	0,99	0,99	0,98	88%	0,97
20|10|70	1,35	0,98	0,98	0,96	86%	0,94
20|5|75	1,27	0,98	0,99	0,97	86%	0,95
20|15|65	1,45	0,97	0,98	0,95	86%	0,92
30|5|65	1,41	0,97	0,98	0,95	85%	0,92
30|15|55	1,64	0,96	0,98	0,93	83%	0,89
30|10|60	1,52	0,96	0,98	0,94	84%	0,91

En comparant les résultats de la fraction d’or extrait du premier cas de tableau 4.8 avec ceux obtenus dans le tableau 4.9, on peut voir qu’en augmentant le tonnage il est possible de mitiger grandement l’impact d’une diminution de teneur causée par une dilution opérationnelle excédentaire. Par contre, plusieurs points doivent être considérés avant d’entreprendre une telle augmentation de tonnage :

- les coûts d’exploitation sont proportionnels à la quantité de minerai sortie de la mine (il faut donc s’attendre à des coûts d’exploitation plus élevées) ;
- une consommation plus grande de réactif est également un coût supplémentaire à cette augmentation de tonnage ;
- les données disponibles ne permettent pas de tirer une conclusion au niveau de l’adsorption sur charbon activé et une diminution de la récupération à cette étape est également à prévoir ;
- il est peu probable que les pompes du concentrateur aient été dimensionnées pour des débits 20% à 60% supérieures à ceux des conditions normales ;
- les épaisseurs et les équipements pour le traitement des cyanures ne sont fort probablement pas dimensionnés pour des débits aussi élevés.

4.4 Conclusion

Ce chapitre a permis d'approfondir davantage sur de la dilution opérationnelle lors du broyage et de la cyanuration, la capacité du montage automatisé a effectuer le contrôle du pH et du cyanure et finalement, les rendements des deux séries de tests lors de la cyanuration. Les résultats associés à la mitigation de la dilution opérationnelle montrent qu'il est possible de d'augmenter le taux d'alimentation pour produire plus d'unités d'or sans trop affecter le rendement. Dans le cas du broyage, en présence d'une dilution friable, il est possible de traiter un plus grand débit massique sans affecter les résultats de broyage (P_{80}). Les essais de cyanuration ont permis d'offrir un bon contrôle. Par contre, il serait possible d'améliorer celui-ci en diminuant les incertitudes sur les mesures du pH et du cyanure.

Conclusions

Dans le cadre de ce mémoire, trois aspects principaux ont été étudiés :

1. l'impact de la dilution opérationnelle lors du broyage et de la cyanuration ;
2. l'atténuation des impacts négatifs liés à la dilution ;
3. la capacité du montage automatisé pour maintenir les consignes et prendre des échantillons lors la cyanuration de l'or

Le travail accompli a permis de répondre à plusieurs des questions mais certaines demeureront en suspend notamment pour l'impact de la dilution opérationnelle sur la cyanuration, les échantillons fournis n'étaient pas représentatifs.

En premier lieu, l'impact de la dilution opérationnelle pour le broyage a été évalué à l'aide du test de Bond pour déterminer l'indice de dureté de différents mélanges agencés de façon factorielle. Les résultats ont montré que l'impact de la dilution opérationnelle sur l'indice de Bond est proportionnel à leur quantité dans le mélange pour les deux types de dilution opérationnelle : le remblai et la roche stérile. Pour le minerai et la dilution opérationnelle considérés, l'impact de la roche stérile sur l'indice de Bond est minime et on peut conclure à des indices de Bond similaires. Dans le cas du remblai, ce matériau est beaucoup plus friable proportionnellement à sa fraction massique que le minerai et diminue l'indice de Bond.

En ce qui concerne le montage automatisé, ce dernier a permis de contrôler la concentration en cyanure libre et le niveau de pH en continu et de prendre des échantillons de solution à des intervalles donnés. Avec une électrode de pH appropriée, le contrôle du pH est très facile et précis. Pour le cyanure, l'utilisation d'une électrode pour mesurer le cyanure a permis de faire un certain contrôle. Par contre, cette technique d'analyse apporte beaucoup d'incertitude venant affecter la précision. Une technique d'analyse du cyanure par colorimétrie ou spectro-

photométrie serait plus fiable, possiblement plus rapide car elle demande moins d'étapes et est également moins coûteuse.

En utilisant des données de la littérature, la possibilité de mitiger l'impact de la dilution opérationnelle a été envisagée. Les résultats ont montrés que malgré un perte de récupération à la cyanuration, il est possible de diminuer grandement la quantité d'or manquante du à la dilution en augmentant le tonnage de l'alimentation du concentrateur. Si les résultats ne peuvent être directement extrapolés à d'autres opérations, la méthode utilisée pour l'analyse est générale et permet de prendre une décision éclairée dans un cas où la dilution excède la valeur planifiée. Par contre, les coûts additionnels pour la manutention et la gestion d'une quantité supplémentaire de minerai n'ont pas été considérés.

Ces résultats positifs devront être validés, dans le future, pour s'assurer qu'ils s'appliquent effectivement à un cas réel d'opération autant du point de vue technique que économique. Des résultats économiques positifs pourraient aider certaines mines, au prise avec des problèmes de dilution opérationnelle excédentaire, à dégager une marge de rentabilité.

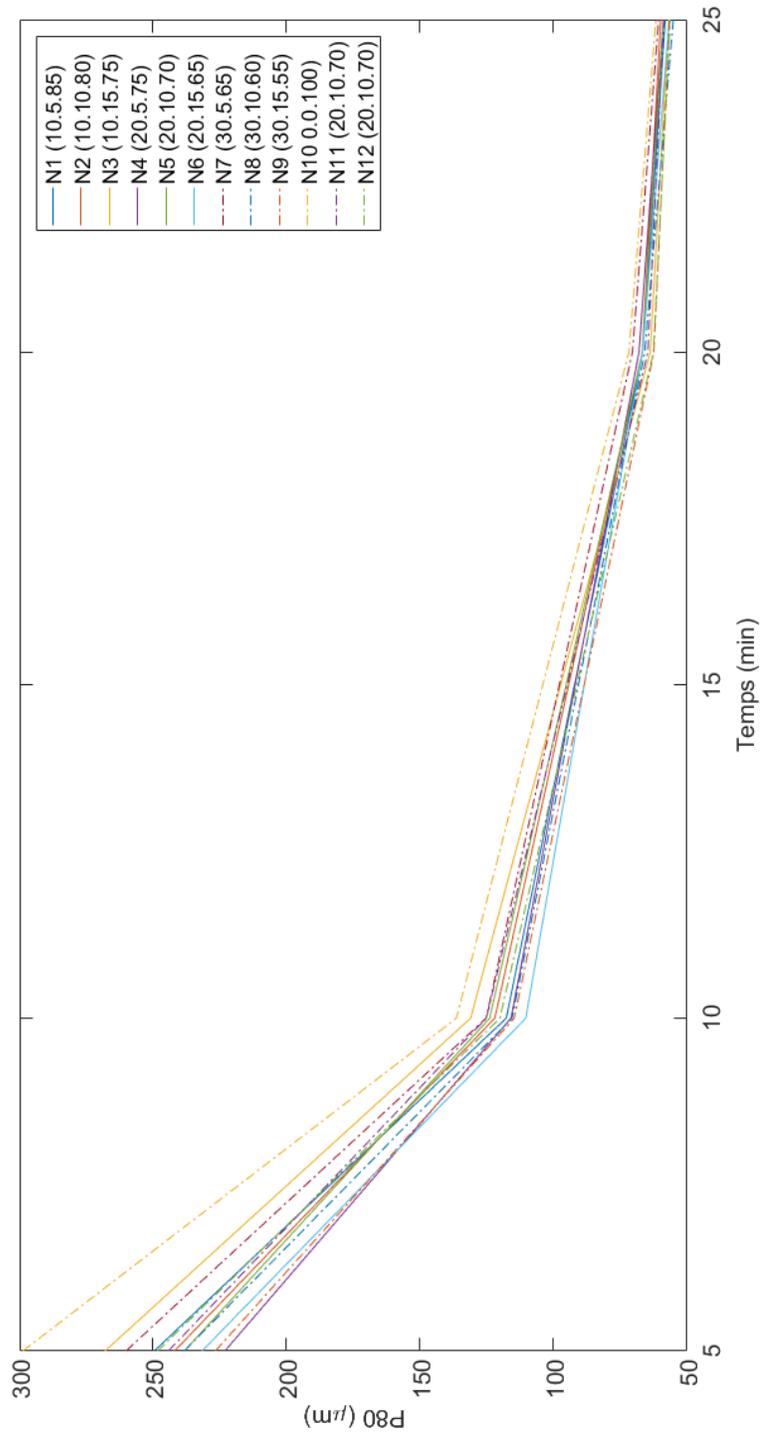
Annexe A

Courbe de broyage

Tableau A.1 – P80 en fonction du temps de broyage et selon la composition de chacun des tests (stérile.remblai.minerai)

Temps (min)	5	10	20	25
N1 (10.5.85)	249,58	117,74	66,69	58,20
N2 (10.10.80)	242,01	122,03	66,81	59,90
N3 (10.15.75)	268,05	131,08	63,83	56,91
N4 (20.5.75)	223,16	115,97	68,05	58,89
N5 (20.10.70)	238,35	123,97	66,79	58,85
N6 (20.15.65)	231,72	110,44	66,69	56,71
N7 (30.5.65)	260,19	125,28	70,52	60,66
N8 (30.10.60)	238,39	115,58	65,91	55,19
N9 (30.15.55)	226,70	114,75	62,49	56,57
N10 (0.0.100)	298,86	136,41	71,82	61,71
N11 (20.10.70)	244,29	125,23	64,72	58,77
N12 (20.10.70)	248,36	120,15	62,65	56,34

FIGURE A.1 – P80 en fonction du temps de broyage.



Annexe B

Script Lowess

Le script est fait sur Python et utilise l'algorithme Lowess de la librairie statsmodels.api. Le script lit un fichier Excel de type .xlsx et demande la colonne où doit être appliqué l'algorithme. Il produit ensuite un nouveau fichier Excel avec les nouvelles données. L'opération peut prendre plus d'une dizaine de minute en fonction de la quantité de données et du nombre de voisins utilisés. Le scripte est le suivant :

```
import pandas as pd
import numpy as np
import statsmodels.api as sm

def filtrer_data(donné) :
    #Applique un algorithme lowess pour filtrer et smoother les points de
    #données
    lowess = sm.nonparametric.lowess
    x=np.array(range(0, len(donné)))
    w = lowess(donné, x, frac=1000/len(donné), return_sorted=False)
    #frac, plus gros chiffre plus smooth (possiblement plus long)
    return w

def Data_vers_excel(table, nom_fichier) :
```

```

x=pd.DataFrame({"pH" :table})
#print(x)
x.to_excel(nom_fichier+"mod"+"xlsx", sheet_name='pHmod')

if __name__ == '__main__':
print("Nom du fichier :")
nom_fichier=input()
print("Colonne à lisser (A,B,C,etc.) :")
colonne=input()
table = pd.read_excel(nom_fichier+".xlsx", sheetname = "sheet1",
                      parse_cols = colonne,convert_float = True, na_values="#NV")
#Data_vers_excel(table , nom_fichier)
table.fillna(0, inplace=True)
x=table.as_matrix()
x=np.squeeze(np.asarray(x))
print("Filtration des données")
x=filtrer_data(x)
#print(x)
print("Création du fichier")
Data_vers_excel(x, nom_fichier)
print("fini !")

```

Annexe C

Test d'indépendance entre des variables aléatoire

En statistique, le théorème de König-Huygens pour la variance implique la propriété suivante (Hines et al., 2012) :

$$\text{Cov}(X_1, X_2) = E(X_1 X_2) - E(X_1)E(X_2) \quad (\text{C.1})$$

Si X_1 et X_2 sont indépendants, le corollaire suivant peut être inféré :

$$\text{Cov}(X_1, X_2) = 0 \quad (\text{C.2})$$

Sachant cela, en vérifiant l'indépendance entre les variables pour le calcul de la réconciliation de la concentration en cyanure, on peut s'assurer qu'il n'y aura pas de covariance associée à ce calcul. Pour ce faire, on utilise un tableau de contingence pour comparer un modèle d'indépendance hypothétique et les fréquences observées qui suivent environ une distribution du type χ^2 (Hines et al., 2012) :

$$u_0 = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c \frac{(O_{ij} - \hat{E}_{ij})^2}{\hat{E}_{ij}} \approx \chi_{(r-1)(c-1)}^2 \quad (\text{C.3})$$

Où r et c sont le nombre de niveau dans le tableau de contingence des variables à tester représentant le nombre de ligne et de colonne dans le tableau de contingence, O_{ij} sont la

fréquence observée pour le niveau i de la variable X_1 et pour le niveau j de la variable X_2 et \hat{E}_{ij} est calculé à partir de l'équation suivante :

$$\hat{E}_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^c O_{im} \sum_{k=1}^r O_{kj} \quad (\text{C.4})$$

Où n est le nombre total d'observation. On rejette l'hypothèse d'indépendance si $u_0 > \chi_{\alpha; (r-1)(c-1)}^2$.

C.1 Valeur moyenne de concentration en cyanure vs valeur moyenne précédente de concentration en cyanure

Tableau C.1 – Données à vérifier l'indépendance statistique.

	<u>X_1</u> Concentration	<u>X_2</u> Concentration moyenne	<u>X_3</u> Ajout de cyanure
Temps (min)	moyenne précédent de cyanure (ppm)	de cyanure (ppm)	(mg)
12	500,0	478,7	96,6
30	478,7	590,9	95,2
45	590,9	565,8	18,0
60	565,8	620,8	4,9
85	620,8	586,1	15,3
120	586,1	577,0	14,7
240	577,0	575,5	18,3
360	575,5	525,7	0,0
480	525,7	537,8	23,7
940	537,8	467,1	42,0
1320	467,1	524,3	35,6

Tableau C.2 – Les fréquences observées entre les deux variables.

		<u>X_2</u>					
Maillage		[467,498[	[498,528[	[528,559[	[559,590[	[590,622[	Total
X_1	[467,498[	0	1	0	0	1	2
	[498,528[	1	0	1	0	0	2
	[528,559[	1	0	0	0	0	1
	[559,590[	0	1	0	2	1	4
	[590,622[	0	0	0	2	0	2
Total		2	2	1	4	2	11

À partir de ces données, on peut calculer u_0 et $\chi_{\alpha; (r-1)(c-1)}^2$ qui sont respectivement de 19,25 et 26,29. On peut donc conclure à l'indépendance de ces deux variables au seuil de 95%.

C.2 Valeur moyenne de concentration en cyanure vs valeur moyenne de masse ajoutée de cyanure

Tableau C.3 – Les fréquences observées entre les deux variables.

		X_3				
		Maillage	[0,33[[33,65[[65,98[Total
X_2	[467,519[	0	1	1	2
	[519,570[	3	1	0	4
	[570,622[	4	0	1	5
Total		7	2	2	11	

À partir de ces données, on peut calculer u_0 et $\chi_{\alpha;(r-1)(c-1)}^2$ qui sont respectivement de 5,5 et 9,5. On peut donc conclure à l'indépendance de ces deux variables au seuil de 95%.

C.3 Valeur moyenne précédente de concentration en cyanure vs valeur moyenne de masse ajoutée de cyanure

Tableau C.4 – Les fréquences observées entre les deux variables.

		X_3			
		Maillage	[0,49[[49,98[Total
X_1	[467,545[	3	2	5
	[545,622[	6	0	6
Total		9	2	11	

À partir de ces données, on peut calculer u_0 et $\chi_{\alpha;(r-1)(c-1)}^2$ qui sont respectivement de 2,9 et 3,8. On peut donc conclure à l'indépendance de ces deux variables au seuil de 95%.

C.4 Script Matlab pour le test d'indépendance de deux variables aléatoires

```

1      %Test d'hypothèse pour vérifier l'indépendance de
      %deux variables aléatoires
2      clear,clc

```

```

3      data = xlsread('C :\Users\Math\Google Drive\Maitrise\
      Cyanuration\Independance_RD_cyanure.xlsx', 'D_moy')
      ;
4      taille_de_maille=6 ;
5      v1=1 ;
6      v2=2 ;
7      int1=[min(data( :,v1)),max(data( :,v1))+1] ;
8      int2=[min(data( :,v2)),max(data( :,v2))+1] ;
9      maillage1=int1(1) :(int1(2)-int1(1))/(taille_de_maille
      -1) :int1(2) ;
10     maillage2=int2(1) :(int2(2)-int2(1))/(taille_de_maille
      -1) :int2(2) ;
11     tableau_de_contingence=zeros(length(maillage1),length
      (maillage2)) ;
12     data(1,v1)
13     data(1,v2)
14     for i=1 :length(data( :,v1))
15     [c1 index1] = min(abs(maillage1-data(i,v1))) ;
16     [c2 index2] = min(abs(maillage2-data(i,v2))) ;
17     if maillage1(index1)>data(i,v1)
18     index1=index1-1 ;
19     end
20     if maillage2(index2)>data(i,v2)
21     index2=index2-1 ;
22     end
23     tableau_de_contingence(index1,index2)=
      tableau_de_contingence(index1,index2)+1
24     end
25     for i=1 :taille_de_maille
26     tableau_de_contingence(i,end)=sum(
      tableau_de_contingence(i,1 :taille_de_maille-1)) ;
27     tableau_de_contingence(end,i)=sum(

```

```

        tableau_de_contingence(1 :taille_de_maille-1,i));
28     end
29     tableau_de_frq_espere=zeros(length(maillage1),length(
        maillage2));
30     for i=1 :taille_de_maille-1
31     for j=1 :taille_de_maille-1
32     tableau_de_frq_espere(i,j)=tableau_de_contingence(end
        ,end)*(tableau_de_contingence(i,end)/
        tableau_de_contingence(end,end))*(
        tableau_de_contingence(end,j)/
        tableau_de_contingence(end,end));
33     end
34     end
35     for i=1 :taille_de_maille
36     tableau_de_frq_espere(i,end)=sum(
        tableau_de_frq_espere(i,1 :taille_de_maille-1));
37     tableau_de_frq_espere(end,i)=sum(
        tableau_de_frq_espere(1 :taille_de_maille-1,i));
38     end
39     u=0
40     for i=1 :taille_de_maille-1
41     for j=1 :taille_de_maille-1
42     u=u+(tableau_de_contingence(i,j)-
        tableau_de_frq_espere(i,j))^2/
        tableau_de_frq_espere(i,j);
43     end
44     end
45     u
46     chi2inv(0.95,(taille_de_maille-2)^2)

```

Annexe D

Script pour la réconciliation des données

Les scripts suivant sont ceux utilisés pour la réconciliation des données pour l'or et le cyanure. Le langage est Matlab et le principe est présenté dans la section 2.7.4.

D.1 Réconciliation pour l'or

```
1 %Réconciliation des données
2 clear,clc
3 sheet='CN-7-minerai';
4 fichier='C :\Users\Math\Google Drive\Maitrise\Cyanuration\
   Résumé.xlsx';
5 data = xlsread(fichier, sheet);
6 A=[1 -1 -1];
7 Y=[data(10,8);data(11,8);data(7,8)];
8 %=====
9 %Variance proportionnelle à la mesure (en ordre, variance sur
10 %l'alimentation, sur le rejet et finalement sur la mesure de
   l'or dans le
11 %liquide.
```

```

12 % V=[0.15 0.17 0.02]; %0.15 / 0.17 / 0.02
13 I=eye(3);
14 % V=(Y*V).^2
15 % V=I.*V
16 % V=I.*V;
17 %=====
18 %variance Fixe
19 V=[6 2 0.5].^2;
20 Z=zeros(3,3);
21 Z(1,1)=V(1);
22 Z(2,2)=V(2);
23 Z(3,3)=V(3);
24 V=Z;
25 %=====
26 yhat=Y-V*A'*inv(A*V*A')*A*Y;
27 Vhat=(I-V*A'*inv(A*V*A')*A)*V*transpose(I-V*A'*inv(A*V*A')*A)
    ;
28 yhat=[yhat; yhat(3,1)/yhat(1,1)]
29
30 Vhat=[Vhat(1,1); Vhat(2,2); Vhat(3,3)]
31 %vhat = matrix des variances pour les données réconciliées
32 %yhat = matrix des données réconciliées

```

D.2 Réconciliation pour le cyanure

```

1 %Reconcilliation du cyanure
2 %DYNAMIC DATA RECONCILIATION
3
4 clear,clc
5 sheet='CN-1-minerai';

```

```

6 fichier='C :\Users\Math\Google Drive\Maitrise\Cyanuration\
    Résumé.xlsx' ;
7 data = xlsread(fichier, sheet) ;
8
9 %Trouver le data%
10 FR=data( :,1) ;
11 Debut_Data=find(FR(35 :length(FR))==0)+35 ;
12 Fin_Data=find(FR(35 :length(FR))==max(FR(35 :length(FR))))+34 ;
13 Diff=Fin_Data-Debut_Data ;
14 %%%
15
16 t=data(Debut_Data :Fin_Data ,1) ;
17 y=data(Debut_Data :Fin_Data ,7) ;
18
19 y_model=y ;
20 t_model=t ;
21 t_model(y_model<=0)=[] ;
22 y_model(y_model<=0)=[] ;
23 y_model=log(y_model) ;
24 int_t=t(1) ;
25 for i = 2 :length(t)
26 int_t=[int_t ; t(i)-t(i-1)] ;
27 end
28 int_t=int_t.^-1 ;
29
30 e=fitlm(t_model,y_model) ;
31
32 %finalement les coefficients du modèle sont calculé dans le
    fichier excel
33 %à partir de la moyenne de tous les tests.
34 % y_model=exp(e.Coefficients{1,1}+e.Coefficients{2,1}.*t) ;
35 y_model=exp(2.386409015+-0.019787414.*t) ; %modèle de excel(

```

```

    moyenne des
36 %expériences)
37 %utilisé l'autre commande pour un model fait à partir des
    données de
38 %l'expérience
39 %voir résumé.xlsx (statistique Cn consommé)
40
41 I=eye(length(t));
42 R=(256.*ones(length(t),1))*int_t'; %(variance du modèle) 400
43 R=I.*R;
44 V=(6400.*ones(length(t),1))*int_t'; %(variance des mesures)
    6400
45 V=I.*V;
46 %Ecart-type du modèl 5x plus faible que celle des mesures
47
48 %predictor-corrector data reconciliation
49 K = inv(inv(V)+inv(R))*inv(V);
50 x = y_model + K*(y - y_model);
51
52
53 % ylim([0 5]);
54
55 final1=[t x y y_model];
56
57
58 %RECONCILIATION CONVIENTIONNEL de 'x'
59 % clear,clc
60 % sheet='CN-3-minerai';
61 % data = xlsread('C:\Users\Math\Google Drive\Maitrise\
    Cyanuration\Résumé.xlsx',sheet);
62 %Trouver le data%
63 % FR=data(:,1);

```

```

64 % Debut_Data=find(FR(35 :length(FR))==0)+35 ;
65 % Fin_Data=find(FR(35 :length(FR))==max(FR(35 :length(FR))))
    +34 ;
66 %%%
67 %arranger les données
68 d1=data(Debut_Data-1 :Fin_Data,3) ; %Mesure de cyanure
69 d2=data(Debut_Data-1 :Fin_Data,4) ; %Cyanure ajouté
70 d3=[0 ;x./int_t] ; %Cyanure consommé
71 d4=data(17 :19+Diff-1,6) ;
72 % d3=data(Debut_Data-1 :Fin_Data,5) ;
73 Y=zeros(((length(d1))-1)*4+1,1) ;
74 V=zeros(((length(d1))-1)*4+1,1) ;
75 I=eye(length(V)) ;
76 A=zeros(length(d1)-2,((length(d1))-1)*4+1) ;
77 for i=0 :length(d1)-2
78 %Matrice A
79 A(i+1,4*i+1)=1 ; %Concentration CN précédente
80 A(i+1,4*i+2)= 1 ; %CN ajouté
81 A(i+1,4*i+3) = 1 ; %effet de l'ajout du pH
82 A(i+1,4*i+4)= -1 ; %Consommation de CN
83 A(i+1,4*i+5)= -1 ; %Concentration de CN
84 end
85 Y(1)=d1(1) ;
86 V(1)= 10 ;
87 for i=0 :length(d1)-2
88 %Matrice Y (Ccn-Cnajouté-AjoutpH-CNconsom-CCNapres)
89 Y(4*i+2)=d2(i+2) ;
90 Y(4*i+3)= 0 ;
91 Y(4*i+4)=d3(i+2) ;
92 Y(4*i+5)=d1(i+2) ;
93 %Matrice V (incertitude)
94 if d2(i+2)== 0

```

```

95 V(4*i+2)=0; %CN ajouté (3)
96 else
97 V(4*i+2)= d2(i+2)*0.2; %(0.3)
98 end
99
100 if d4(i+2)== 0
101 V(4*i+3)=0; %CN ajouté par l'ajout pH
102 else
103 V(4*i+3)= 8; %(8)
104 end
105 V(4*i+4)=20; %Consommation de CN (5)
106 V(4*i+5)=150; %Concentration de CN (60)
107 end
108 V=V.^2*ones(1,length(V));
109 V=I.*V;
110 %algorithme
111 Yhat=Y-V*A'*inv(A*V*A')*A*Y;
112 Ccn=[];
113 Cnajout=[];
114 Cnconsm=[];
115 CNpH=[];
116 for i=0:length(d1)-2
117 Ccn=[Ccn; Yhat(4*i+1)];
118 Cnajout=[Cnajout; Yhat(4*i+2)];
119 CNpH=[CNpH; Yhat(4*i+3)];
120 Cnconsm=[Cnconsm; Yhat(4*i+4)];
121 end
122
123 figure(1); plot(t,x,t,y,t,y_model,t,Cnconsm.*int_t)
124 Cnajout=[0; Cnajout];
125 Cnconsm=[0; Cnconsm];
126 Ccn=[Ccn; Yhat(length(Yhat))]

```

```
127 final2=[Ccn Cnajout Cnconsm];  
128 t2=[0; t];  
129 figure(2); plot(t2,d1,t2,Ccn)
```

Annexe E

Résultats des essais préliminaires pour le calcul de l'indice de Bond

Tableau E.1 – Résultats de quelques tests préliminaires pour le test de l'indice de Bond

Test	WI (kWh/t)	P80 (μm)	F80 (μm)	Gbp (g/tour)
1	13,01	116,84	745,10	2,23
2	11,91	111,13	799,62	2,31
3	12,48	116,83	817,99	2,27
4	13,02	116,96	789,49	2,18
Écart-type	0,53	2,87	30,97	0,06
Moyenne	12,61	115,44	788,05	2,25

Annexe F

Composition chimique du minerai et du stérile

Tableau F.1 – Composition chimique du minerai et du stérile obtenu à l'aide d'un XRF et de poudres non-compressés des matériaux.

	Stérile		Minerai			Stérile		Minerai	
Al ₂ O ₃	6,499	%	11,087	%	Sr	0,112	%	0,119	%
SiO ₂	51,486	%	24,872	%	Y	595,1	ppm	533,7	ppm
P ₂ O ₅	0,27	%	0,254	%	Zr	0,361	%	0,301	%
SO ₃	2,872	%	5,238	%	Nb	810,6	ppm	307,1	ppm
Cl	0,15	%	808,9	ppm	Sn	0,519	%	0,419	%
K ₂ O	1,7	%	4,497	%	Te	4,59	%	0,804	%
CaO	1,8	%	2,776	%	W	2,059	%	0,491	%
Ti	0,374	%	0,891	%	Hg	73,7	ppm	0	ppm
V	297,8	ppm	530,2	ppm	Pb	382,4	ppm	374,2	ppm
Cr	112,1	ppm	329,4	ppm	Bi	976,6	ppm	0	ppm
Mn	0,868	%	0,474	%	Th	311,7	ppm	0	ppm
Fe ₂ O ₃	19,27	%	39,683	%	Re	0	ppm	0	ppm
Cu	5,89	%	0,967	%	Au	0,5	%	168,4	ppm
Zn	0,174	%	761,1	ppm	Ni	0	ppm	476,7	ppm
Ge	315,7	ppm	0	ppm	Ga	0	ppm	86,6	ppm
As	0	ppm	0	ppm	Se	0	ppm	69,9	ppm
Rb	0,117	%	0,198	%	Ba	0	ppm	6,486	%
					Os	0	ppm	0	ppm

Annexe G

Résultats de cyanuration

G.1 Essai 1-1

Tableau G.1 – Mesure de la concentration en or dans la solution cyanurée

Temps d'échantillonnage (min)	Concentration en or brute (ppm)	Concentration ajusté pour l'or enlevé, l'évaporation et l'ajout de liquide (ppm)
30	7,05	7,05
60	11,73	11,87
120	14,16	14,62
240	17,92	18,65
480	23,46	24,28
960	24,83	25,78
1440	24,56	25,65

Tableau G.2 – Concentration en or brute et réconciliée

	Teneur en or	Teneur réconciliée
Alimentation	31	32,45
Rejet	6,91	6,82
Solution finale	25,65	25,63

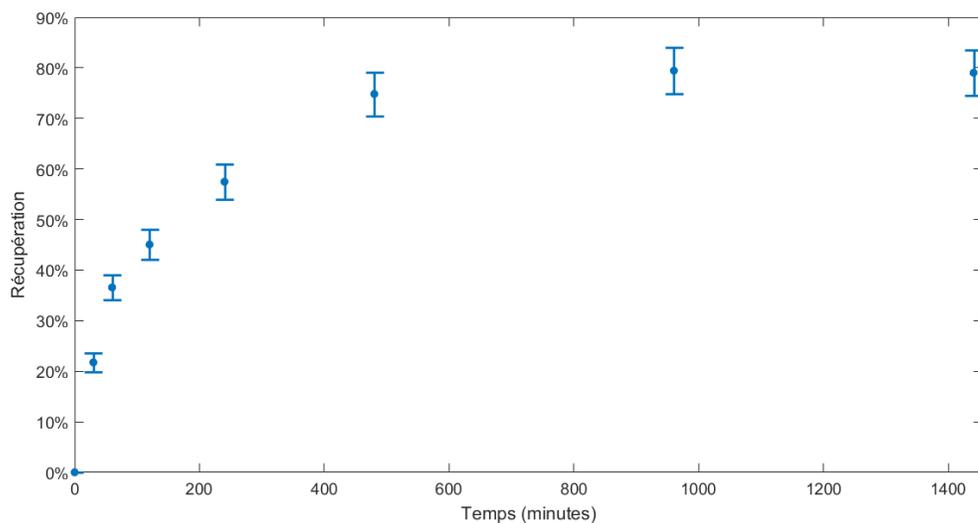


FIGURE G.1 – Récupération de l'or en solution en fonction du temps

Tableau G.3 – Données brutes de la mesure du cyanure

Temps (min)	Masse de CN en solution (mg)	CN ajouté dans l'intervall précédent (mg)	Consommation de CN (mg)	Volume de solution (ml)	Concentration de CN (ppm)
0	891,0	0,0	0,0	1781,9	500,0
15	793,2	0,0	97,7	1779,9	445,6
30	725,3	0,0	67,9	1752,5	413,9
45	817,2	4,5	-87,4	1780,1	459,1
60	882,9	0,0	-65,7	1737,4	508,2
90	830,6	0,0	52,3	1779,9	466,7
120	857,6	0,0	-27,0	1749,2	490,3
240	747,3	0,0	110,3	1772,4	421,7
480	650,7	0,0	96,6	1776,0	366,4
960	604,2	25,6	72,1	1777,9	339,8
1440	487,8	35,8	152,2	1776,9	274,5

Tableau G.4 – Données réconciliées de la mesure du cyanure

Temps (min)	Masse de CN en solution (mg)	CN ajouté dans l'intervall précédent (mg)	Consommation de CN (mg)	Concentration de CN (ppm)	Consommation par minute (mg/min)
0	895,38	0,00	0,00	502,49	0,00
15	792,80	0,00	102,58	445,42	6,84
30	721,30	0,00	71,51	411,58	4,77
45	682,45	4,51	43,36	383,36	2,89
60	652,39	0,00	30,06	375,50	2,00
90	608,69	0,00	43,70	341,98	1,46
120	587,76	0,00	20,93	336,01	0,70
240	575,07	0,00	12,69	324,46	0,11
480	570,42	0,00	4,55	321,19	0,02
960	590,67	25,42	4,84	332,23	0,01
1440	617,62	35,48	8,16	347,57	0,02

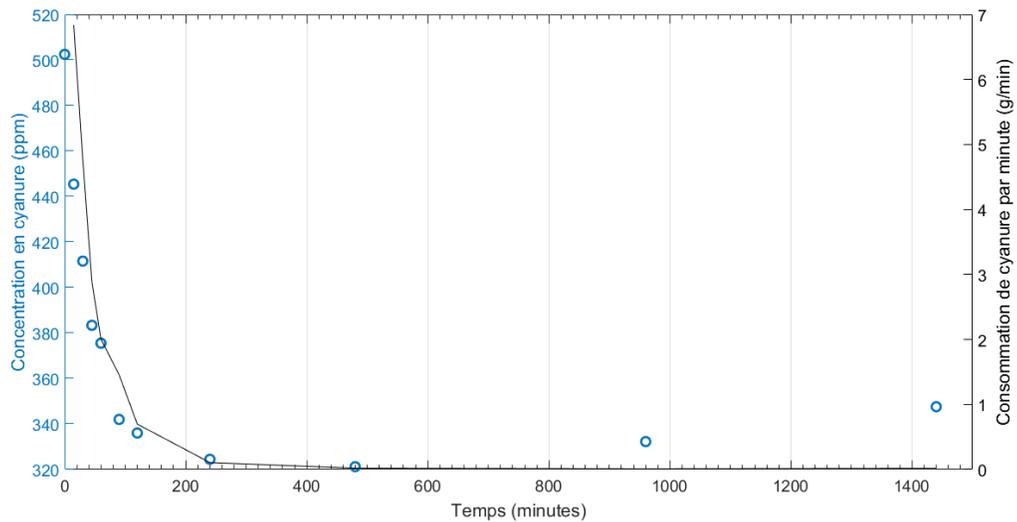


FIGURE G.2 – Concentration (points bleus) et taux de consommation (ligne noire) du cyanure en fonction du temps

G.2 Essai 1-2

Tableau G.5 – Mesure de la concentration en or dans la solution cyanurée

Temps d'échantillonnage (min)	Concentration en or brute (ppm)	Concentration ajusté pour l'or enlevé, l'évaporation et l'ajout de liquide (ppm)
30	6,58	6,58
60	9,42	9,57
120	12,42	12,47
240	17,77	16,85
480	20,79	19,98
960	21,66	21,74
1440	20,40	21,08

Tableau G.6 – Concentration en or brute et réconciliée

	Teneur en or (ppm)	Teneur réconciliée (ppm)
Alimentation	27,7	30,06
Rejet	9,34	9,00
Solution finale	21,08	21,06

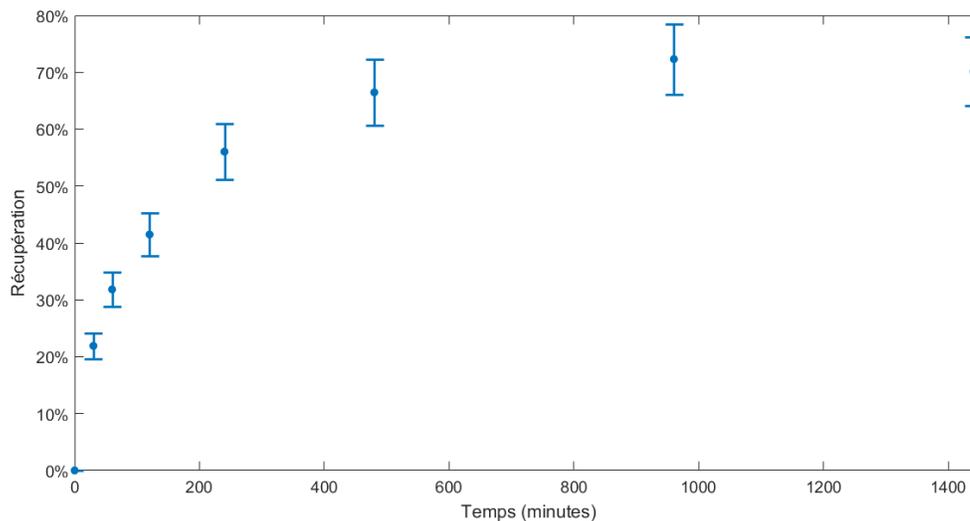


FIGURE G.3 – Récupération de l'or en solution en fonction du temps

Tableau G.7 – Données brutes de la mesure du cyanure

Temps (min)	Masse de CN en solution (mg)	CN ajouté dans l'intervall précédant (mg)	Consommation de CN (mg)	Volume de solution (ml)	Concentration de CN (ppm)
0	894,2	0,0	0,0	1788,4	500,0
15	559,4	0,0	334,8	1786,4	313,1
30	861,3	192,0	-110,0	1763,0	488,6
45	888,1	15,8	-10,9	1762,3	503,9
60	804,7	0,0	83,4	1728,8	465,4
90	806,4	40,1	38,4	1729,0	466,4
120	779,3	38,7	65,8	1712,3	455,1
240	890,4	47,3	-63,8	1708,7	521,1
480	612,7	0,0	277,6	1703,1	359,8
960	614,3	144,7	143,1	1705,6	360,2
1440	551,1	149,0	212,2	1706,7	322,9

Tableau G.8 – Données réconciliées de la mesure du cyanure

Temps (min)	Masse de CN en solution (mg)	CN ajouté dans l'intervall précédant (mg)	Consommation de CN (mg)	Concentration de CN (ppm)	Consommation par minute (mg/min)
0	892,41	0,00	0,00	499,00	0,00
15	755,82	0,00	136,59	423,10	9,11
30	847,70	178,52	86,05	480,82	5,74
45	794,88	15,66	67,86	451,05	4,52
60	737,38	0,00	56,61	426,54	3,77
90	715,33	39,03	61,08	413,73	2,04
120	712,68	37,43	40,09	416,22	1,34
240	738,33	45,15	17,97	432,10	0,15
480	713,24	0,00	23,12	418,80	0,10
960	818,38	122,78	15,97	479,83	0,03
1440	936,09	133,81	15,01	548,47	0,03

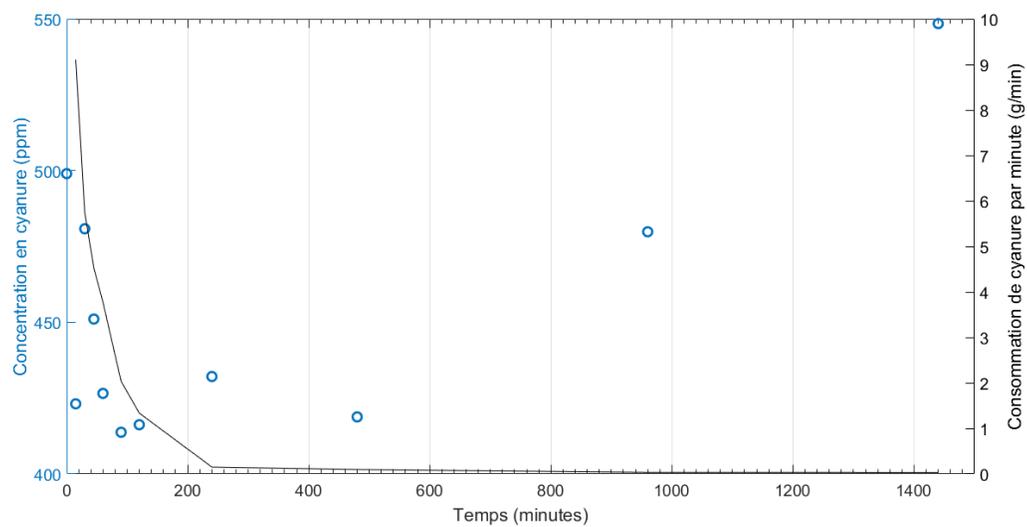


FIGURE G.4 – Concentration (points bleus) et taux de consommation (ligne noir) du cyanure en fonction du temps

G.3 Essai 1-3

Tableau G.9 – Mesure de la concentration en or dans la solution cyanurée

Temps d'échantillonnage (min)	Concentration en or brute (ppm)	Concentration ajusté pour l'or enlevé, l'évaporation et l'ajout de liquide (ppm)
30	5,43	5,43
60	7,25	7,28
120	10,47	10,55
240	13,33	13,47
480	16,26	16,48
960	16,81	17,13
1440	17,12	17,54

Tableau G.10 – Concentration en or brute et réconciliée

	Teneur en or (ppm)	Teneur réconciliée (ppm)
Alimentation	31,1	31,76
Rejet	14,4	14,22
Solution finale	17,54	17,54

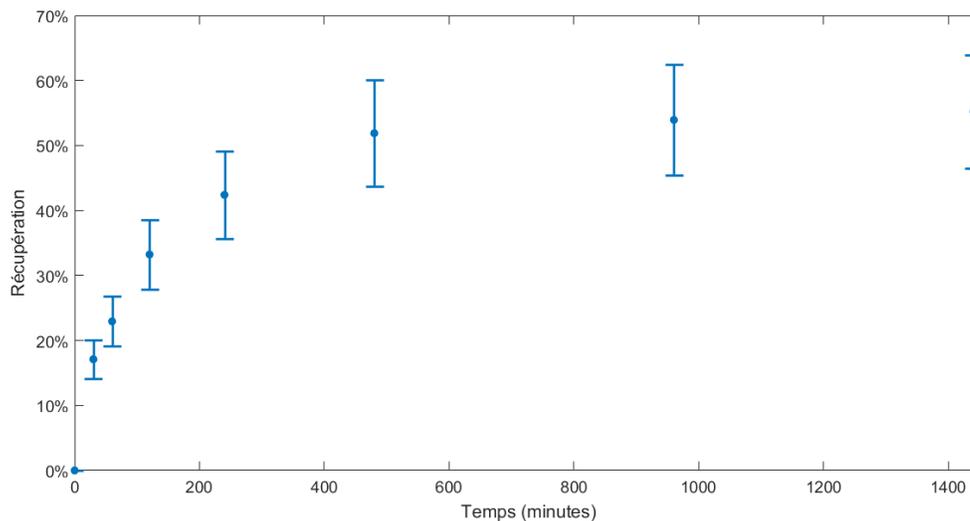


FIGURE G.5 – Récupération de l'or en solution en fonction du temps

Tableau G.11 – Données brutes de la mesure du cyanure

Temps (min)	Masse de CN en solution (mg)	CN ajouté dans l'intervall précédent (mg)	Consommation de CN (mg)	Volume de solution (ml)	Concentration de CN (ppm)
0	890,8	0,0	0,0	1781,6	500,0
15	755,8	0,0	135,0	1782,6	424,0
30	928,6	35,8	-137,0	1775,6	523,0
45	1025,7	0,0	-97,1	1779,6	576,4
60	899,9	0,0	125,8	1772,6	507,7
90	1038,0	0,0	-138,1	1779,6	583,3
120	991,1	0,0	46,8	1772,6	559,1
240	828,2	17,2	180,2	1775,5	466,5
360	876,0	0,0	-47,8	1781,5	491,7
480	770,1	5,1	111,0	1774,4	434,0
720	699,2	31,9	102,8	1783,1	392,1
960	930,3	50,5	-180,6	1776,5	523,7
1200	782,5	0,0	147,8	1780,6	439,5

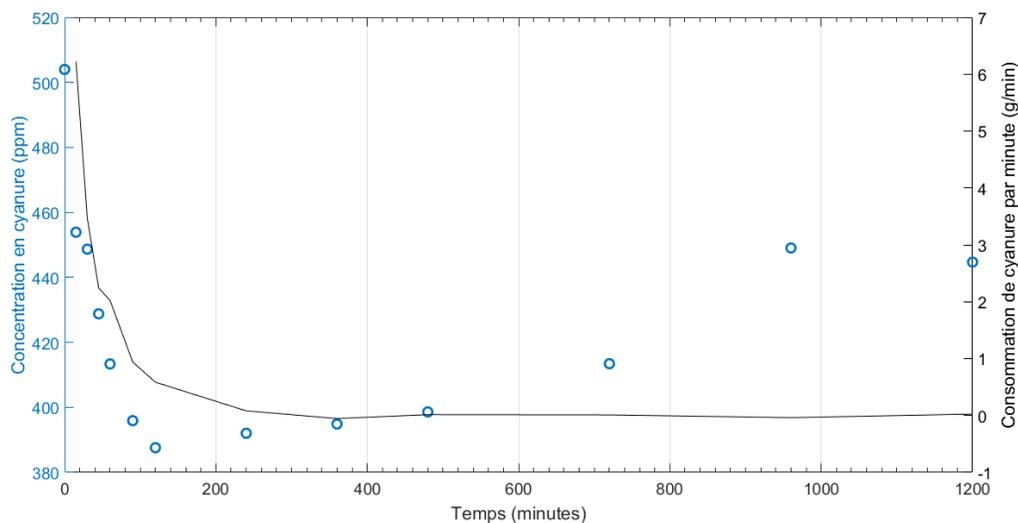


FIGURE G.6 – Concentration (points bleus) et taux de consommation (ligne noire) du cyanure en fonction du temps

Tableau G.12 – Données réconciliées de la mesure du cyanure

Temps (min)	Masse de CN en solution (mg)	CN ajouté dans l'interval précédant (mg)	Consommation de CN (mg)	Concentration de CN (ppm)	Consommation par minute (mg/min)
0	897,90	0,00	0,00	503,99	0,00
15	809,11	0,00	93,33	453,89	6,22
30	796,66	39,53	51,99	448,68	3,47
45	763,04	0,00	33,62	428,77	2,24
60	732,71	0,00	30,33	413,36	2,02
90	704,55	0,00	28,16	395,91	0,94
120	687,01	0,00	17,54	387,57	0,58
240	696,03	17,49	9,75	392,02	0,08
360	703,47	0,00	-6,53	394,87	-0,05
480	707,28	5,12	1,73	398,60	0,01
720	737,18	32,10	2,44	413,43	0,01
960	797,70	51,03	-9,14	449,04	-0,04
1200	791,82	0,00	5,85	444,70	0,02

G.4 Essai 1-4

Tableau G.13 – Mesure de la concentration en or dans la solution cyanurée

Temps d'échantillonnage (min)	Concentration en or brute (ppm)	Concentration ajusté pour l'or enlevé, l'évaporation et l'ajout de liquide (ppm)
30	5,26	5,26
60	7,68	7,33
120	11,17	10,72
240	14,09	13,62
480	16,43	16,10
960	16,70	16,79
1440	17,27	17,77

Tableau G.14 – Concentration en or brute et réconciliée

	Teneur en or (ppm)	Teneur réconciliée (ppm)
Alimentation	24,7	26,55
Rejet	9,12	8,80
Solution finale	17,77	17,75

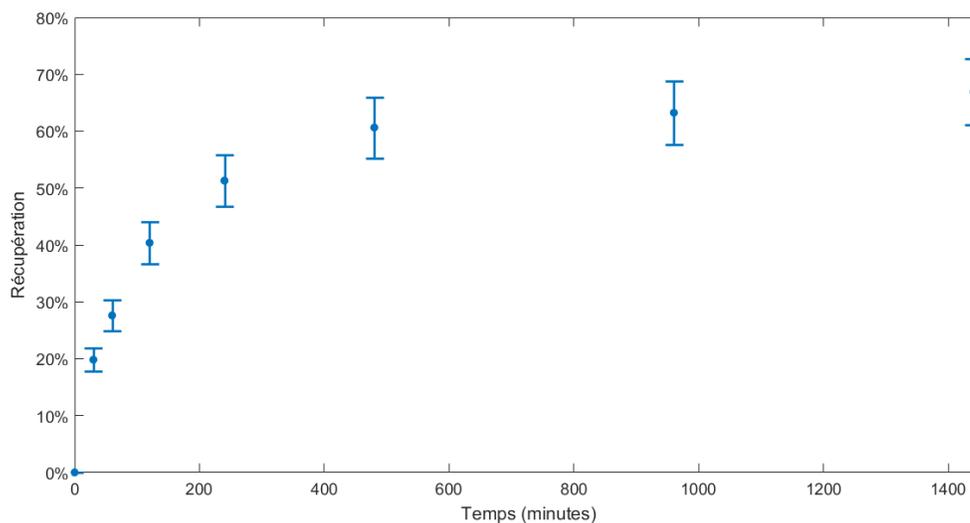


FIGURE G.7 – Récupération de l'or en solution en fonction du temps

Tableau G.15 – Données brutes de la mesure du cyanure

Temps (min)	Masse de CN en solution (mg)	CN ajouté dans l'intervall précédant (mg)	Consommation de CN (mg)	Volume de solution (ml)	Concentration de CN (ppm)
0	911,0	0,0	0,0	1822,0	500,0
20	593,8	206,4	523,6	1831,5	324,2
30	940,2	333,5	-12,9	1832,0	513,2
45	1038,1	59,1	-38,8	1823,3	569,4
60	1015,6	0,0	22,6	1813,5	560,0
90	1003,2	88,7	101,1	1824,9	549,7
120	1010,6	28,5	21,1	1815,1	556,8
240	1004,8	118,3	124,1	1820,1	552,1
480	1040,9	113,9	77,8	1819,8	572,0
960	984,0	29,6	86,5	1815,1	542,1
1440	1193,2	21,9	-187,2	1814,7	657,5

Tableau G.16 – Données réconciliées de la mesure du cyanure

Temps (min)	Masse de CN en solution (mg)	CN ajouté dans l'intervall précédant (mg)	Consommation de CN (mg)	Concentration de CN (ppm)	Consommation par minute (mg/min)
0	907,55	0,00	0,00	498,10	0,00
20	880,37	147,56	174,73	480,69	8,74
30	1050,88	236,49	65,98	573,62	6,60
45	1038,02	56,77	69,64	569,31	4,64
60	982,55	0,00	55,47	541,80	3,70
90	1001,39	82,93	64,08	548,73	2,14
120	991,89	27,88	37,38	546,47	1,25
240	1076,03	107,49	23,35	591,20	0,19
480	1171,95	105,54	9,62	643,99	0,04
720	1193,85	29,21	7,30	655,37	0,03
1200	1222,52	21,88	-6,78	671,26	-0,01

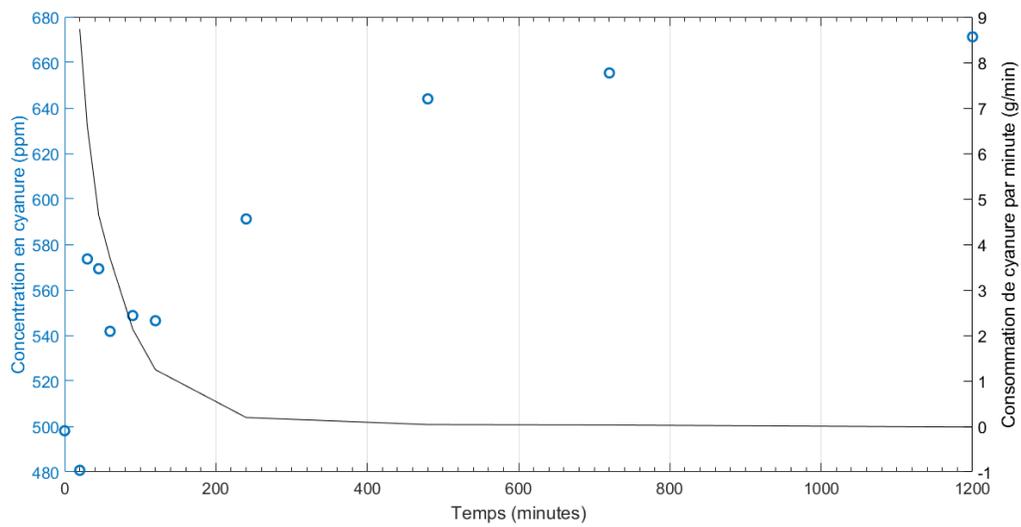


FIGURE G.8 – Concentration (points bleus) et taux de consommation (ligne noir) du cyanure en fonction du temps

G.5 Essai 1-5

Tableau G.17 – Mesure de la concentration en or dans la solution cyanurée

Temps d'échantillonnage (min)	Concentration en or brute (ppm)	Concentration ajusté pour l'or enlevé, l'évaporation et l'ajout de liquide (ppm)
30	4,12	4,12
60	5,84	5,85
120	8,69	8,32
240	10,61	10,25
480	12,30	12,06
960	13,31	13,40
1440	13,62	14,08

Tableau G.18 – Concentration en or brute et réconciliée

	Teneur en or (ppm)	Teneur réconciliée (ppm)
Alimentation	35,8	26,26
Rejet	11	12,16
Solution finale	14,08	14,10

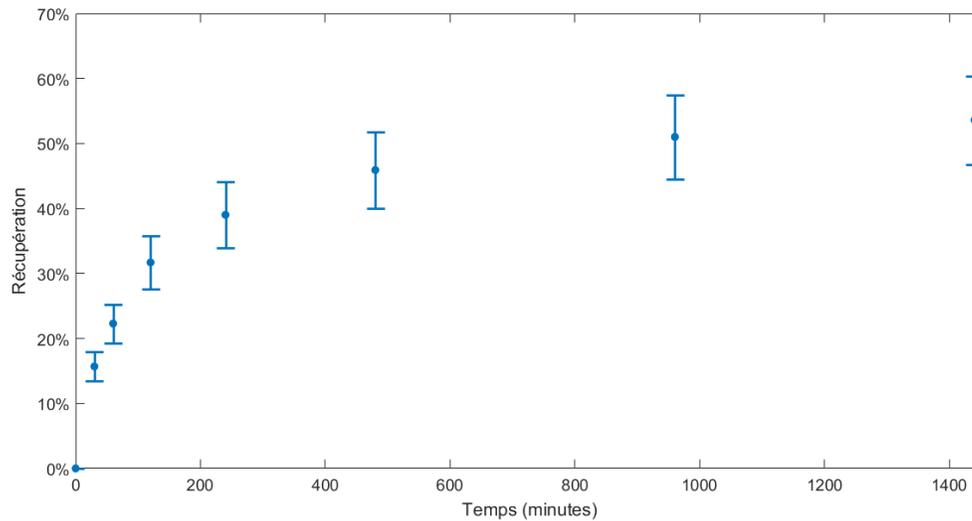


FIGURE G.9 – Récupération de l'or en solution en fonction du temps

Tableau G.19 – Données brutes de la mesure du cyanure

Temps (min)	Masse de CN en solution (mg)	CN ajouté dans l'intervall précédent (mg)	Consommation de CN (mg)	Volume de solution (ml)	Concentration de CN (ppm)
0	881,0	0,0	0,0	1762,0	500,0
10	546,2	123,2	458,0	1766,8	309,2
35	1031,6	321,7	-163,7	1782,7	578,7
45	869,4	82,6	244,8	1785,3	487,0
60	1204,2	49,3	-285,6	1779,5	676,7
90	1208,9	24,6	19,9	1778,9	679,6
120	1191,5	0,0	17,5	1770,4	673,0
240	1142,7	0,0	48,7	1761,9	648,6
360	1052,7	0,0	90,0	1759,9	598,2
480	1298,2	0,0	-245,5	1751,4	741,2
720	1096,5	0,0	201,6	1749,4	626,8
960	1742,6	0,0	-646,1	1740,9	1001,0
1440	1313,7	0,0	429,0	1732,4	758,3

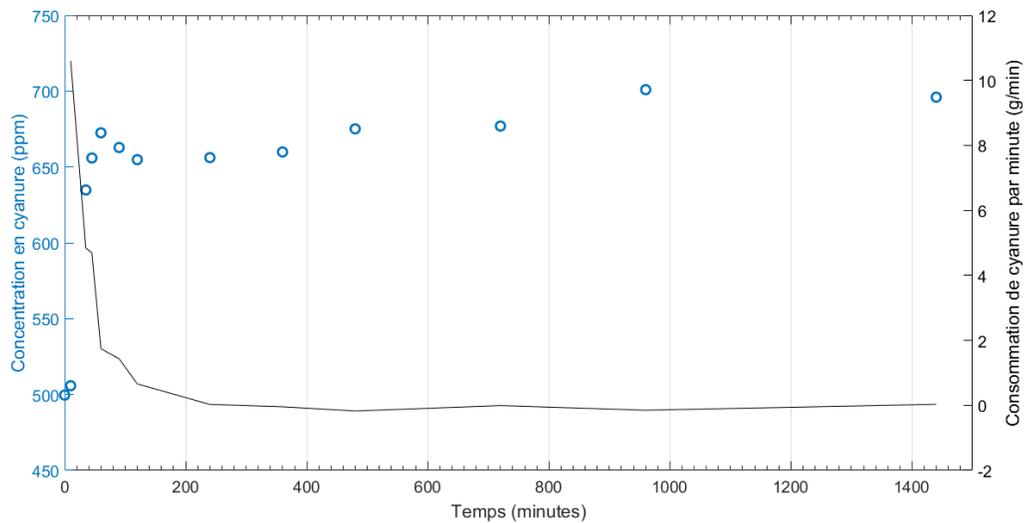


FIGURE G.10 – Concentration (points bleus) et taux de consommation (ligne noire) du cyanure en fonction du temps

Tableau G.20 – Données réconciliées de la mesure du cyanure

Temps (min)	Masse de CN en solution (mg)	CN ajouté dans l'interval précédant (mg)	Consommation de CN (mg)	Concentration de CN (ppm)	Consommation par minute (mg/min)
0	880,36	0,00	0,00	499,64	0,00
10	893,68	119,30	105,98	505,80	10,60
35	1131,79	359,00	120,88	634,87	4,84
45	1171,11	86,26	46,95	655,97	4,70
60	1196,89	51,89	26,11	672,58	1,74
90	1179,17	25,28	43,00	662,86	1,43
120	1159,40	0,00	19,77	654,88	0,66
240	1156,18	0,00	3,22	656,21	0,03
360	1161,46	0,00	-5,29	659,96	-0,04
480	1182,51	0,00	-21,04	675,17	-0,18
720	1184,39	0,00	-1,88	677,02	-0,01
960	1220,44	0,00	-36,05	701,03	-0,15
1440	1205,85	0,00	14,58	696,05	0,03

G.6 Essai 2-1

Tableau G.21 – Mesure de la concentration en or dans la solution cyanurée

Temps d'échantillonnage (min)	Concentration en or brute (ppm)	Concentration ajusté pour l'or enlevé, l'évaporation et l'ajout de liquide (ppm)
30	4,97	4,96
60	7,50	7,53
120	8,99	9,07
240	14,27	13,73
480	17,52	17,07
960	18,72	18,74
1320	18,48	18,86

Tableau G.22 – Concentration en or brute et réconciliée

	Teneur en or (ppm)	Teneur réconciliée (ppm)
Alimentation	23,15	25,52
Rejet	9,56	6,69
Solution finale	18,86	18,84

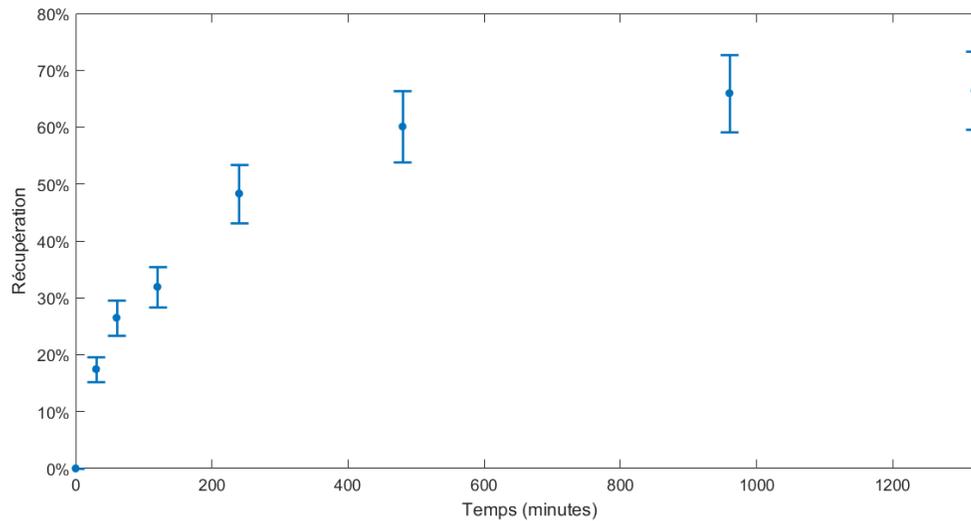


FIGURE G.11 – Récupération de l'or en solution en fonction du temps

Tableau G.23 – Données brutes de la mesure du cyanure

Temps (min)	Masse de CN en solution (mg)	CN ajouté dans l'intervall précédent (mg)	Consommation de CN (mg)	Volume de solution (ml)	Concentration de CN (ppm)
0	900,0	0,0	0,0	1800,0	500,0
10	1046,2	172,5	26,3	1807,6	578,8
30	1251,1	0,0	-204,9	1798,6	695,6
45	1078,2	0,0	172,9	1796,6	600,1
60	1018,3	0,0	59,8	1787,6	569,7
80	958,5	0,0	59,9	1785,6	536,8
120	958,4	0,0	0,0	1776,6	539,5
180	903,0	0,0	55,5	1774,6	508,8
240	1038,0	0,0	-135,0	1766,4	587,6
360	842,4	0,0	195,5	1764,4	477,5
480	1004,0	0,0	-161,6	1756,4	571,6
960	875,6	0,0	128,4	1748,4	500,8
1320	723,6	0,0	152,0	1740,4	415,8

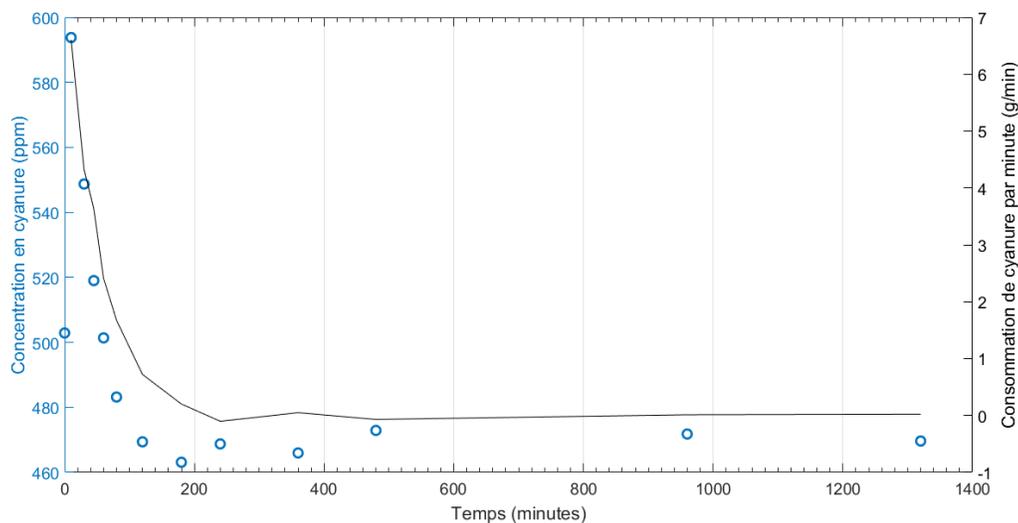


FIGURE G.12 – Concentration (points bleus) et taux de consommation (ligne noire) du cyanure en fonction du temps

Tableau G.24 – Données réconciliées de la mesure du cyanure

Temps (min)	Masse de CN en solution (mg)	CN ajouté dans l'interval précédant (mg)	Consommation de CN (mg)	Concentration de CN (ppm)	Consommation par minute (mg/min)
0	905,19	0,00	0,00	502,88	0,00
10	1073,33	234,20	66,06	593,79	6,61
30	986,94	0,00	86,39	548,73	4,32
45	932,44	0,00	54,50	519,01	3,63
60	896,23	0,00	36,21	501,37	2,41
80	862,76	0,00	33,48	483,18	1,67
120	833,90	0,00	28,85	469,39	0,72
180	821,81	0,00	12,09	463,10	0,20
240	827,98	0,00	-6,17	468,75	-0,10
360	822,13	0,00	5,85	465,96	0,05
480	830,57	0,00	-8,44	472,89	-0,07
960	824,87	0,00	5,70	471,79	0,01
1320	817,35	0,00	7,52	469,64	0,02

G.7 Essai 2-2

Tableau G.25 – Mesure de la concentration en or dans la solution cyanurée

Temps d'échantillonnage (min)	Concentration en or brute (ppm)	Concentration ajusté pour l'or enlevé, l'évaporation et l'ajout de liquide (ppm)
30	6,50	6,48
60	10,16	10,19
120	14,11	14,17
240	17,30	17,50
480	21,93	21,35
960	22,66	22,72
1320	23,22	23,73

Tableau G.26 – Concentration en or brute et réconciliée

	Teneur en or (ppm)	Teneur réconciliée (ppm)
Alimentation	23,5	30,31
Rejet	7,62	6,70
Solution finale	23,73	23,61

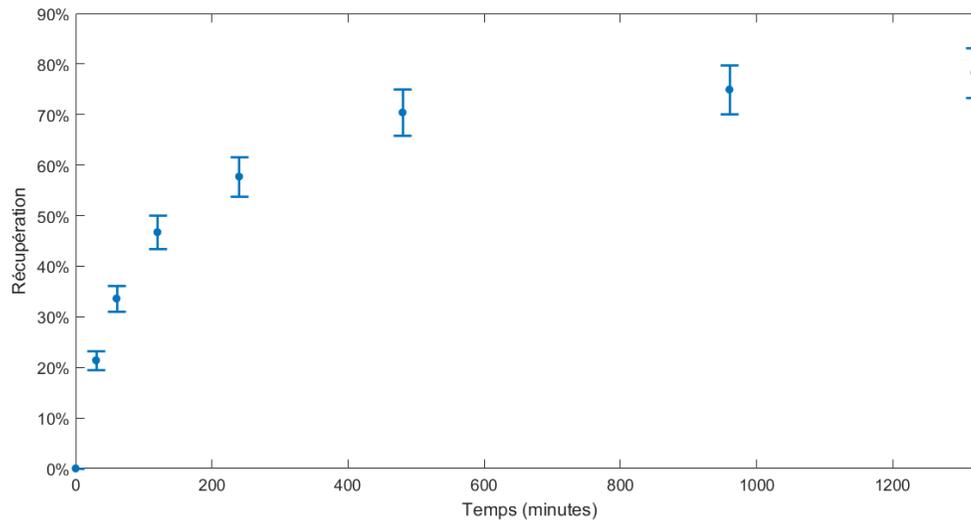


FIGURE G.13 – Récupération de l'or en solution en fonction du temps

Tableau G.27 – Données brutes de la mesure du cyanure

Temps (min)	Masse de CN en solution (mg)	CN ajouté dans l'intervall précédent (mg)	Consommation de CN (mg)	Volume de solution (ml)	Concentration de CN (ppm)
0	900,0	0,0	0,0	1800,0	500,0
10	1124,5	147,8	-76,7	1806,2	622,6
30	1352,2	0,0	-227,7	1797,2	752,4
45	1040,4	0,0	311,9	1795,2	579,5
60	1462,0	0,0	-421,6	1785,7	818,7
80	1201,4	0,0	260,6	1783,7	673,5
120	1201,2	79,4	79,6	1779,4	675,1
180	1174,5	0,0	26,7	1777,4	660,8
240	1329,8	0,0	-155,3	1768,5	752,0
360	1054,2	0,0	275,7	1766,5	596,8
480	1088,2	0,0	-34,0	1758,6	618,8
960	845,4	0,0	242,8	1750,4	483,0
1320	829,1	0,0	16,3	1741,9	476,0

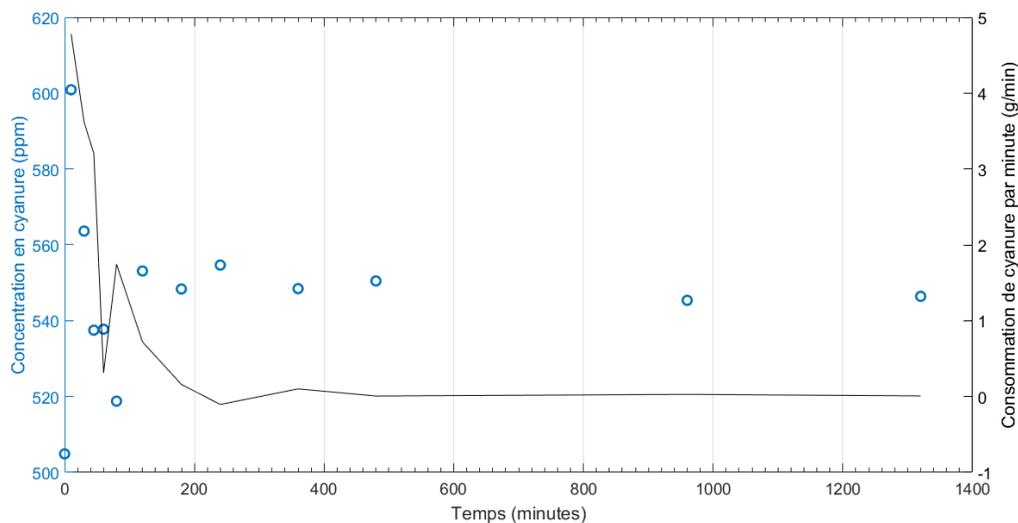


FIGURE G.14 – Concentration (points bleus) et taux de consommation (ligne noire) du cyanure en fonction du temps

Tableau G.28 – Données réconciliées de la mesure du cyanure

Temps (min)	Masse de CN en solution (mg)	CN ajouté dans l'interval précédant (mg)	Consommation de CN (mg)	Concentration de CN (ppm)	Consommation par minute (mg/min)
0	908,76	0,00	0,00	504,87	0,00
10	1085,39	224,43	47,80	600,92	4,78
30	1012,98	0,00	72,40	563,64	3,62
45	964,92	0,00	48,06	537,50	3,20
60	960,26	0,00	4,66	537,75	0,31
80	925,35	0,00	34,91	518,78	1,75
120	984,19	87,68	28,84	553,11	0,72
180	974,64	0,00	9,55	548,36	0,16
240	980,92	0,00	-6,27	554,67	-0,10
360	968,84	0,00	12,08	548,46	0,10
480	968,06	0,00	0,77	550,48	0,01
960	954,60	0,00	13,46	545,37	0,03
1320	951,80	0,00	2,81	546,42	0,01

G.8 Essai 2-3

Tableau G.29 – Mesure de la concentration en or dans la solution cyanurée

Temps d'échantillonnage (min)	Concentration en or brute (ppm)	Concentration ajusté pour l'or enlevé, l'évaporation et l'ajout de liquide (ppm)
30	5,51	5,51
60	8,61	8,65
120	15,39	14,62
240	20,43	19,52
480	23,36	22,72
960	23,74	23,82
1320	22,69	23,17

Tableau G.30 – Concentration en or brute et réconciliée

	Teneur en or (ppm)	Teneur réconciliée (ppm)
Alimentation	21,6	28,78
Rejet	6,63	5,76
Solution finale	23,17	23,02

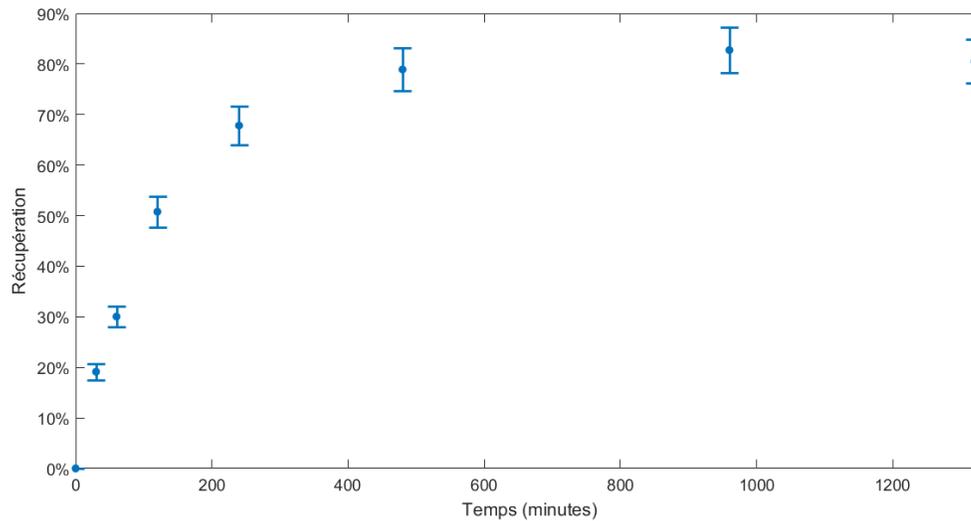


FIGURE G.15 – Récupération de l'or en solution en fonction du temps

Tableau G.31 – Données brutes de la mesure du cyanure

Temps (min)	Masse de CN en solution (mg)	CN ajouté dans l'intervall précédent (mg)	Consommation de CN (mg)	Volume de solution (ml)	Concentration de CN (ppm)
0	896,0	0,0	0,0	1792,0	500,0
10	1154,6	137,3	-121,2	1797,6	642,3
30	1166,9	34,5	22,2	1790,7	651,6
45	971,9	0,0	195,0	1788,7	543,3
60	1144,4	0,0	-172,6	1780,2	642,9
80	998,8	0,0	145,7	1780,8	560,9
120	1060,6	0,0	-61,8	1774,5	597,7
180	1046,8	0,0	13,8	1774,2	590,0
240	995,9	0,0	50,9	1768,8	563,1
360	916,6	0,0	79,3	1768,8	518,2
480	915,6	0,0	1,0	1765,3	518,7
960	715,6	169,3	369,3	1770,7	404,1
1320	1025,6	0,0	-310,0	1764,0	581,4

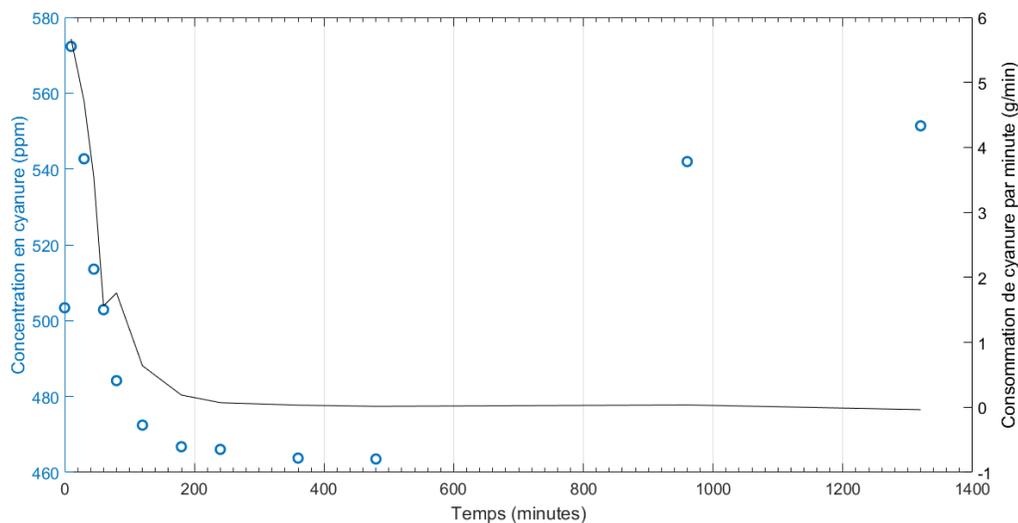


FIGURE G.16 – Concentration (points bleus) et taux de consommation (ligne noire) du cyanure en fonction du temps

Tableau G.32 – Données réconciliées de la mesure du cyanure

Temps (min)	Masse de CN en solution (mg)	CN ajouté dans l'interval précédant (mg)	Consommation de CN (mg)	Concentration de CN (ppm)	Consommation par minute (mg/min)
0	902,11	0,00	0,00	503,41	0,00
10	1028,86	183,44	56,69	572,34	5,67
30	971,84	37,14	94,16	542,70	4,71
45	918,70	0,00	53,15	513,60	3,54
60	895,28	0,00	23,42	502,89	1,56
80	862,23	0,00	35,19	484,19	1,76
120	838,36	0,00	25,61	472,45	0,64
180	828,12	0,00	11,36	466,75	0,19
240	824,32	0,00	4,30	466,05	0,07
360	820,31	0,00	4,02	463,75	0,03
480	818,24	0,00	1,80	463,52	0,02
960	959,64	159,55	17,60	541,97	0,04
1320	972,66	0,00	-12,87	551,40	-0,04

G.9 Essai 2-4

Tableau G.33 – Mesure de la concentration en or dans la solution cyanurée

Temps d'échantillonnage (min)	Concentration en or brute (ppm)	Concentration ajusté pour l'or enlevé, l'évaporation et l'ajout de liquide (ppm)
30	8,00	8,00
60	12,17	11,35
120	16,05	15,06
240	20,09	19,07
480	24,82	23,87
960	25,64	25,50
1320	25,34	25,81

Tableau G.34 – Concentration en or brute et réconciliée

	Teneur en or (ppm)	Teneur réconciliée (ppm)
Alimentation	25,3	31,38
Rejet	6,15	5,69
Solution finale	25,81	25,69

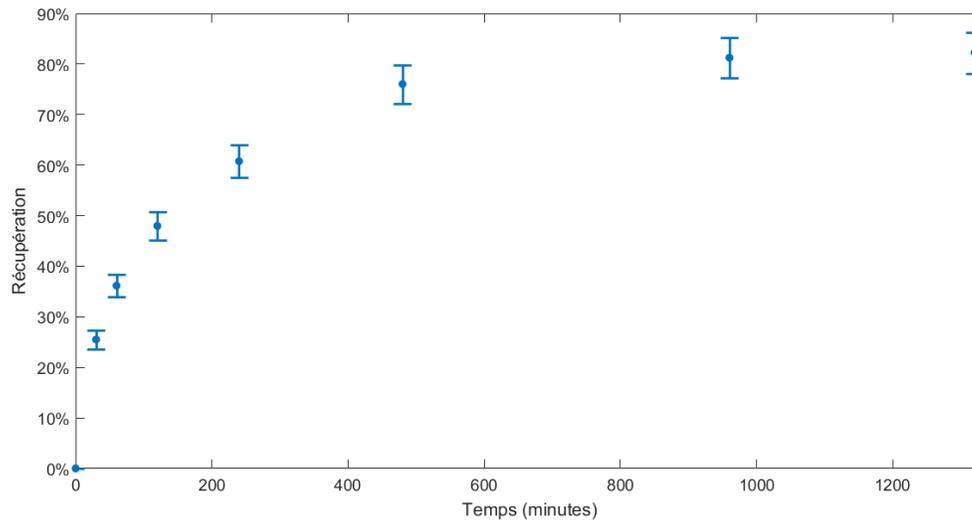


FIGURE G.17 – Récupération de l'or en solution en fonction du temps

Tableau G.35 – Données brutes de la mesure du cyanure

Temps (min)	Masse de CN en solution (mg)	CN ajouté dans l'intervall précédent (mg)	Consommation de CN (mg)	Volume de solution (ml)	Concentration de CN (ppm)
0	892,0	0,0	0,0	1784,0	500,0
15	1068,4	137,3	-39,1	1793,1	595,8
30	1130,0	34,5	-27,1	1788,4	631,9
45	1382,2	0,0	-252,2	1787,4	773,3
60	1385,7	0,0	-3,4	1782,1	777,5
80	1278,1	0,0	107,6	1784,3	716,3
120	1156,1	0,0	122,0	1779,5	649,7
180	1122,2	0,0	33,9	1780,2	630,4
240	1127,8	0,0	-5,6	1775,2	635,3
360	998,7	0,0	129,2	1775,1	562,6
480	1010,8	0,0	-12,1	1771,2	570,7
960	757,3	0,0	253,5	1822,3	415,6
1320	1430,0	148,8	-523,8	1823,8	784,0

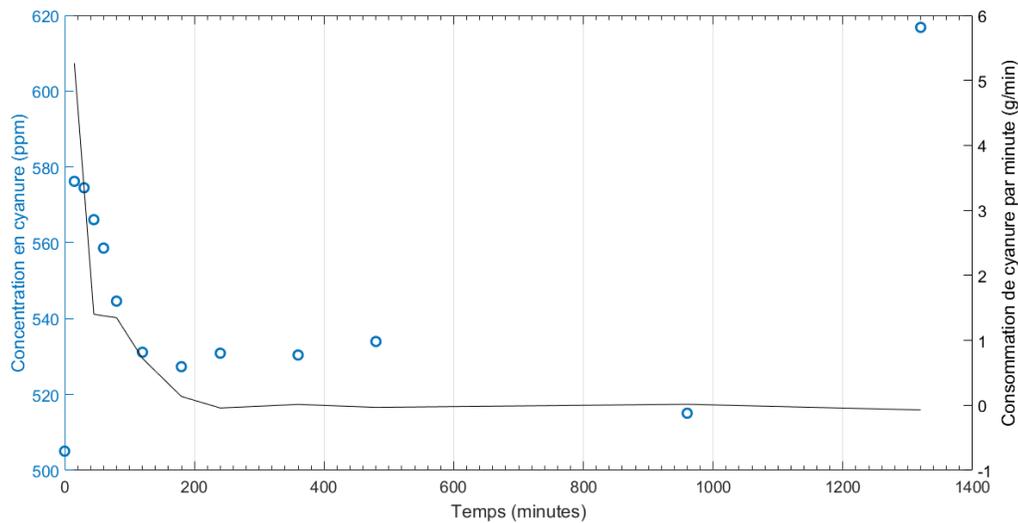


FIGURE G.18 – Concentration (points bleus) et taux de consommation (ligne noire) du cyanure en fonction du temps

Tableau G.36 – Données réconciliées de la mesure du cyanure

Temps (min)	Masse de CN en solution (mg)	CN ajouté dans l'interval précédant (mg)	Consommation de CN (mg)	Concentration de CN (ppm)	Consommation par minute (mg/min)
0	901,02	0,00	0,00	505,06	0,00
15	1033,25	205,42	78,97	576,22	5,26
30	1027,52	38,72	50,12	574,53	3,34
45	1011,86	0,00	21,04	566,12	1,40
60	995,54	0,00	20,66	558,62	1,38
80	971,79	0,00	26,96	544,63	1,35
120	945,20	0,00	28,94	531,15	0,72
180	938,76	0,00	8,19	527,34	0,14
240	942,44	0,00	-2,45	530,89	-0,04
360	941,53	0,00	1,61	530,42	0,01
480	945,79	0,00	-3,73	533,98	-0,03
960	938,59	0,00	7,55	515,06	0,02
1320	1125,02	160,86	-25,57	616,84	-0,07

G.10 Essai 2-5

Tableau G.37 – Mesure de la concentration en or dans la solution cyanurée

Temps d'échantillonnage (min)	Concentration en or brute (ppm)	Concentration ajusté pour l'or enlevé, l'évaporation et l'ajout de liquide (ppm)
30	5,50	5,50
60	8,96	8,41
120	14,13	13,34
240	17,60	16,73
480	19,52	18,92
960	21,09	21,03
1320	21,38	21,78

Tableau G.38 – Concentration en or brute et réconciliée

	Teneur en or (ppm)	Teneur réconciliée (ppm)
Alimentation	23,3	27,57
Rejet	6,24	5,85
Solution finale	21,78	21,72

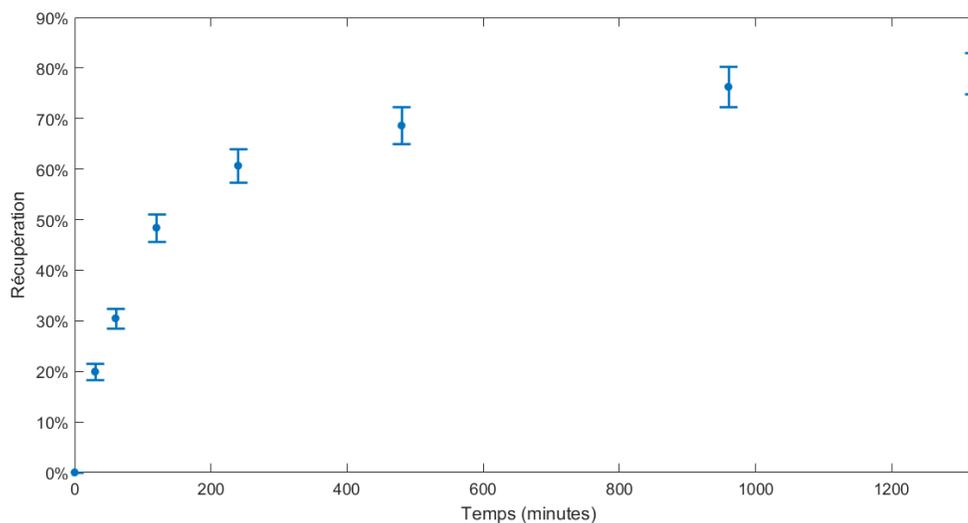


FIGURE G.19 – Récupération de l'or en solution en fonction du temps

Tableau G.39 – Données brutes de la mesure du cyanure

Temps (min)	Masse de CN en solution (mg)	CN ajouté dans l'intervall précédent (mg)	Consommation de CN (mg)	Volume de solution (ml)	Concentration de CN (ppm)
0	913,5	0,0	0,0	1827,0	500,0
10	971,9	40,9	-17,5	1827,3	531,9
30	1213,5	0,0	-241,6	1837,0	660,6
60	1247,0	0,0	-33,5	1829,6	681,6
80	1147,4	0,0	99,6	1827,6	627,8
120	1044,6	0,0	102,8	1820,1	573,9
180	1002,7	0,0	42,0	1818,1	551,5
240	1098,8	0,0	-96,2	1810,9	606,8
360	787,5	0,0	311,4	1808,9	435,3
480	1130,2	118,2	-224,5	1808,0	625,1
960	854,6	0,0	275,6	1800,5	474,7
1320	955,0	0,0	-100,4	1792,2	532,8

Tableau G.40 – Données réconciliées de la mesure du cyanure

Temps (min)	Masse de CN en solution (mg)	CN ajouté dans l'intervall précédent (mg)	Consommation de CN (mg)	Concentration de CN (ppm)	Consommation par minute (mg/min)
0	923,81	0,00	0,00	505,64	0,00
10	927,69	47,77	43,89	507,69	4,39
30	868,38	0,00	65,78	472,71	3,29
60	808,28	0,00	60,11	441,77	2,00
80	788,00	0,00	20,27	431,16	1,01
120	765,24	0,00	22,77	420,43	0,57
180	760,95	0,00	4,28	418,54	0,07
240	770,07	0,00	-9,11	425,24	-0,15
360	762,08	0,00	7,99	421,29	0,07
480	899,71	124,54	-13,09	497,63	-0,11
960	889,56	0,00	10,15	494,07	0,02
1320	894,50	0,00	-4,93	499,10	-0,01

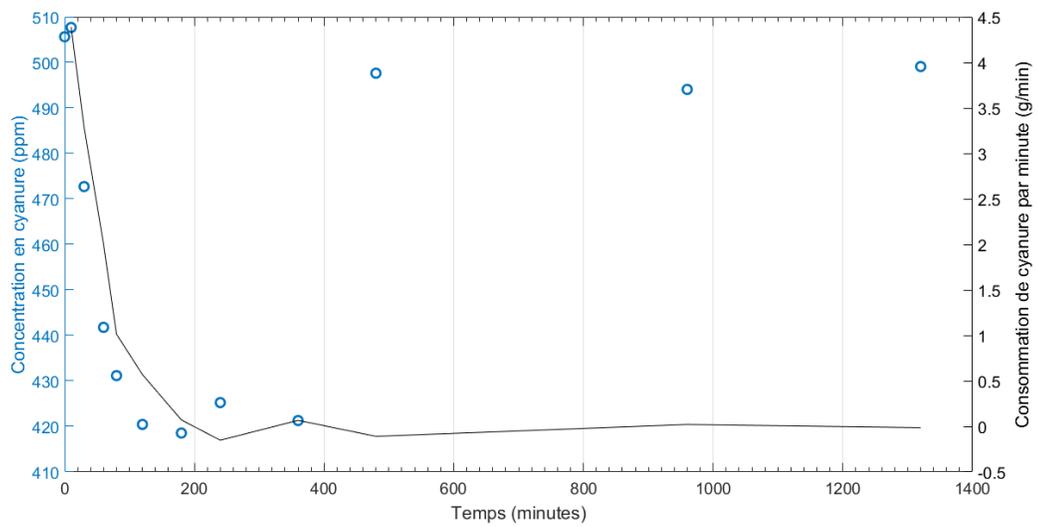


FIGURE G.20 – Concentration (points bleus) et taux de consommation (ligne noir) du cyanure en fonction du temps

Bibliographie

- M. J. Bagajewicz et Q. Jiang. Comparison of steady state and integral dynamic data reconciliation. *Computers & Chemical Engineering*, 24(11) :2367–2383, 2000.
- S. Bai, J. Thibault et D. D. McLean. Dynamic data reconciliation for improved process performance. Dans *Inter-American Congress of Chemical Engineering, Lima, Peru*, pages 24–27, 2005.
- Barrick Gold. *First time any company in the western world produces gold on a commercial scale using thiosulfate*, 2019. URL <https://www.barrick.com/news/news-details/2016/processing-innovation-nets-metallurgy-award/default.aspx>.
- B. Bissonnette. *Conception d'une cuve de laboratoire instrumentée pour l'étude de la cyanuration de minerais d'or : modélisation et simulation du procédé*. Mémoire de maîtrise, Université Laval, 1987.
- F. C. Bond. Third theory of comminution. *Mining Engineering*, 4(5) :484–494, 1952.
- F. C. Bond. Crushing and grinding calculations part 1. *British Chemical Engineering*, 6(6), 1961.
- L. R. P. de Andrade Lima. *Modélisation, automatisation et optimisation appliquées à l'hydrométallurgie de l'or*. Thèse de doctorat, Université Laval, 2001.
- J. Egan. *Effet de la granulométrie sur la cyanuration de l'or*. Mémoire de maîtrise, Université Laval, 2007.
- Emerson Process Management. *Theory and Practice of pH Measurement*. Rapport, 2010. URL <https://www.emerson.com/documents/automation/manual-theory-practice-of-ph-measurement-rosemount-en-70736.pdf>.

- C. A. Fleming. Hydrometallurgy of precious metals recovery. *Hydrometallurgy*, 30(1-3) : 127–162, 1992.
- F. Habashi. *Kinetics and mechanism of gold and silver dissolution in cyanide solution*. Montana College of Mineral Science and Technology, 1967.
- F. Habashi. *A textbook of hydrometallurgy*. Métallurgie Extractive Québec, 1999. ISBN 2980324779.
- W. W. Hines, D. C. Montgomery, D. M. Goldsman et C. M. Borrer. *Probabilités et statistique pour ingénieurs*. Chenelière éducation Incorporated, 2012.
- R. T. Hukki. Proposal for a solomonic settlement between the theories of von Rittinger, Kick and Bond. *Trans. AIME*, 220 :403–408, 1961.
- F. Kick. The law of proportional resistance and its application. *Verlag Arthur Felix*, pages 48–61, 1885.
- S. R. La Brooy, H. G. Linge et G. S. Walker. Review of gold extraction from ores. *Minerals Engineering*, 7(10) :1213–1241, 1994. ISSN 0892-6875.
- M. Laflamme. *Projet de recherche : Mine profonde*, 2014.
- D. Lemieux, A. Drouin, J.-M. Lalancette et C. Chouinard. Demonstration campaign results on a cyanide-free process for gold extraction from a refractory pyrite concentrate. *CMP*, 2017.
- P. Ling, V. G. Papangelakis, S. A. Argyropoulos et P. D. Kondos. An improved rate equation for cyanidation of a gold ore. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 35(3) :225–234, 1996. ISSN 0008-4433.
- MathWorks. *Filtering and Smoothing Data*, 2018. URL https://www.mathworks.com/help/curvefit/smoothing-data.html#bq_6ys3-3.
- Microchip Technology Inc. *Compiled Tips 'N Tricks Guide*. Rapport, 2009. URL <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/01146b.pdf>.
- M. J. Nicol, R. L. Paul et C. A. Fleming. The chemistry of the extraction of gold. Dans *The Extractive Metallurgy of Gold in South Africa*, chapter 15. The South African Institute of Mining and Metallurgy, 1987.

- R. Schodde. *Challenges of Exploring Under Deep Cover*. Rapport, 2017. URL <http://minexconsulting.com/challenges-of-exploring-under-deep-cover/>.
- G. Senanayake. Kinetics and reaction mechanism of gold cyanidation : Surface reaction model via Au (I)-OH-CN complexes. *Hydrometallurgy*, 80(1-2) :1-12, 2005.
- J. M. Shannon, R. Webster, H. A. Smith et A. Riles. *San Dimas Technical Report*, 2012.
- W. Srithammavut. *Modeling of gold cyanidation*. Mémoire de maîtrise, Lappeenranta University of Technology, 2008.
- R. Swiecki. *Gold*, 2019. URL <http://www.minelinks.com/alluvial/gold.html>.
- D. Tolgyesi. *Bilan économique de la mine Lac Shortt*. Mémoire de maîtrise, Université Laval, 1995.
- R. P. von Rittinger. Textbook of mineral dressing. *Ernest and Korn*, 1867.
- W. H. Walker, W. K. Lewis, W. H. McAdams et E. R. Gilliland. *Principles of chemical engineering*. McGraw-Hill book company, inc., 1937.
- F. D. Wilde, D. B. Radtke, J. Gibbs et R. T. Iwatsubo. *Techniques of Water-Resources Investigations Reports/Field measurements*. 1999.
- J. Zhang, Y. Zhang, W. Richmond et H. Wang. Processing technologies for gold-telluride ores. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 17(1) :1-10, 2010. ISSN 1674-4799.