

Faculté des bioingénieurs

Export de silicium par les cultures de riz par rapport aux flux de Si exportés par les rivières dans les arcs insulaires volcaniques

**Cas d'étude aux volcans Aso, Japon et Kawah Ijen,
Indonésie**

Auteur :	Julie Meunier
Promoteurs :	Prof. Sophie Opfergelt Prof. Pierre Delmelle
Lecteurs :	Prof. Charles Biélers Prof. Bas van Wesemael
Année Académique :	2018 - 2019
Bioingénieur :	Bioingénieur : sciences et technologies de l'environnement

Remerciements

Je souhaite tout d'abord remercier mes promoteurs, les professeurs Sophie Opfergelt et Pierre Delmelle. Merci pour leurs corrections et leurs conseils avisés et positifs sur mon travail durant toute l'année. Leur accompagnement tout au long de ce mémoire m'a permis d'enrichir ma méthode de travail et mes connaissances.

Je remercie particulièrement François Gaspard pour sa disponibilité et toute l'aide qu'il m'a apportée pour ce mémoire. Merci également pour ses réponses rapides et toujours positives sur mon travail, cela m'a encouragée à poursuivre mes efforts.

Je remercie les lecteurs, Charles Bielders et Bas van Wesemael pour le temps consacré à la lecture de ce présent mémoire.

Un grand merci à Anne Iserentant pour son aide, sa disponibilité et sa bienveillance lors des manipulations effectuées en laboratoire.

Merci à Hosono Takahiro pour l'échantillonnage des plants de riz au Japon et leur envoi à Louvain-la-Neuve. Je remercie également Michelle Quimbo pour son aide quant à la documentation bibliographique et Marlon Calispa qui m'a aidée pour la prise en main du logiciel QGIS.

Enfin je voudrais remercier mes proches pour leur soutien inconditionnel durant cette année et en particulier ces dernières semaines. Merci à Aurélie, Camille et Clémentine pour leurs encouragements qui m'ont aidée à rester motivée pour cette dernière ligne droite. Merci à mes cousins, Thomas et Camille et mes soeurs, Lise et Aude pour ce dernier blocus tous ensemble. Sans vous les blocus ça n'aurait vraiment pas été pareil et je n'oublie pas tous vos encouragements durant cette période au fil des années. Merci à Florian d'avoir toujours été présent dans les bons moments comme dans les moments de découragement. Merci de m'avoir toujours rassurée et motivée pour la suite. Merci à mes parents pour leurs conseils, leurs encouragements, leur confiance et leurs attentions. Un dernier merci à ma maman pour la relecture attentive de ce mémoire et ce jusqu'au dernier jour.

Table des matières

1	Introduction	1
2	État de l'art	2
2.1	L'altération	2
2.1.1	Définition	2
2.1.2	L'altération des silicates	3
2.1.3	L'altération des roches au sein des systèmes hydrothermaux	4
2.2	Arcs insulaires volcaniques	6
2.2.1	Le fonctionnement des systèmes hydrothermaux magmatiques	6
2.2.2	La classification des systèmes hydrothermaux	7
2.2.3	L'altération hydrothermale	8
2.3	Le silicium	9
2.3.1	Interaction entre le cycle du silicium et celui du carbone	9
2.3.2	Cycle du silicium	10
2.4	Le silicium dans les rivières	12
2.5	Le silicium dans les plantes	14
2.5.1	L'absorption du silicium par les plantes	14
2.5.2	Les phytolithes	16
2.5.3	L'impact des cultures sur le cycle du silicium	17
2.6	Culture de riz	20
2.6.1	Le plant de riz	20
2.6.2	Techniques de culture	21
2.6.3	Culture dans les arcs insulaires volcaniques	22
3	Objectifs	23
4	Matériel et méthode	24
4.1	Site d'étude de l'Aso	24
4.1.1	Description du site	24
4.1.1.1	Climat	25
4.1.1.2	Culture de riz	25
4.1.2	Échantillonnage	26
4.1.3	Analyse en laboratoire	28
4.1.4	Délimitation de la zone irriguée	32
4.1.5	Données à disposition	33
4.2	Site d'étude de l'Ijen	34
4.2.1	Description du site	34
4.2.1.1	Climat	35
4.2.1.2	Culture de riz	36

4.2.2	Échantillonnage	36
4.2.3	Analyse en laboratoire	37
4.2.4	Délimitation de la zone irriguée	37
4.2.5	Données à disposition	38
4.3	Stratégies d'estimation des flux de Si	39
4.3.1	Flux de Si exportés par les plants de riz	39
4.3.2	Flux de Si des eaux de rivière	39
5	Résultats	41
5.1	Le site du Mont Aso	41
5.1.1	Plants de riz	41
5.1.1.1	Biomasse	41
5.1.1.2	Concentrations en Si	43
5.1.1.3	Surfaces cultivées	45
5.1.2	Rivières	46
5.1.2.1	Débits	46
5.1.2.2	Concentrations en Si	47
5.2	Le site du Kawah Ijen	49
5.2.1	Plants de riz	49
5.2.1.1	Biomasse	49
5.2.1.2	Concentrations en Si	51
5.2.1.3	Surfaces cultivées	52
5.2.2	Rivières	52
5.2.2.1	Débits d'eau	52
5.2.2.2	Concentrations en Si	53
6	Discussion	55
6.1	Facteurs influençant les variations de biomasse des plants de riz	55
6.2	Facteurs influençant les variations de concentrations en Si dans les plants de riz	59
6.3	Calcul des flux de Si exportés par les plants de riz dans les zones étudiées	62
6.4	Calcul des flux de Si des eaux de rivière dans les zones étudiées	65
6.5	Comparaison entre les flux de Si exportés par les plants de riz et les flux de Si exportés par les rivières	68
6.6	Implications potentielles pour les flux de Si exportés à l'océan	71
7	Conclusion et perspectives	72
8	Bibliographie	74
A	Annexe : Résultats	83
A.1	Biomasse des plants de riz des parcelles du Mont Aso, Japon	83
A.2	Concentration en Si des plants de riz des parcelles du Mont Aso, Japon	85

A.3	Concentration en Si des rivières pour différentes saisons en différents sites du Mont Aso, Japon.	86
A.4	Biomasse des plants de riz des parcelles du site du Kawah Ijen, Indonésie	87
A.5	Concentration en Si des plants de riz des parcelles du Kawah Ijen, Indonésie	89
A.6	Concentration en Si des rivières pour différentes saisons en différents sites du Kawah Ijen, Indonésie.	89
B	Annexe : Discussion	90
B.1	Biomasse	90

Liste des figures

1	Processus de surface du cycle des roches (Grotzinger et Jordan, 2014).	2
2	Facteurs influençant l'altération physique et chimique des roches (Grotzinger et Jordan, 2014).	3
3	Distribution globale de la consommation de CO ₂ par l'altération chimique (Hartmann et al., 2009).	4
4	Formation d'un arc insulaire volcanique lors de la rencontre de la plaques océanique des Philippines et de la plaque océanique du Pacifique (Schéma modifié de Grotzinger et Jordan, 2014).	6
5	Manifestations de surface des systèmes hydrothermaux.	7
6	Classification des MRHS (Bogie et al., 2005).	8
7	Comparaison de la séquestration cumulative de carbone organique par les phytolithes, les diatomées et par l'altération des roches silicatées (Song et al. 2017).	10
8	Cycle simplifié du Si.	10
9	Réservoirs et flux de silicium dans le système sol-plante (Cornelis et Delvaux, 2016). Silicates lithogéniques (LSi) ; Silicates pédogéniques (PSi) ; Silicium biogénique (BSi), Silicium d'origine végétale (PhSi) ; Silicium issu de l'ingestion animale (ZSi)	11
10	Flux de silicium (mol/an) dans différents réservoirs. Les lignes en pointillés indiquent les flux de particules et les lignes pleines indiquent les flux de solutés ou les transformations (Frings et al., 2016).	12
11	Représentation des systèmes d'absorption du Si des plantes (Mitani et Ma, 2005).	15
12	Phytolithe bulliforme de riz (<i>Oryza sativa</i>) (Zhang et al., 2016).	16
13	Taux de dissolution (logR en molSi/g.jour) de différents minéraux fréquents et de phytolithes en fonction du pH (Guntzer et al., 2012).	17
14	Production annuelle globale de silicium biogénique des 10 cultures les plus productives en fonction des années (Carey et Fulweiler, 2016).	19
15	Riz asiatique et riz africain (RICE HUB, The Rice Plant).	20
16	Représentation des trois stades de croissance du riz : la phase végétative, reproductive et de maturation (IRRI, Steps to successfull rice production).	21
17	Carte représentant le pourcentage de terres cultivées à la surface de la terre (Ramankutty et al., 2008).	22
18	Carte représentant les volcans actifs du Japon (Nippon, Ontake Erupts, Shows Difficulty of Predicting Volcanic Disaster)	24
19	Données pluviométriques à Otohime, Kumamoto, Japon. Représentation de la somme des pluviométries mensuelles de janvier 2014 à décembre 2015. Les zones entourées en jaune correspondent à la saison humide.	25
20	Plantation des semis de riz (Kome-Academy, Rice Farming in Japan)	26
21	Carte des parcelles échantillonnées pour le site du Mont Aso, Japon (Réalisée avec QGIS, basemap : google satellite).	27
22	Parcelles de riz au moment de l'échantillonnage, au Mont Aso, Japon.	27
23	Échantillons emballés et étiquetés de grains de riz.	28

24	Échantillons pré découpés aux ciseaux	29
25	Broyage à l'azote liquide.	29
26	Échantillons broyés à l'azote liquide	30
27	Échantillons avant et après le passage au four à 500 °C	30
28	Échantillons en fusion.	31
29	Fonctionnement des rasters "flow direction" et "flow accumulation" 'ArcGis, Fonctionnement de l'outil Accumulation de flux)	32
30	Carte des sites d'échantillonnage des rivières au Mont Aso, Japon (Réalisée avec QGis, basemap : google satellite)	33
31	Carte de la caldeira de l'Ijen, Indonésie (van Hinsberg et al., 2010)	34
32	Carte de la plaine d'Asembagus et de ses cours d'eau (Heikens et al., 2005).	35
33	Moyenne des précipitations mensuelles durant les années 2017 et 2018 à Ijen, Indonésie (Ijen Monthly Climate Averages). La saison humide théorique est entourée en jaune.	35
34	Calendrier des différentes périodes de culture du riz en Indonésie (USDA, South East Asia - Crop Calendars).	36
35	Cartes des différentes parcelles échantillonnées pour le site du Kawah Ijen, Indonésie (Réalisée avec QGis, basemap : google satellite).	37
36	Carte des sites d'échantillonnage de la rivière Banyputih, Kawah Ijen (Réalisée avec QGis, basemap :google satellite).	38
37	Calculs réalisés pour obtenir l'export de Si par les cultures par m^2	39
38	Calculs réalisés pour obtenir le flux de Si des eaux de rivière.	40
39	Configuration des sites pour les flux de Si des rivières du Mont Aso et du Kawah Ijen. La croix représente l'endroit où sont mesuré le débit (m^3/s) et la concentration en Si (mg/l).	40
40	Poids sec par partie des différents échantillons pour les quatre parcelles du Mont Aso, Japon. Chaque échantillon est représenté par une nuance de couleur différente. Chaque échantillon est un plant de riz différent avec R allant de 1 à 5 pour les 5 plants par parcelle. G = grains, T = tiges, F= feuilles.	41
41	Poids sec moyen (g) par partie des parcelles du Mont Aso, Japon. 5 échantillons ont été analysés pour chaque parcelle. La barre d'erreur représente l'écart-type.	42
42	Concentration en Si par partie des différents échantillons pour les quatre parcelles du Mont Aso, Japon. Chaque échantillon est représenté par une nuance de couleur différente. Chaque échantillon est un plant de riz différent avec R allant de 1 à 5 pour les 5 plants par parcelle. G = grains, T = tiges, F= feuilles.	43
43	Concentrations moyennes en Si (gSi/kgMS) en fonction des parcelles du Mont Aso, Japon, pour les différentes parties du plant. 5 échantillons ont été analysés pour chaque parcelle. La barre d'erreur représente l'écart-type.	44
44	Carte des bassins versants nord et sud du site de l'Aso (Réalisée avec QGis, DEM : U.S. Geological Survey, Earth Explorer)	45
45	Débit mensuel (m^3/s) au site S33. En bleu, le mois de l'échantillonnage du printemps 2015 et en orange celui de l'été 2015.	47

46	Concentration en Si (mg/l) en différents sites d'échantillonnage et pour différentes saisons, site du Mont Aso, Japon.	48
47	Poids sec par partie des différents échantillons pour les trois parcelles du Kawah Ijen, Indonésie. Chaque échantillon est représenté par une nuance de couleur différente. Chaque échantillon est un cluster de riz différent avec R allant de 1 à 5 pour les 5 plants par parcelle. G = grains, T = tiges, F= feuilles.	49
48	Poids sec moyen par plant (g) et par partie (g) des trois parcelles du Kawah Ijen, Indonésie. 5 échantillons ont été analysés pour chaque parcelle. La barre d'erreur représente l'écart-type.	50
49	Concentration en Si par partie pour les échantillons composites des trois parcelles du Kawah Ijen, Indonésie.	51
50	Débit mesuré (m^3/s) au barrage de Lewung et pluviométrie moyenne (mm) lors de différentes saisons.	53
51	Débit moyen (l/s) à l'entrée du barrage Lewung et pluviométrie (mm) à Blawan, de 1981 à 2000 (Löhr et al., 2005).	53
52	Concentration en Si (mg/l) lors de différentes saisons aux sites d'échantillonnage de la rivière Banyuputih, Kawah Ijen, Indonésie. Les données de septembre 1993 et août 1996 proviennent de la littérature (Delmelle et Bernard, 2000) et les données de février 2017 ont été récoltées par François Gaspard et Antoine de Wasseige.	54
53	Rendement moyen par parcelle du site du Mont Aso, Japon et rendement moyen pour le Japon en 2017 (FAOSTAT). La barre d'erreur représente l'écart-type.	55
54	Variabilité de différents clusters de la parcelle S2 du Mont Aso, Japon. Le deuxième cluster de l'image est entouré en jaune et le troisième en rouge.	56
55	Parcelle N1 du Mont Aso, Japon.	57
56	Rendement moyen par parcelle du site du Kawah Ijen, Indonésie et rendement moyen pour l'Indonésie en 2017 (FAOSTAT). La barre d'erreur représente l'écart-type.	57
57	Concentrations en Si ($gSi/kgMS$) par partie pour les parcelles de riz du Mont Aso, Japon et du Kawah Ijen, Indonésie et gammes de concentrations en Si obtenues dans la littérature pour des plants de riz (Yuan et Cheng, 1977; Majumder et al., 1985).	59
58	Flux de Si des eaux de rivière et flux de Si exportés par les plants de riz pour les deux sites étudiés en $kgSi/ha.an$ en tenant compte des pratiques culturales spécifiques des sites d'étude.	68

Liste des tableaux

1	Classification de différentes espèces végétales selon leur mode d'accumulation de silicium (Bakhat et al., 2018).	14
2	Quantité de silicium (Tmol/an) fixé par les biomes majeurs (Carey et Fulweiler, 2012). . .	18
3	Estimation du nombre de plants de riz par m^2 réalisée pendant l'échantillonnage.	28
4	Surfaces calculées par bassin versant pour le site du Mont Aso, Japon.	45
5	Débits totaux mensuels ($m^3/mois$) et annuels (m^3/an) le la rivière Shirakawa mesurés au site S33 du Mont Aso, Japon en 2014 et 2015.	46
6	Surface totale, cultivée et de rizière à la plaine d'Asembagus (ha).	52
7	Données ponctuelles du débit (m^3/s) au niveau du barrage de Lewung. Données de 2016 fournies par l'Asembagus Irrigation Office. Données de 2017 mesurées par François Gaspard et Antoine de Wasseige	52
8	Teneur moyenne en Si des tissus végétaux de dix génotypes de riz cultivés en serre à trois niveaux de fertilisation (Deren et al., 1992).	60
9	Export moyen de Si en kg par hectare cultivé à l'échelle d'une récolte pour les parcelles du Mont Aso, Japon et du Kawah Ijen, Indonésie.	62
10	Export moyen de Si en kg par hectare cultivé et par an pour les parcelles de riz du Mont Aso, Japon et du Kawah Ijen, Indonésie.	63
11	Valeurs du débit et de la concentration en Si choisies pour calculer le flux de Si des eaux de la rivière Sharakawa (site S33), Mont Aso, Japon. Les valeurs en bleu sont les valeurs utilisées pour déterminer le flux de Si des eaux de la rivière.	66
12	Valeurs du débit et de la concentration en Si choisies pour calculer le flux de Si des eaux de la rivière Banyuputih, Kawah Ijen, Indonésie. Les valeurs en bleu sont les valeurs utilisées pour déterminer le flux de Si des eaux de la rivière.	66
13	Valeurs du débit et de la concentration en Si choisis pour calculer le flux de Si des eaux de rivière ainsi que les valeurs obtenues pour le flux de Si des eaux de rivière Shirakawa, Mont Aso Japon et Banyuputih, Kawah Ijen, Indonésie.	67
14	Influence des pratiques culturales sur les flux de Si exportés par les cultures de riz à l'échelle des bassins versants. Tous les flux d'export de Si sont exprimés en kgSi/ha.an. En bleu, sont représentées les valeurs réelles des flux de Si exportés par les cultures de ces sites, en tenant compte des pratiques culturales.	70
15	Biomasse des plants de riz de la parcelle N1 du Mont Aso, Japon.	83
16	Biomasse des plants de riz de la parcelle N2 du Mont Aso, Japon. G = grains, T = tiges, F= feuilles.	84
17	Biomasse des plants de riz de la parcelle S1 du Mont Aso, Japon. G = grains, T = tiges, F= feuilles.	84
18	Biomasse des plants de riz de la parcelle S2 du Mont Aso, Japon. G = grains, T = tiges, F= feuilles.	84
19	Concentration en Si (g de Si par kg de biomasse) des plants de riz des échantillons du Mont Aso, Japon.	85

20	Concentration en Si des rivières pour différentes saisons en différents sites du Mont Aso, Japon.	86
21	Biomasse des plants de riz de la parcelle 1 irriguée par la rivière Banyuputih (BP1) du site du Kawah Ijen, Indonésie. G = grains, T = tiges, F= feuilles.	87
22	Biomasse des plants de riz de la parcelle 2 irriguée par la rivière Banyuputih (BP2) du site du Kawah Ijen, Indonésie. G = grains, T = tiges, F= feuilles.	88
23	Biomasse des plants de riz de la parcelle irriguée par la rivière Bangeran (BA) du site du Kawah Ijen, Indonésie. G = grains, T = tiges, F= feuilles.	88
24	Concentration en Si (g de Si par kg de matière sèche) des plants de riz des parcelles du site du Kawah Ijen, Indonésie. G = grains, T = tiges, F= feuilles.	89
25	Concentration en Si (ppm) lors de différentes saisons aux sites d'échantillonnage de la rivière Banyuputih, Kawah Ijen, Indonésie.	89
26	Valeurs moyennes du poids sec (PS) par plant et par cluster ainsi que du rendement pour les parcelles du Mont Aso, Japon.	90
27	Valeurs moyennes du poids sec (PS) par plant et par cluster ainsi que du rendement pour les parcelles du site du Kawah Ijen, Indonésie.	90

1 Introduction

Le cycle du silicium (Si) soulève l'intérêt scientifique du fait de son interaction avec le cycle du carbone (Carey et Fulweiler, 2012). En effet, le cycle du Si régule la concentration en CO_2 atmosphérique à deux niveaux : l'altération des silicates et la consommation de Si par des organismes photosynthétiques, tels que les algues marines (diatomées) et les plantes (formation de phytolithes) (Song et al., 2017).

L'altération des silicates de magnésium et de calcium consomme du CO_2 , source de protons pour les réactions d'altération en se dissolvant dans les eaux de surface pour former de H_2CO_3 . Trente % de la consommation totale de CO_2 par l'altération des silicates a lieu en région volcanique, alors même que ces régions ne représentent que 5% des surfaces du globe. Les régions volcaniques sont donc importantes pour la consommation de CO_2 (Gaillardet et al., 1999 ; Dupré et al., 2003).

L'altération des minéraux silicatés produit du silicium dissout (DSi) qui est alors en solution sous forme d'acide silicique (H_4SiO_4) dans le sol. In fine, ce Si dissout est transporté par les rivières jusqu'à l'océan. Le DSi peut alors servir de nutriment pour les diatomées, dont le squelette est composé de silice et qui consomment du CO_2 . Le DSi dans la solution du sol peut être absorbé par les plantes. Dans la plante, le DSi est transformé en particules d'opale, les phytolithes (Cornelis et al., 2011). Lorsque la plante meurt ou perd ses feuilles, les phytolithes sont restitués au sol. Les phytolithes ont une plus grande solubilité que d'autres minéraux et in fine, une partie du DSi sera restitué au sol (Guntzer et al., 2012).

Lorsque les plantes sont cultivées et exportées, le Si contenu dans les plantes est, lui aussi, exporté et ne sera pas restitué au sol ou en partie seulement. Les flux de Si utilisés dans les calculs de flux d'altération ne tiennent pas compte du fait qu'une partie du Si libéré par l'altération a pu être consommé par les cultures et exporté des arcs volcaniques. Cela peut donc conduire à une sous-estimation des flux d'altération et de la consommation en CO_2 atmosphérique. Afin de préciser les estimations de la consommation en CO_2 atmosphérique liée à l'altération des silicates, il est nécessaire de prendre en compte la consommation de Si par les cultures (Conley, 2002). Dans les arcs insulaires volcaniques, l'altération est élevée et l'agriculture développée, d'où l'importance d'étudier les flux de Si exportés par les cultures dans ces régions en particulier.

Ce mémoire a ainsi pour objectif d'évaluer si les flux de Si exportés par les cultures sont significatifs par rapport aux flux de Si exportés par les eaux de rivière dans les arcs insulaires volcaniques. Pour cela deux sites sont analysés : les volcans Aso, au Japon et Kawah Ijen, en Indonésie ; deux arcs insulaires volcaniques hydrothermalement actifs. Dans ce mémoire, une culture est analysée : la culture du riz. Le riz a été choisi car sa culture est celle qui produit le plus de BSi à l'échelle mondiale (Carey et Fulweiler, 2016).

Pour les deux sites étudiés, des parcelles de riz sont analysées. Des plants de riz sont analysés afin de quantifier leur concentration en Si. Ensuite, les flux exportés de Si par les cultures de riz sont quantifiés à l'échelle d'un bassin versant. Les flux de Si exportés sont alors comparés aux flux de Si des eaux de rivière afin d'évaluer s'ils ont une importance significative.

2 État de l'art

2.1 L'altération

2.1.1 Définition

L'altération peut être définie comme l'ensemble des processus par lesquels les roches sont désagrégées à la surface de la Terre et forment des particules sédimentaires. L'altération est l'un des processus principaux du cycle des roches (figure 1 ; Grotzinger et Jordan, 2014). C'est un processus clé dans l'évolution de la surface de la Terre et sa compréhension est essentielle afin de comprendre l'évolution de celle-ci. L'interaction entre les roches et l'eau va provoquer la dissolution d'ions, qui seront transportés dans l'océan, mèneront à la formation de minéraux secondaires et sédimenteront (Millot et al., 2002).

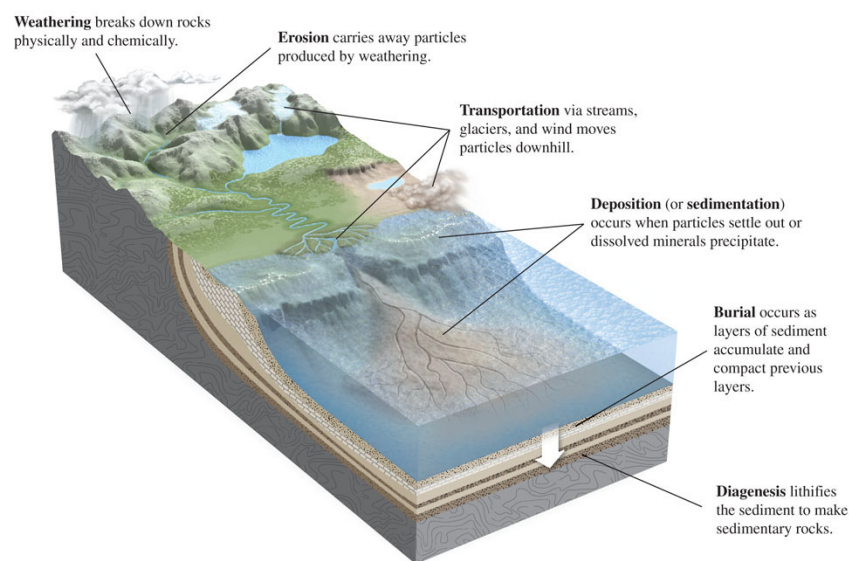


FIGURE 1 – Processus de surface du cycle des roches (Grotzinger et Jordan, 2014).

L'altération peut être de deux types : chimique ou physique. L'altération chimique a lieu lorsque les minéraux d'une roche sont altérés ou dissous chimiquement. L'altération physique est un processus mécanique où une roche solide est fragmentée et où la composition chimique de la roche n'est pas modifiée. Les processus d'altération chimique et physique se renforcent l'un l'autre. En effet, l'altération chimique va fragiliser la roche qui sera alors plus susceptible d'être altérée physiquement. Les fragments de roches réduits par l'altération physique ont alors une plus grande surface disponible pour l'altération chimique (Grotzinger et Jordan, 2014).

La figure 2 illustre les différents facteurs qui vont influencer l'altération des roches tels que la température, la durée de l'altération, la composition des roches mères, la pluie ou encore la topographie (Grotzinger et Jordan, 2014). Le climat a donc une influence importante sur l'altération physique et chimique avec la température et la pluviométrie. Les pollutions atmosphériques et le réchauffement climatique vont participer à une augmentation de l'altération chimique due à une augmentation de la température et de l'acidité

de la pluie. Dans plusieurs études, la température, le ruissellement et la composition des roches mères sont considérés comme étant les paramètres les plus importants contrôlant les taux d'altération chimique (Dessert et al., 2003 ; Hartmann et al., 2009).

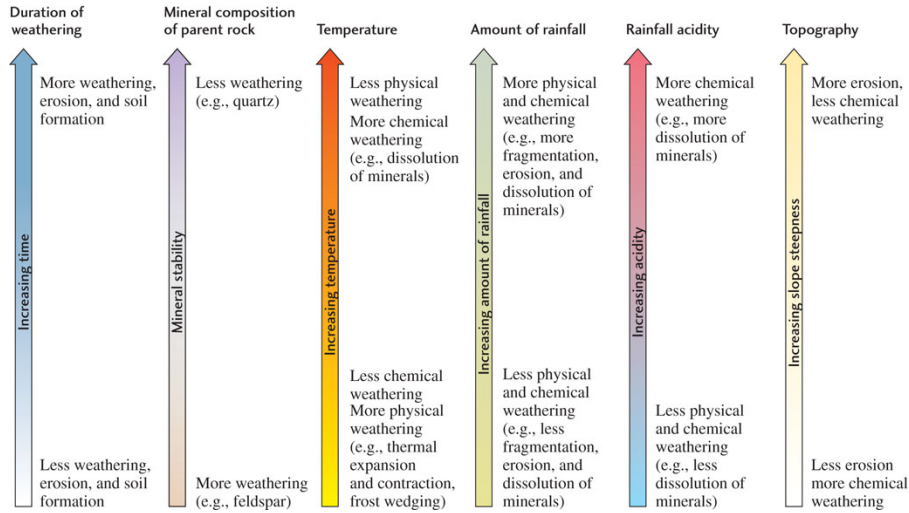


FIGURE 2 – Facteurs influençant l'altération physique et chimique des roches (Grotzinger et Jordan, 2014).

2.1.2 L'altération des silicates

L'altération des roches carbonatées et silicatées va consommer du dioxyde de carbone (CO_2) atmosphérique comme le montre les réactions simplifiées ci-dessous.

L'altération des carbonates : $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \longrightarrow \text{Ca}^{++} + 2\text{HCO}_3^-$

L'altération des silicates : $\text{CaSiO}_3 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \longrightarrow \text{Ca}^{++} + 2\text{HCO}_3^- + \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$

Précipitation de calcite dans l'océan : $\text{Ca}^{++} + 2\text{HCO}_3^- \longrightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$

L'altération des carbonates consomme une mole de CO_2 tandis que l'altération des silicates de magnésium (Mg) et de calcium (Ca) en consomme deux. On constate donc que l'altération des silicates permet une plus forte régulation du CO_2 atmosphérique. La troisième réaction explique la précipitation et l'enfouissement de la calcite dans l'océan. Cette réaction libère une mole de CO_2 . La consommation et la libération de CO_2 sont mises en évidence en orange dans les réactions. Cela montre que l'altération des carbonates a un effet sur la concentration en CO_2 mais à court terme. En effet, sur une échelle de temps plus importante, le CO_2 capté pour l'altération des carbonates sera relâché lors de la précipitation de la calcite. D'autres types de roches comme les évaporites ne sont pas non plus prises en compte pour la concentration en CO_2 car leur réaction d'altération n'implique pas de consommation de CO_2 . Par contre, l'altération des silicates contenant du Ca ou du Mg aura une influence à long terme car pour deux CO_2 consommés un seul sera libéré. L'altération des silicates nécessite donc une attention particulière étant donné qu'elle implique une consommation de CO_2 à long terme et a donc un impact potentiel sur les concentrations en CO_2 atmosphériques futures (Millot et al., 2002). Le calcul précis de la consommation de CO_2 liée à l'altération

des silicates nécessite la détermination des flux d'altération qui se basent notamment sur les flux de Si dissout dans les eaux de rivière.

2.1.3 L'altération des roches au sein des systèmes hydrothermaux

La carte empirique (figure 3) réalisée par Hartman et al. (2009) indique la distribution globale de la consommation de CO_2 par l'altération chimique. On remarque sur cette carte que les îles volcaniques telles que les Philippines ou l'Indonésie sont des endroits privilégiés pour la consommation de CO_2 atmosphérique par l'altération.

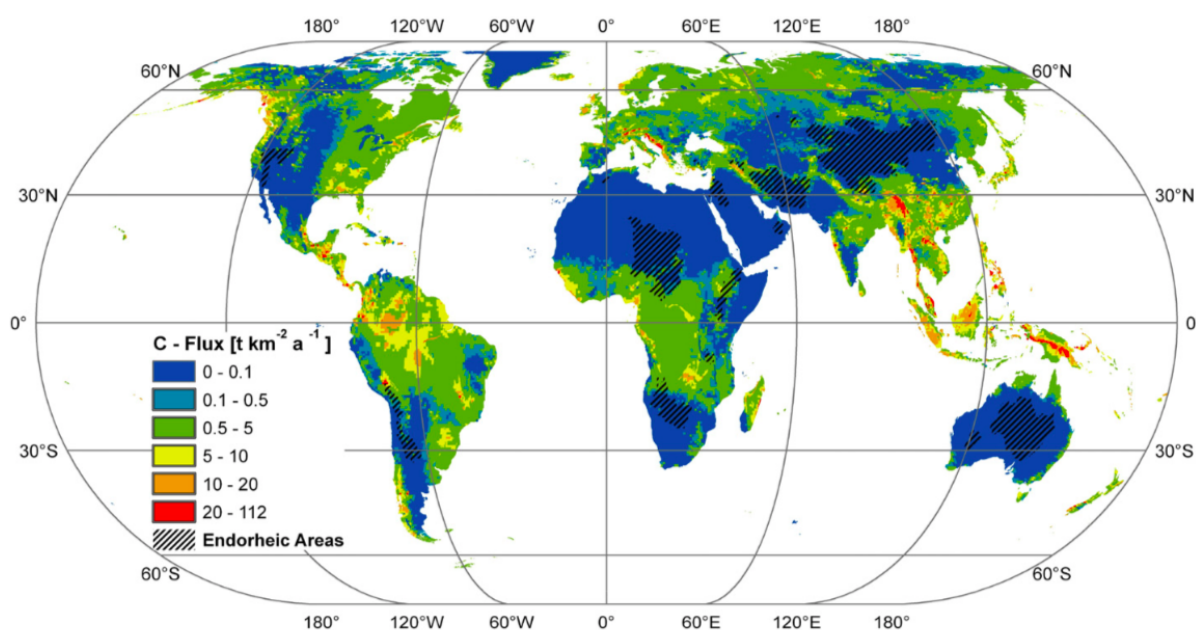


FIGURE 3 – Distribution globale de la consommation de CO_2 par l'altération chimique (Hartmann et al., 2009).

Gaillardet et al. (1999) ont estimé la consommation de CO_2 par l'altération des silicates sur l'ensemble du globe à 0,104 Gt C/an. Ils estiment également que les taux d'altération des basaltes des îles volcaniques tels que l'île de la Réunion, amènent à une consommation de CO_2 de 0,036 Gt C/an. Cela signifie que les régions volcaniques contribuent à plus de 30% de la consommation continentale de CO_2 . Dupré et al. (2003) montrent également que l'altération des basaltes représente 30% de la consommation de CO_2 atmosphérique.

L'étude de Dessert et al. (2003) confirme ces données et réaffirme l'importance de l'altération des basaltes continentaux pour la consommation globale de CO_2 par l'altération des silicates. Cela est dû au fait que les basaltes s'altèrent plus vite que les autres roches silicatées, de même que l'andésite qui a également un taux d'altération élevé.

Les régions volcaniques ont un taux d'altération élevé même lorsque les roches principales de ces régions ne sont pas des basaltes ou des andésites. En effet, d'autres facteurs expliquent l'importance de l'altération dans les régions volcaniques. Les roches volcaniques sont assez poreuses et donc une grande partie de l'altération aura lieu sous la surface. Sous la surface les taux d'altération sont plus importants car les températures sont plus élevées et le temps de résidence plus important. L'âge du matériau parental du sol a également une influence sur l'altération, les sols jeunes ont en effet une altération plus rapide (Goldsmith et al., 2010 ; Jones et al., 2011). L'étude de Dessert et al. (2003) souligne l'importance de l'activité hydrothermale sur l'altération des silicates qui sera développée à la section 2.2.3.

De nombreuses études montrent que l'activité volcanique n'est pas seulement une source de CO₂ mais est également un puits de CO₂ non négligeable (Gaillardet et al. 1999 ; Dessert et al., 2003 ; Dupré et al., 2003). Les arcs insulaires sont souvent situés dans des zones de volcanisme très actives, libérant gaz acides et cendres. Les taux d'altération de ces îles volcaniques sont donc importants, plus encore dans les îles avec des précipitations élevées comme en Indonésie car la pluie augmente le drainage et le ruissellement ce qui favorise le processus d'altération. Les arcs insulaires volcaniques regroupent tous les facteurs prépondérants à une altération importante (Gaillardet et al., 2011a). Ceci explique l'intérêt de l'étude des arcs insulaires volcaniques dans ce mémoire.

2.2 Arcs insulaires volcaniques

La subduction est un processus géologique où une plaque océanique va s'incurver et descendre sous une autre plaque de densité plus faible, continentale ou océanique. La subduction a donc lieu où les plaques océaniques convergent (Roeder, 2012). Les arcs insulaires sont formés lorsque deux plaques océaniques se rencontrent. Une des plaques océaniques va s'incurver et descendre sous l'autre plaque créant une fosse océanique. La plaque qui a la densité la plus faible s'incurve et descend dans la Terre en emmenant de l'eau avec elle, sa pression augmente avec la profondeur. L'eau permet au manteau de fondre car elle diminue sa température de fusion. Le magma ainsi formé va remonter à la surface. Ce processus donnera finalement des îles volcaniques formées par la succession de magmas refroidis. Ces îles vont former une chaîne d'îles volcaniques appelée arcs insulaires volcaniques (Grotzinger et Jordan, 2014). Un exemple de la formations d'un arc insulaire est visible à la figure 4 avec la formation des îles Mariannes, dans la mer des Philippines.

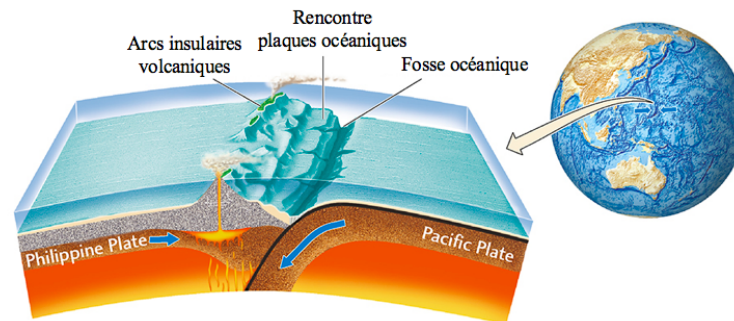


FIGURE 4 – Formation d'un arc insulaire volcanique lors de la rencontre de la plaques océanique des Philippines et de la plaque océanique du Pacifique (Schéma modifié de Grotzinger et Jordan, 2014).

Un système hydrothermal est un système où il y a un transfert de chaleur par convection via la circulation d'eau (Finizola, 2002). Les systèmes hydrothermaux se développent dans des régions où il y a de forts gradients thermiques avec une circulation de fluides (liquide ou gazeux) associée. Les systèmes tectoniques, géopressurisés et magmatiques peuvent induire un système hydrothermal. Les systèmes hydrothermaux magmatiques sont les plus actifs et se développent au sein d'un volcan particulier (Detienne, 2016). Les systèmes hydrothermaux magmatiques sont ceux qui caractérisent les arcs insulaires volcaniques étudiés ici.

2.2.1 Le fonctionnement des systèmes hydrothermaux magmatiques

Un système hydrothermal nécessite plusieurs composantes pour être actif. Il faut un fluide, une source de chaleur et des roches perméables permettant la circulation du fluide (Pringle et Triska, 2000). Les systèmes hydrothermaux magmatiques sont des systèmes hydrothermaux où la chaleur qui les conduit et une partie de leurs fluides proviennent du corps magmatique.

Le magma est un mélange de roche fondue, de substances volatiles et de cristaux qui s'accumule sous la surface de la Terre. Les substances volatiles surtout composées d'eau, de carbone, de soufre et de chlore

peuvent s'exsoler du magma. Cela se passe lors du refroidissement, de la décompression ou de la cristallisation de celui-ci. Ces substances volatiles vont ensuite suivre les canalisations des roches et rencontrer l'eau. Cela va mener à une cellule convective entraînée par des gradients de pression et de température donnant lieu à la circulation hydrothermale. La circulation hydrothermale est le mouvement d'eau dans la couche terrestre résultant de gradients thermiques et de densité. Le système hydrothermal se caractérise par un courant ascendant de fluides chauds au-dessus de la source de chaleur et un courant descendant de fluides froids provenant de la recharge d'eau météorique (Stimac et al., 2015 ; Detienne, 2016).

L'activité hydrothermale peut se manifester visuellement en surface. L'eau chauffée en profondeur peut revenir en surface sous la forme de lacs acides, de sources thermales et de geysers. Si les substances volatiles du magma ne rencontrent pas l'eau et atteignent directement la surface ils forment des émissions de gaz chauds, appelés fumerolles (figure 5) (Finizola, 2002).



(a) Fumerolle, volcan Merapi en Indonésie (Grotzinger et Jordan, 2014).



(b) Geyser, parc national de Yellowstone, USA (Futura, consulté le 02/02/19).



(c) Lac hyper acide du Kawah Ijen, Indonésie (Rodriguez et van Bergen, 2015).

FIGURE 5 – Manifestations de surface des systèmes hydrothermaux.

2.2.2 La classification des systèmes hydrothermaux

Les systèmes hydrothermaux qui fonctionnent en association avec une activité magmatique peuvent être regroupés et sont appelés magmatic-related hydrothermal systems (MRHS) (Bogie et al., 2005). Une classification tectonique de ces systèmes hydrothermaux est compliquée par la présence de systèmes de type marin et sous marin ainsi que par la présence de certains MRHS dans un environnement tectonique particulier. Bogie et al., (2005) proposent une classification plus simple qui consiste à diviser ces systèmes hydrologiquement. Cette classification est illustrée à la figure 6.

La première séparation distingue les systèmes sous-marins des systèmes subaériens. Les systèmes subaériens sont des systèmes dont le sommet est plus haut que le niveau de l'eau en opposition aux systèmes sous-marins qui se situent sous la surface. Les systèmes subaériens sont ensuite divisés en systèmes basales, stratovolcans et en systèmes géants dominés par la vapeur. Les systèmes basales sont localisés dans des bassins topographiques, principalement des rifts et peuvent être divisés en systèmes à haute ou faible salinité. Les systèmes "stratovolcan" sont hébergés par des stratovolcans, volcans composites. Les systèmes stratovolcan peuvent encore être séparés en systèmes immatures (systèmes plus magmatiques) ou matures. En ce qui concerne les systèmes sous-marins, c'est la nature du fluide hydrothermal qui est la clé de la classification. Ainsi, il y aura d'un côté les systèmes dont le fluide hydrothermal est l'eau de mer et de

l'autre le magma.

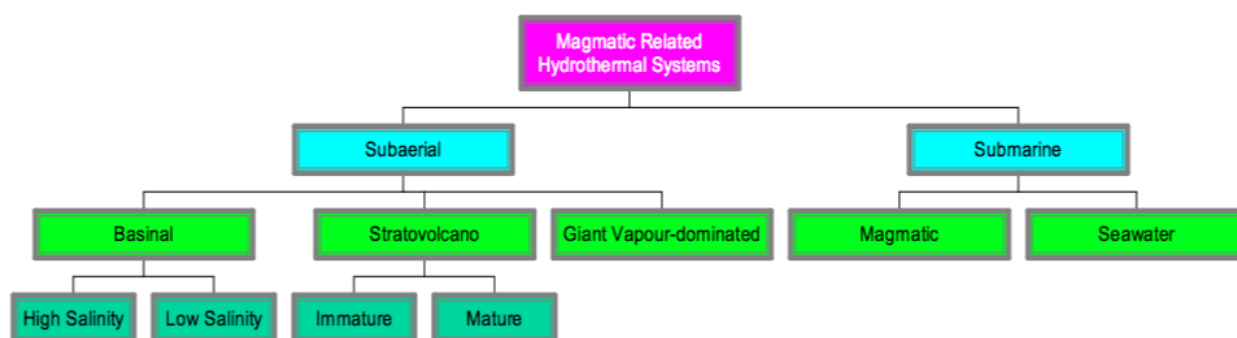


FIGURE 6 – Classification des MRHS (Bogie et al., 2005).

2.2.3 L'altération hydrothermale

Au sein de systèmes hydrothermaux, les flux d'altération peuvent être particulièrement importants ; cela est dû à l'interaction des fluides hydrothermaux avec les roches. L'altération est alors appelée altération hydrothermale.

Les arcs insulaires volcaniques sont situés dans des zones de subduction où le volcanisme est très actif. Les systèmes hydrothermaux au sein des volcans vont augmenter l'altération. Les eaux souterraines acides et à haute température des régions volcaniques produisent une altération intense des roches. Les eaux de surface des régions volcaniques, bien qu'elles ne soient pas à haute température, augmentent l'altération. Ces eaux sont chargées en acide sulfurique (H_2SO_4) et acide chlorhydrique (HCl) qui sont des sources d'acidité pour l'altération (Dessert et al., 2009 ; Gaillardet et al., 2011).

D'autres études doivent être effectuées pour pouvoir quantifier la contribution de l'altération hydrothermale sur les flux d'altération afin de dériver la proportion des flux d'altération liée à la consommation de CO_2 atmosphérique.

2.3 Le silicium

Le silicium (Si) est le huitième élément le plus abondant sur Terre et le deuxième dans la croûte terrestre. Le silicium représente 28% de la masse de la croûte terrestre tandis que l'oxygène représente 49%. On ne le retrouve pas dans la nature sous forme de Si pur mais sous forme de silicate, de silice ou d'acide silicique. Les silicates sont des minéraux formés essentiellement de SiO_4 comme le feldspath par exemple. La silice ou SiO_2 peut se retrouver soit sous forme cristalline comme dans le quartz soit sous forme amorphe comme dans le squelette des diatomées. Enfin l'acide silicique, H_4SiO_4 est la forme soluble et se retrouve dans la solution du sol ou dans les eaux des rivières et des océans par exemple.

2.3.1 Interaction entre le cycle du silicium et celui du carbone

Le cycle du silicium soulève l'intérêt scientifique de par son interaction avec le cycle du carbone (Carey et Fulweiler, 2012). En effet, le cycle du silicium régule la concentration en CO_2 via trois différents processus.

Premièrement, l'altération chimique des minéraux silicatés régule la concentration en CO_2 comme expliqué dans le chapitre précédent. La deuxième interaction entre ces cycles vient de la formation de phytolithes. Les phytolithes sont des particules formées par les plantes et composées de silice amorphe. Lors de la formation de ces particules dans la plante, du carbone organique peut être séquestré dans le phytolithe alors appelé PhytOC. La proportion de carbone séquestré dans les phytolithes varie de 1 à 6 %. Le carbone séquestré peut être restitué au sol lors de la dégradation des PhytOC (Huang et al., 2014 ; Parr et Sullivan, 2005). Enfin, le silicium et le cycle du carbone sont liés au niveau des diatomées. La silice forme les structures du squelette d'une variété de plancton aquatique, y compris de nombreuses diatomées, des radiolaires et des éponges. Par conséquent, la silice est un nutriment important qui contrôle la production primaire dans les systèmes aquatiques. Or ces diatomées sont responsables d'une grande partie de la consommation de CO_2 par l'océan. Le cycle marin du silicium est donc très étudié (Tréguer et al., 1995 ; Tréguer et De La Rocha, 2013).

La figure 7 montre le pourcentage de la consommation du carbone par rapport à la consommation totale continentale moyenne. Ce pourcentage a été calculé pour la consommation du carbone par les phytolithes, les diatomés et l'altération du silicate. La figure 7 est exprimée en pourcentage de l'absorption totale de carbone, sur une période allant de 2000 à 2099. On remarque que l'occlusion de carbone par les phytolithes pourrait être très importante mais l'incertitude est importante comme le montre la barre d'erreur de la figure 7. Différents mécanismes lient donc les cycles du carbone et du silicium et entraînent une consommation de CO_2 (Song et al. 2017).

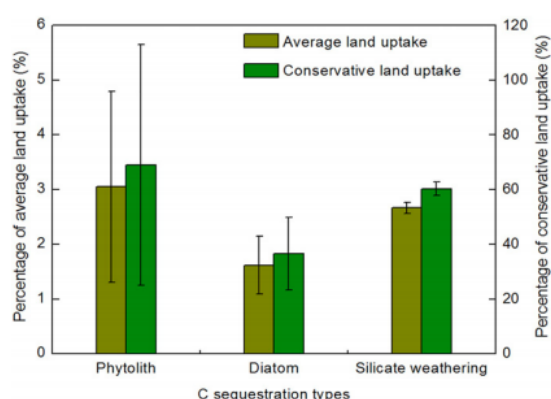


FIGURE 7 – Comparaison de la séquestration cumulative de carbone organique par les phytolithes, les diatomées et par l'altération des roches silicatées (Song et al. 2017).

2.3.2 Cycle du silicium

Le silicium est présent dans différents réservoirs et sous différentes formes. Tout d'abord, dans le sol, au niveau de la lithosphère, on trouve des minéraux primaires, les silicates lithogéniques tels que l'anorthite ou le quartz. Le sol contient, dans la pédosphère, différentes formes de silicium : les silicates pédogéniques comprenant la kaolinite, les silicates hérités de la lithosphère ou encore du silicium dissout, H_4SiO_4 (DSi). Ce silicium dissout peut être prélevé par les plantes. Ce qui amène à un autre réservoir, la biosphère. Dans la biosphère, le silicium est dit biogénique (BSi) et est, soit d'origine végétale, soit issu de l'ingestion animale. Enfin, le dernier réservoir est l'hydrosphère qui aura principalement du silicium dissout et biogénique (dans les diatomées, les organismes aquatiques) (Cornelis et Delvaux, 2016).

La figure 8 montre une version simplifiée de ce qui se passe lors de l'altération des minéraux primaires silicatés. Cette altération produit du silicium dissout qui, par voies fluviales, rejoint les océans et y est assimilé par les diatomées. Le DSi assimilé par les cultures n'est pas restitué au sol en cas d'exportation de celles-ci.

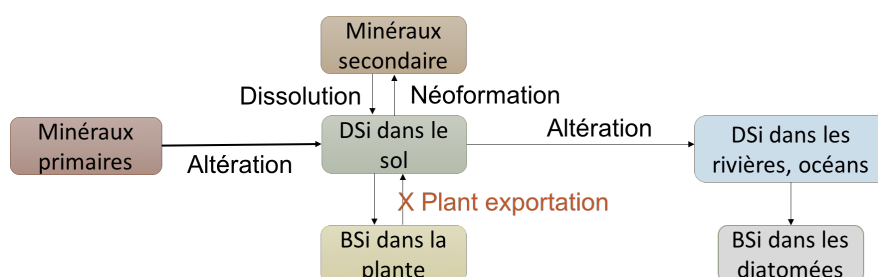


FIGURE 8 – Cycle simplifié du Si.

La figure 9 montre les différentes interactions entre les réservoirs de Si et permet de se concentrer sur le système sol-plante.

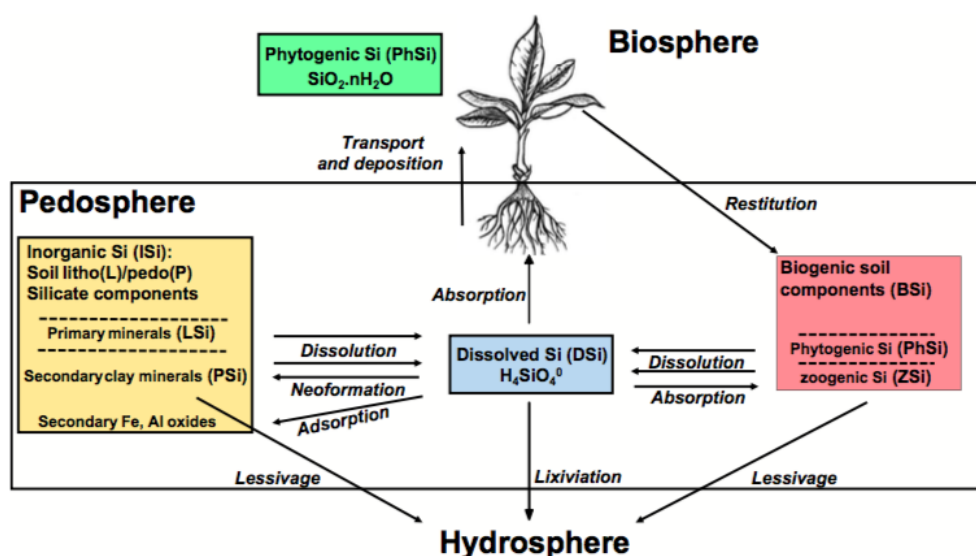


FIGURE 9 – Réservoirs et flux de silicium dans le système sol-plante (Cornelis et Delvaux, 2016). Silicates lithogéniques (LSi) ; Silicates pédogéniques (PSi) ; Silicium biogénique (BSi), Silicium d'origine végétale (PhSi) ; Silicium issu de l'ingestion animale (ZSi)

Dans le sol, on retrouve de l'acide silicique (H_4SiO_4) en solution. La principale source de silicium dissout est l'altération de minéraux silicatés. Le DSi peut ensuite être transféré dans les rivières. Le DSi se retrouve par après dans l'océan et contribue au cycle océanique du silicium. Le cycle marin du silicium est très important et largement étudié dû à son interaction avec le cycle du carbone. En effet, le silicium est un élément essentiel pour les diatomées. En supposant que les autres nutriments nécessaires à la croissance des diatomées sont présents dans l'océan, au plus il y aura de silicium dissout dans l'océan au plus le carbone pourra être exporté par les organismes marins comme les diatomées (Sommer et al., 2006). Cela signifie que le silicium dissout dans l'océan participe à diminuer le stock de carbone atmosphérique.

Le DSi en solution dans le sol n'est pas entièrement transféré vers les rivières et peut ensuite suivre plusieurs voies. Il peut, avec les autres produits de la dissolution du minéral primaire, participer à la néoformation d'un minéral secondaire, pédogénique. Le silicium dissout peut aussi s'adsorber sur des oxydes ou hydroxydes de fer et d'aluminium. Enfin, le DSi peut être absorbé par la plante et le silicium devient alors du silicium biogénique sous forme de particules d'opale, les phytolithes (Cornelis et al., 2011). Les phytolithes une fois restitués au sol vont subir les mêmes processus que d'autres particules sédimentaires à savoir l'altération, le transport ou le dépôt (Shakoo et al., 2014).

2.4 Le silicium dans les rivières

On peut séparer le cycle du silicium en deux cycles distincts, le cycle terrestre et le cycle marin. Le schéma réalisé par Frings et al. (2016) illustre ces cycles et quantifie l'ampleur des flux de silicium en mol par an (figure 10). L'impact du flux de silicium dissout des rivières vers l'océan est important et permet de relier ces deux cycles. En effet, le flux de silicium terrestre vers l'océan contribue à plus de 80% du DSi arrivant dans l'océan (Tréguer et De la Rocha, 2013).

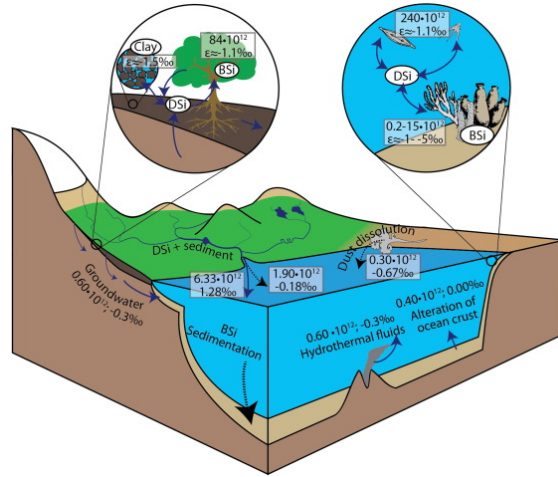


FIGURE 10 – Flux de silicium (mol/an) dans différents réservoirs. Les lignes en pointillés indiquent les flux de particules et les lignes pleines indiquent les flux de solutés ou les transformations (Frings et al., 2016).

Le silicium contenu dans les eaux de rivière peut provenir de l'altération chimique des roches et est alors sous forme de DSi. Les rivières peuvent également transporter des particules de silice amorphe provenant des diatomées et des phytolithes. Avant de rejoindre l'océan, les flux provenant des rivières peuvent stagner dans des estuaires.

Tréguer et De La Rocha (2013) ont réalisé une estimation des flux de Si des rivières vers l'océan. Ils obtiennent une estimation de l'apport brut de DSi des rivières vers les estuaires ($F_{R(grossDSi)}$) de $6,2 \pm 1,8$ Tmol de Si par an. L'incertitude de cette valeur s'explique par un manque de connaissance de la variation saisonnière du cycle du silicium ainsi que par l'extrapolation des données à une échelle mondiale. Les rivières transportent également un flux de silicium particulaire, lithogénique et biogénique assez important. Cependant les composants lithogéniques sont considérés comme étant assez insolubles et c'est donc la partie biogénique amorphe qui sera quantifiée. L'estimation du flux de silice amorphe biogénique ($F_{R(bSiO_2)}$) est de $1,1 \pm 0,2$ Tmol de Si par an. On sommant ces deux apports de Si, on obtient un apport des rivières vers les estuaires de ($F_{R(gross)}$) $7,3 \pm 2$ Tmol de Si par an.

Le Si apporté par les rivières n'est cependant pas intégralement exporté dans l'océan. Une partie est précipitée dans les estuaires via deux processus. Le Si peut être incorporé à la silice biogénique lors de la prolifération des diatomés dans les estuaires. Le Si peut également alimenter des réactions de formations de minéraux silicatés, ce qui diminue la quantité de Si. Ce processus est appelé "altération inverse"

(Reverse weathering) (Michalopoulos et Aller, 1995). Ces processus diminuent la quantité de Si dans les estuaires avant que les flux de Si ne rejoignent l'océan. Tréguer et De La Rocha (2013) estiment le flux de l'incorporation du Si biogénique et de l'altération inverse à $1,5 \pm 0,5$ Tmol de Si par an. Ils calculent donc l'apport net des rivières comme ceci :

$$F_{R(net)} = F_{R(gross)} - F_{RW} = 7,3 \pm 2 - 1,5 \pm 0,5 = 5,8 \pm 2,5 \text{ Tmol de Si par an}$$

2.5 Le silicium dans les plantes

Le silicium n'est pas considéré comme un élément essentiel pour les plantes malgré le fait qu'il ait de nombreux effets bénéfiques pour celles-ci. Un élément est considéré comme essentiel si la déficience en cet élément empêche la plante de compléter son cycle de vie. Le Si n'est pas un élément essentiel pour la plante mais améliore sa croissance et sa résistance à différents stress. Le silicium est ainsi évalué comme étant un élément "quasi essentiel" pour les plantes (Epstein, 1994).

2.5.1 L'absorption du silicium par les plantes

Bien que le silicium soit présent dans toutes les plantes, ses concentrations sont très variables et dépendent du type de plantes. Les plantes peuvent donc être classées en fonction de leur absorption en silicium : les plantes accumulatrices actives, accumulatrices passives (ou intermédiaires) et non-accumulatrices. Les plantes accumulatrices actives sont celles dont l'absorption de DSi est supérieure à l'absorption passive par le flux de transpiration (Carey et Fulweiler, 2012).

Le type d'accumulation de silicium dans les plantes est fortement lié à la phylogénie. Les ptéridophytes et les gymnospermes sont souvent peu accumulateurs de silicium au contraire des plantes non vasculaires qui ont une concentration beaucoup plus importante en silicium. La concentration en silicium peut également varier au sein de la même espèce (Cooke et Leishman, 2011). Le tableau 1 montre des exemples d'espèces végétales pour les différentes sortes d'accumulation de silicium.

Tableau 1 – Classification de différentes espèces végétales selon leur mode d'accumulation de silicium (Bakhat et al., 2018).

Accumulatrice (>1,5% Si)	Intermédiaire (1.5-0.5% Si)	Non accumulatrice (<0,5% Si)
Riz	Citrouille	Tomate
Fougère	Concombre	Pensée
Blé	Impatiens de Nouvelle-Guinée	Muflier à grandes fleurs
Epinard	Souci	Géranium
Mousse	Chrysanthème	Tournesol
Canne à sucre	Soja	Gerbera
Conifère	Zinnia	Pétunia
Prêle (Equisetum)	Rose	Bégonia
Lentille	Courge	Raisin

Les plantes prélèvent le silicium en solution dans le sol sous forme d'acide silicique. L'absorption et le transport du Si dans la plante peut être soit actif soit passif. Dans le transport passif, le DSi est transporté de façon non sélective avec l'eau via le flux de transpiration. Ce type d'absorption correspond aux plantes accumulatrices passives. Avec ce type de plante, la concentration en silicium dans la solution du sol ne varie pas étant donné que le silicium est prélevé avec la solution de sol. Lors de ce transport passif, les plantes ne dépensent pas d'énergie métabolique pour l'absorption du silicium. Le silicium est transporté

par le xylème de manière passive avec le flux de sève vers les parties aériennes de la plante. Le transport actif de l'acide silicique demande quant à lui de l'énergie à la plante (Mitani et Ma, 2005).

Ma et al. (2001) ont établi que les racines latérales du riz jouent un rôle fondamental dans l'absorption du silicium contrairement aux poils absorbants. Ils ont également démontré que l'absorption active du silicium et la présence de racines latérales sont corrélées et que le gène contrôlant la formation de ces racines est un gène dominant chez le riz. Les plantes sont donc en contrôle lors de l'absorption active du silicium. Ces plantes accumulatrices actives de silicium absorbent le silicium à un taux plus élevé qu'elles n'absorbent l'eau ce qui signifie que l'eau du sol se trouve appauvrie en silicium lorsque ces plantes poussent sur celui-ci (Shakoor et al., 2014).

La distinction entre les différences d'accumulation de silicium de différentes espèces peut s'expliquer par des différences au niveau de la capacité d'absorption du silicium. Mitani et Ma (2005) ont étudié trois espèces de plantes : le riz, le concombre et la tomate et montrent que l'absorption du Si implique au moins deux processus :

- Le transport radial du Si de la solution externe vers les cellules corticales ;
- La libération du Si des cellules corticales dans le xylème.

Le transport radial du Si de la solution externe vers les cellules corticales peut se faire soit par transport via un transporteur (SIT1) soit par diffusion passive. La densité de ce transporteur diffère d'une espèce végétale à l'autre, ce transporteur est plus présent chez le riz, puis chez le concombre et enfin dans la tomate. Le chargement de Si par le xylème est effectué par un transporteur putatif (SIT2) dans le riz, mais par diffusion chez d'autres espèces moins accumulatrices comme le concombre et la tomate. Cette étude permet d'établir que l'absorption plus faible du silicium s'explique par une plus faible densité de SIT1 et une absence de SIT2 chez certaines espèces de plantes. En d'autres termes, les différences d'absorption du Si dépendent de la capacité d'absorption du Si de la plante et, par conséquent, du chargement de silicium dans le xylème.

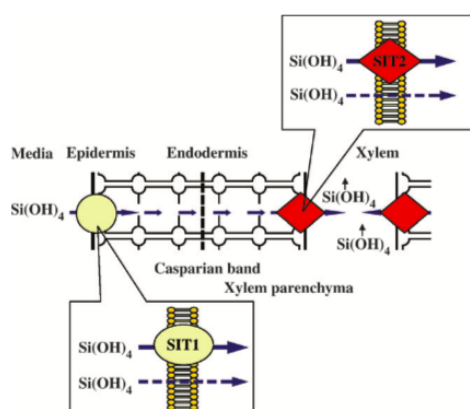


FIGURE 11 – Représentation des systèmes d'absorption du Si des plantes (Mitani et Ma, 2005).

2.5.2 Les phytolithes

Un phytolithe est un corps solide de silice amorphe formé par les plantes. Les phytolithes contiennent environ 90% de silice, 1 à 6% de carbone organique ainsi que d'autres éléments en trace tel que le fer et l'aluminium (Song et al., 2014a). Les phytolithes représentent aux alentours de 90% de la teneur en silice d'une plante. Cela signifie qu'on peut estimer la concentration en silice d'une plante grâce à son contenu en phytolithes (Song et al., 2014b). Li et al. (2013) ont obtenu que la quantité de phytolithes contenant du carbone dans les différents organes d'un plant de riz varie de 0.4 mg/g à 2.8 mg/g. Cette étude montre que la plus grande accumulation de phytolithes se situe dans les feuilles. De plus, cette étude établit que les grains sont beaucoup moins concentrés en phytolithes que les autres organes dans un plant de riz. La figure 12 est une photographie au microscope d'un phytolithe bulliforme dans le riz.

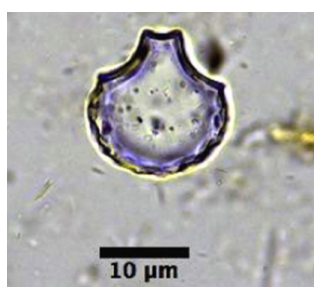


FIGURE 12 – Phytolithe bulliforme de riz (*Oryza sativa*) (Zhang et al., 2016).

Guntzer et al. (2012) résument les effets bénéfiques qu'ont les phytolithes sur les plantes. L'absorption du Si par les plantes va diminuer la toxicité en aluminium, fer ou encore en manganèse. Les dépôts de phytolithes permettent d'augmenter la résistance de la plante à différents stress. Les phytolithes améliorent la résistance mécanique de la plante ce qui la rend plus résistante aux événements venteux et pluvieux plus intenses. L'accumulation de Si augmente également la résistance des plantes face aux insectes et pathogènes ainsi que la résistance au stress hydrique et salin.

La formation de phytolithes dans les parois des cellules végétales résulte de l'accumulation d'acide silicique, suivie par la polymérisation et la formation de petits corps opalins (Sangster, 1970). Ces particules d'opales sont sous la forme de $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ et diffèrent de forme en fonction de l'espèce végétale et de leur localisation. Trois endroits au sein de la plante sont reconnus comme étant des endroits où la silicification a lieu : la paroi cellulaire, la lumière cellulaire et les espaces intercellulaires (Sangster et al., 2001).

Lorsque la plante meurt ou perd ses feuilles, les phytolithes sont restitués au sol où ils pourront être partiellement dissouts. Une fois dans le sol, les phytolithes sont altérés au même titre que les minéraux silicatés. Les phytolithes ont un taux de dissolution assez élevé quand le sol a un pH allant de 4 à 8. Le graphe de la figure 13 montre le taux de dissolution des phytolithes en fonction du pH, on voit que le taux de dissolution augmente avec le pH. La figure 13 montre que le taux de dissolution des phytolithes est plus élevé que le taux de dissolution d'autres minéraux comme la smectite ou la kaolinite (Guntzer et al., 2012). Il faut toutefois préciser que la stabilité va dépendre de différents facteurs tels que la composition

du phytolithe ou le climat (Song et al., 2014).

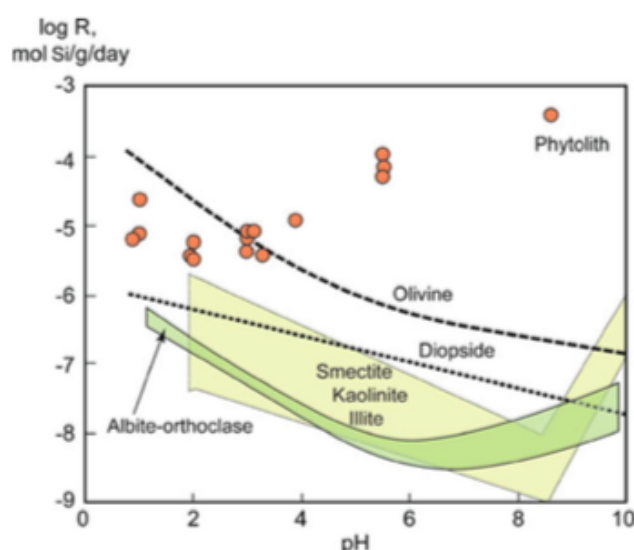


FIGURE 13 – Taux de dissolution ($\log R$ en mol Si/g.jour) de différents minéraux fréquents et de phytolithes en fonction du pH (Guntzer et al., 2012).

2.5.3 L'impact des cultures sur le cycle du silicium

Carey et Fulweiler (2012) établissent le fait que ce sont les terres cultivées qui fixent la plus grande quantité de silicium annuellement (29 Tmol/an). Cela est dû au fait que de nombreuses cultures sont accumulatrices de silicium telles que les cultures de riz, de blé, de maïs, de banane et de canne à sucre. De plus, il y a une plus grande quantité de biomasse sur les terres agricoles que sur d'autres biomes. On peut voir l'ensemble des résultats pour les 11 biomes représentés dans cette étude au tableau 2.

Carey et Fulweiler (2012) attirent l'attention sur l'impact de l'agriculture sur le cycle de silicium et sur l'augmentation de cet impact dans les prochaines décennies. Une croissance de l'agriculture aura pour conséquence une augmentation de la quantité de silicium biogénique fixée par les plantes. Il est estimé que la surface des terres de culture va augmenter de 18% d'ici 2050. Carey et Fulweiler sur base de cette projection, estiment que la conversion des forêts tropicales en terres agricoles augmenterait la fixation de silicium de $7,5 \text{ Tmol de Si/ an}$ soit une augmentation de 9%. Le silicium lors de la culture est en grande partie exporté ce qui va perturber son cycle. C'est pourquoi l'agriculture doit être vue comme une composante à part entière du cycle du silicium. A long terme, la conversion de terres en terres agricoles pourrait affaiblir le réservoir du sol en BSi. En effet, en agriculture le BSi des plantes n'est pas restitué aux sols car elles sont récoltées et exportées. Cela va impacter la pompe terrestre du silicium et donc également les flux de Si vers l'océan.

Tableau 2 – Quantité de silicium (Tmol/an) fixé par les biomes majeurs (Carey et Fulweiler, 2012).

Biome Type	NPP (C) $\times 10^3$ (Tmol yr ⁻¹)	Avg %Si by wt.	Si:C	Si (Tmol yr ⁻¹)
Tropical wet and moist forest	0.69	0.30	0.006	4.48
Tropical dry forest	0.40	0.28	0.006	2.35
Temperate forest	0.50	0.21	0.004	2.22
Boreal forest	0.53	0.23	0.005	2.65
Tropical woodland and savanna	0.93	1.13	0.024	22.19
Temperate steppe	0.41	1.53	0.032	13.26
Desert	0.12	0.26	0.006	0.65
Tundra	0.12	1.07	0.023	2.66
Wetland	0.32	0.62	0.013	4.16
Cultivated land	1.01	1.37	0.029	29.41
Rock and ice	0	0.00	0.000	0
Average		0.64	0.014	
Total	5.02			84.03

Comme vu plus haut, la concentration en Si dans la plante varie en fonction du type de plante. Ce n'est donc pas la culture qui produit le plus de biomasse qui est nécessairement celle qui produit le plus de BSi. Carey et Fulweiler (2016) ont calculé la production annuelle de BSi des dix cultures les plus productives en masse à l'échelle mondiale. Ils ont pris en compte les masses produites par ces cultures ainsi que leur contenu en silicium pour obtenir au final une quantité de BSi produit en T.mol Si/an. La figure 14 représente les résultats obtenus par Carey et Fulweiler et montre que le riz est la culture qui produit le plus de BSi à l'heure actuelle, devant le blé et la canne à sucre. Ce mémoire s'intéresse à la culture de riz plus particulièrement étant donné qu'il s'agit de la culture qui produit le plus de BSi à l'échelle mondiale.

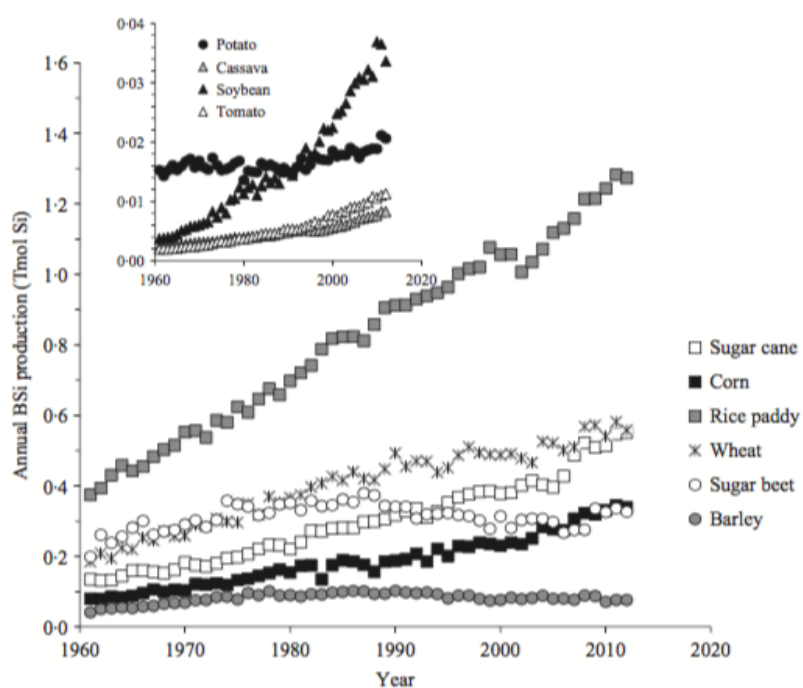


FIGURE 14 – Production annuelle globale de silicium biogénique des 10 cultures les plus productives en fonction des années (Carey et Fulweiler, 2016).

2.6 Culture de riz

2.6.1 Le plant de riz

Le riz est une céréale qui appartient à la même famille que le blé et le maïs. Le riz est une herbe de genre *Oryza*. Ce genre comprend 22 espèces différentes mais seulement deux espèces sont cultivées par l'homme pour l'alimentation : *Oryza sativa* (riz asiatique) et *Oryza glaberrima* (riz africain). Ce sont deux espèces cultigènes, résultant d'une culture sélective par l'homme (Ricepedia, consulté le 25/02/19).

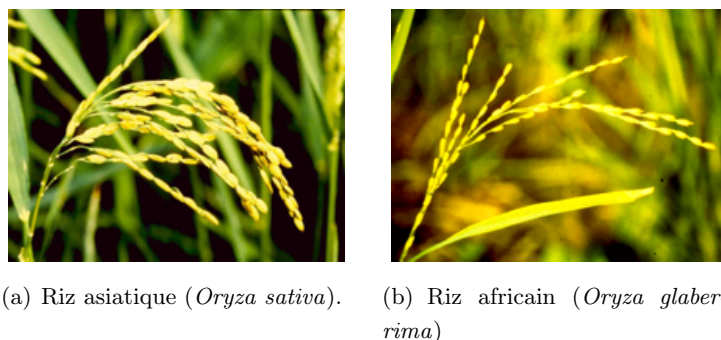


FIGURE 15 – Riz asiatique et riz africain (RICE HUB, The Rice Plant).

Le riz est prêt pour la récolte après une période qui diffère selon la variété et les conditions climatiques. Les variétés ayant un cycle court sont mûres après une période allant de 105 à 120 jours tandis que les variétés à cycle long sont mûres en 150 jours.

Pour germer, le plant de riz a besoin d'eau en quantité suffisante et d'une exposition à des températures allant de 10 à 40 °C. Lorsque le riz est planté dans des champs inondés, la pousse émerge d'abord de la graine et les racines se développent une fois que la pousse sort de l'eau et atteint l'air. Pour la culture du riz, il est fréquent de transplanter le plant de riz déjà germé.

Après la germination vient la phase végétative qui se caractérise par le développement des talles. La durée de la phase végétative va dépendre des variétés et varie le plus souvent entre 55 et 85 jours. La phase végétative se marque également par la croissance de la tige et du nombre de feuilles. La tige arrête de grandir avant la fin de la phase végétative qui est marquée par l'initiation paniculaire. Cela entame la phase reproductive pendant laquelle le panicule continue de se développer et sort de la tige. La phase de maturation commence alors avec la floraison du plant de riz. Les conditions climatiques telles que la pluie et le froid vont retarder la maturation de la plante. La phase de maturation prend fin quand le plant de riz est prêt à être récolté. La figure 16 représente les différents stades de croissance d'un grain de riz.

Les plants de riz accumulent du Si au fur et à mesure de leur croissance. Une étude de 18 parcelles de riz montre que l'absorption en Si est plus importante au stade de récolte qu'au stade de tallage (tillering sur la figure 16). Cette étude s'effectue sur deux ans et certains plants de riz sont fertilisés avec du silicate de Mg ou Ca. Les résultats montrent que les plants de riz au stade de récolte ont une quantité en Si plus élevée. En 2007, les plants de riz non fertilisés au stade de tallage ont une quantité en Si de 102 kg/ha alors

que lorsqu'ils sont à maturité la quantité monte à 979 kg/ha. Pour les plants de riz fertilisés, la quantité de Si passe de 123 kg/ha à 1142 kg/ha. Des résultats similaires sont obtenus pour l'année 2018. Une autre conclusion de cette étude est qu'aucune corrélation entre le Si disponible dans le sol et la quantité de Si absorbée par la plante n'est observée au stade de tallage. Une corrélation significative est par contre observée lorsque les plants sont à maturité (Makabe-Sasaki et al., 2014).

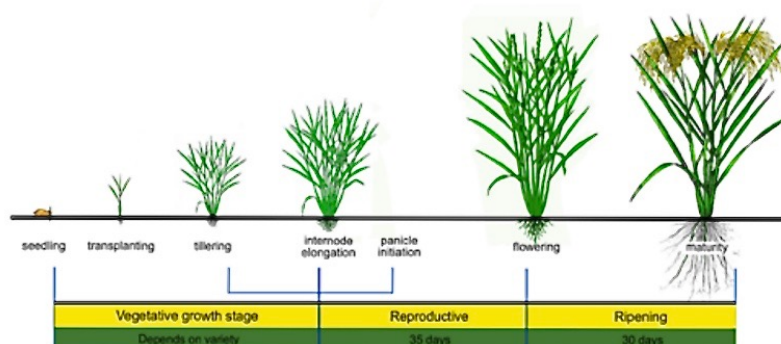


FIGURE 16 – Représentation des trois stades de croissance du riz : la phase végétative, reproductive et de maturation (IRRI, Steps to successful rice production).

2.6.2 Techniques de culture

La culture du riz est assez souple car le riz peut pousser dans des conditions sèches ou humides ainsi qu'à haute ou basse altitude. Les quatre méthodes de culture les plus utilisées dans le monde sont expliquées ici (Seck et al., 2012).

1. Riz irrigué. Les cultures de riz irriguées se veulent d'assez petites tailles (0,5 à 2 hectares) et sont pourvues de systèmes d'irrigation qui fournissent et contrôlent la quantité d'eau. Cette méthode de culture est souvent couplée à une fertilisation et les rendements sont supérieurs aux autres méthodes de culture. Ce type de culture représente 75% de la production de riz mondiale.
2. Riz pluvial de plaines (rainfed lowland rice). Cette méthode de culture consiste à planter du riz dans des champs qui seront inondés par l'eau de pluie. Le riz est sous l'eau pendant une partie de sa culture. Les champs sont ensuite labourés et hersés. Le rendement est limité et la fertilisation peu utilisée avec ce système. Cette méthode de culture fournit environ 20% du riz mondial.
3. Riz pluvial de plateau (rainfed upland rice). Le riz est cultivé comme n'importe quelle autre céréale. Le champs est labouré avant la saison des pluies et le riz pousse normalement. Le rendement est faible, principalement à cause des périodes de sécheresse.
4. Riz inondé (deep water or floating rice). C'est un système où le riz pousse dans des champs où la profondeur de l'eau atteint un mètre pour une période allant de 10 jours à 5 mois. Les espèces de riz plantées dans ces conditions ont des caractéristiques particulières leur permettant de survivre et de grandir dans ces conditions spécifiques.

Les différentes pratiques culturales dépendent donc principalement de l'eau disponible dans les régions cultivées et de la répartition des pluies pendant l'année. Les rendements diffèrent avec les méthodes de culture et sont fort dépendants de la météo. Le système d'irrigation est le système le plus sûr car il assure un meilleur rendement et permet de fertiliser les cultures, contrairement aux autres méthodes où la fertilisation n'est pas conseillée.

2.6.3 Culture dans les arcs insulaires volcaniques

Les sols volcaniques sont en grande majorité des andosols qui sont des sols fertiles de par leurs propriétés. Les andosols ont souvent une structure de sol bien développée avec des pores de différents diamètres. Cela permet à ces sols de contenir une quantité importante d'eau disponible pour les plantes. De plus, ces sols ont une fraction argileuse riche en minéraux peu cristallins et non cristallins. Ces sols ont tendance à accumuler de la matière organique. Toutes ces propriétés montrent que les andosols ont un potentiel agricole élevé s'ils sont bien gérés (Shoji et al., 1993 ; Shoji et Takahashi, 2002 ; Delmelle et al., 2015).

D'ailleurs, les régions volcaniques sont les régions les plus cultivées comme le montre la carte de Ramankutty et al. (2008) (figure 17). Les régions volcaniques telles que les Philippines et l'Indonésie ont un pourcentage de terres cultivées supérieur aux autres régions.

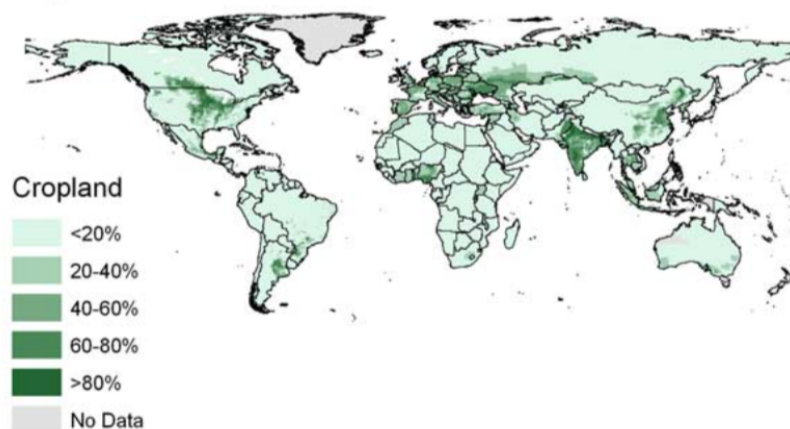


FIGURE 17 – Carte représentant le pourcentage de terres cultivées à la surface de la terre (Ramankutty et al., 2008).

3 Objectifs

Bien que les régions volcaniques ne représentent que 5% de la surface de la Terre, elles sont responsables de 30% de la consommation de CO_2 par l'altération des roches silicatées (Gaillardet et al., 1999 ; Dupré et al., 2003). Les flux de Si exportés par les eaux de rivière sont utilisés pour calculer des flux d'altération en zone volcanique, et estimer la consommation en CO_2 atmosphérique associée. La présence de cultures accumulatrices de Si dans ces régions pourraient contribuer à exporter une part de Si (sous forme dissoute) dérivé de l'altération. Cependant, la présence de ces cultures n'est actuellement pas prise en compte lors des calculs des flux d'altération et pourrait s'avérer non négligeable. Cela pourrait conduire à une sous-estimation du taux d'altération calculé sur base des concentrations en Si dans les eaux de rivière dans ces zones d'arcs volcaniques intensément cultivées.

L'objectif de ce mémoire est dès lors de comparer les flux de Si exportés par des cultures accumulatrices de Si à des flux de Si exportés par les rivières dans des arcs insulaires volcaniques. Plus précisément les **questions de recherches** sont :

- A) Les flux de Si exportés par les cultures sont-ils significatifs par rapport aux flux de Si exportés par les eaux de rivière dans les arcs insulaires volcaniques ?
- B) Quels sont les facteurs influençant les flux de Si exportés par les cultures ?

Pour répondre à ces questions, différents aspects sont évalués sur deux sites : les volcans mont Aso au Japon et Kawah Ijen en Indonésie. Des parcelles de riz sont analysées en vue de déterminer si le flux de Si exporté par les cultures est significatif par rapport au flux de Si des eaux de rivières. Pour arriver à cet objectif final différents sous-objectifs sont abordés :

- Quantifier le rendement des cultures de riz dans les sites étudiés et les facteurs qui vont l'influencer.
- Analyser la concentration en Si dans les plants de riz sur les sites étudiés et les facteurs qui l'influencent.
- Calculer l'export de Si par les cultures de riz sur les deux sites étudiés. L'export présenté en kg de Si par hectare cultivé sera comparé à des valeurs de la littérature scientifique et l'influence des pratiques culturales sur l'export de Si sera prise en compte.
- Calculer l'apport de Si par les eaux de rivières irriguant les cultures de riz étudiées. L'apport de Si sera analysé en kg de Si par hectare en tenant en compte de la totalité de la zone irriguée.

4 Matériel et méthode

4.1 Site d'étude de l'Aso

4.1.1 Description du site

L'Aso est un réseau de volcans actifs au Japon. Il est situé au sud du pays, sur l'île de Kyushu. Il se trouve dans la préfecture de Kumamoto, au centre de l'île de Kyushu (figure 18). La région de l'Aso s'étire autour du volcan Aso. L'Aso est un regroupement de 17 volcans centraux situés dans une caldeira. Cette caldeira mesure 25 km du nord au sud et 18 km d'est en ouest et plusieurs villages sont situés dans cette caldeira. La population de cette caldeira atteint 50 000 personnes et l'activité volcanique est surveillée de près (Gbank, Aso ; figure 18)



FIGURE 18 – Carte représentant les volcans actifs du Japon (Nippon, Ontake Erupts, Shows Difficulty of Predicting Volcanic Disaster)

L'Aso est un complexe volcanique actif depuis 300 000 ans. Quatre grandes éruptions ont eu lieu. La première éruption donna la forme actuelle de la caldeira. Les trois grandes éruptions suivantes agrandirent la caldeira qui prit sa forme finale il y a 70 à 80 mille ans suite à la quatrième grande éruption. Les principaux sommets de cette caldeira sont : Nekodake, Takadake, Nakadake, Eboshidake and Kishimadake. Le Mont Nakadake est un des volcans les plus actifs du Japon. Le cratère du Mont Nakadake est connu pour son lac d'eau hyper-acide ($\text{pH} < 1$) de couleur turquoise qui attire de nombreux visiteurs.

Les types de roches situées dans la caldeira sont variés, allant du basalte à la rhyolite. La majorité des éruptions ayant lieu au Mont Aso rejette des cendres basaltiques ou basaltiques-andésitiques (Hase et al., 2005). L'activité du volcan entraîne le dépôt successif de cendres volcaniques. Le sol du Mont Aso est qualifié d'andosol (Huang et al., 1995). Les matériaux parentaux des andosols sont majoritairement des projections d'origine volcanique mais peuvent être également d'autres matériaux riches en silicates (Base de référence mondiale pour les ressources en sols, 2015).

4.1.1.1 Climat

Le climat du Japon se décline en 4 saisons. L'hiver, de novembre à mars, divise le Japon en deux. Dans la zone septentrionale, il y a un vent froid et humide donnant lieu à d'importantes chutes de neige. Tandis que l'est est soumis à un vent froid mais sec. Vient ensuite le printemps, de mars à mai, qui se caractérise par la période des cerisiers en fleurs. L'été, de juin à septembre, est marqué par différentes saisons, en juin et septembre c'est la saison des pluies tandis qu'en juillet et août le climat est plus sec. De fin septembre à novembre, c'est l'automne où les typhons sévissent de fin septembre à fin octobre (JMA, Climate Northern Kyushu district).

Les données de pluviométrie illustrées à la figure 19 ont été récoltées à Otohime, situé à seulement 5 km à vol d'oiseau du Mont Aso. Ces données vont de janvier 2014 à décembre 2015 et permettent donc de visualiser les pluies sur deux années entières. On observe une saison humide, entourée sur le graphe en jaune, allant de juin à août qui diffère un peu du climat japonais global présenté plus haut. Ces données pluviométriques mettent en évidence une variation évidente en fonction des années. L'année 2015 a eu des précipitations plus importantes que l'année précédente. Cela met en évidence l'importance de l'irrigation car la pluie reste une incertitude.

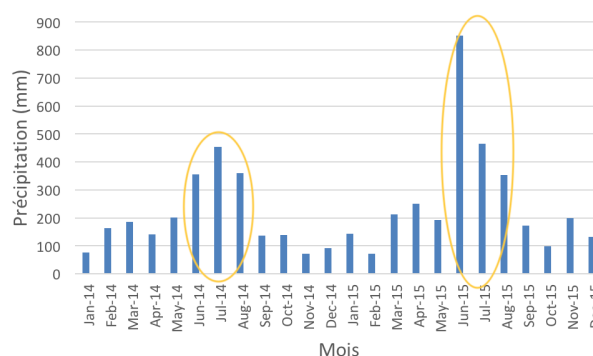


FIGURE 19 – Données pluviométriques à Otohime, Kumamoto, Japon. Représentation de la somme des pluviométries mensuelles de janvier 2014 à décembre 2015. Les zones entourées en jaune correspondent à la saison humide.

4.1.1.2 Culture de riz

La plupart des parcelles de riz au Japon se trouvent dans les plaines de grands bassins hydrographiques et sont irriguées avec l'eau de rivières situées à proximité car le riz a besoin de beaucoup d'eau pour pousser.

Le riz est habituellement cultivé avec irrigation afin d'assurer un bon rendement. Le cycle de culture du riz est interconnecté avec les saisons. Le riz est planté au printemps et récolté en automne.

Au début du printemps, les fermiers commencent à préparer le sol pour la culture. Ils labourent le sol et le recouvrent de paille afin de l'aérer et le rendre plus drainant. Au même moment, les fermiers vont préparer les semis. Ils choisissent des grains de riz non décortiqués, récoltés l'année précédente pour les semis qui auront lieu en serre. Une fois que les semis ont germé et atteint une taille assez importante, ils peuvent être plantés. Avant la plantation des semis, les parcelles sont inondées et des fertilisants sont appliqués. La figure 20 montre la plantation des plants de riz dans les parcelles inondées, à l'aide d'une machine spécifique.



FIGURE 20 – Plantation des semis de riz (Kome-Academy, Rice Farming in Japan)

En été, le riz continue sa croissance ce qui concorde avec la saison la plus pluvieuse de l'année. Les fermiers vérifient quotidiennement que la quantité d'eau est suffisante et si elle ne l'est pas, ils irriguent les champs. Les plants de riz commencent à prendre une couleur dorée durant l'automne et c'est à ce moment là que la récolte a lieu. Les champs sont drainés pour faciliter celle-ci à l'aide d'une moissonneuse batteuse. Durant l'hiver, une culture de couverture peut être plantée ou le sol est laissé à nu en attendant le printemps (Shinmei Global Site, How to grow rice).

Sur l'île de Kyushu, la variété de riz la plus cultivée est la variété Hinohikari de type *Oriza sativa japonica*. La culture de riz sur l'île de Kyushu suit le même cycle de culture qu'au Japon. Sur les parcelles du Mont Aso, lors de la récolte les tiges sont restituées au sol afin d'agir comme fertilisant.

4.1.2 Échantillonnage

Pour analyser les cultures de riz à proximité du Mont Aso, quatre parcelles différentes ont été choisies afin d'obtenir une certaine représentativité. La localisation de ces parcelles est représentée à la figure 21. L'échantillonnage a été réalisé par Takahiro Hosono, professeur à l'université de Kumamoto, et les échantillons ont été envoyés au laboratoire de Sciences du sol et Géochimie de l'UCLouvain, ELI.

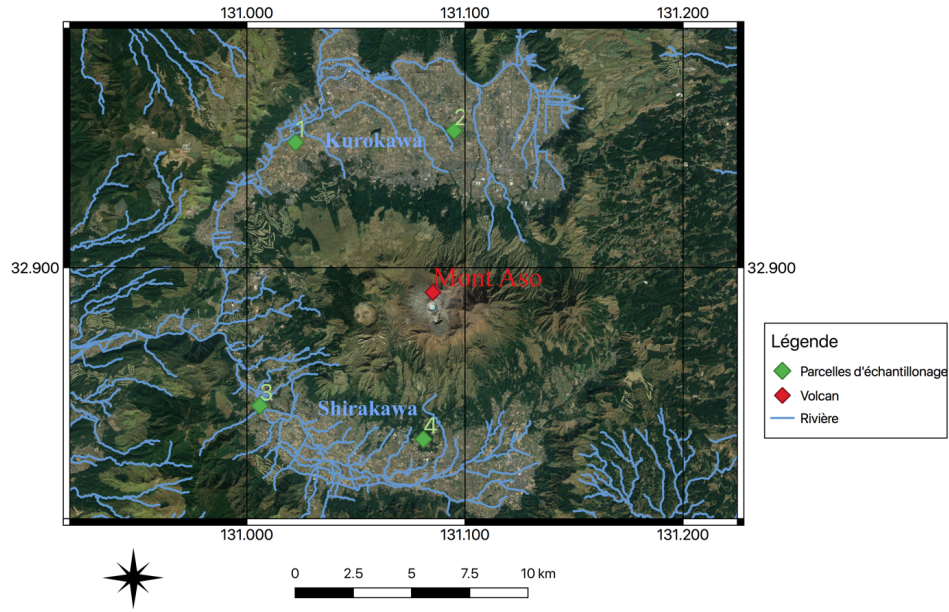


FIGURE 21 – Carte des parcelles échantillonnées pour le site du Mont Aso, Japon (Réalisée avec QGis, basemap : google satellite).

Les deux premières parcelles (N1 et N2) sont situées au nord du volcan, dans la vallée de l'Aso et sont irriguées par la rivière Kurokawa. Les deux autres se trouvent au sud (S1 et S2), dans la vallée de Nango et sont irriguées par la rivière Shirakawa. Dans chacune des 4 parcelles (illustrée à la figure 22), 5 plants de riz ont été prélevés. Ces 20 plants de riz ont ensuite été divisés en séparant les feuilles, les tiges et les grains, ce qui fait un total de 60 échantillons.

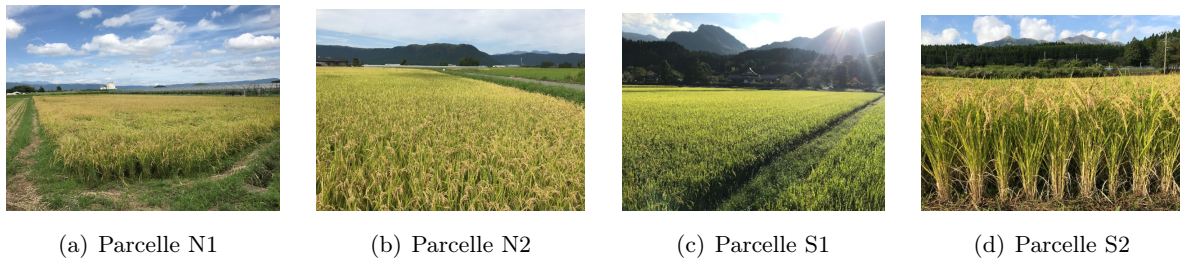


FIGURE 22 – Parcelles de riz au moment de l'échantillonnage, au Mont Aso, Japon.

Pour chaque parcelle, une estimation du nombre de plants de riz par m^2 a été réalisée (tableau 3). En multipliant le poids sec des grains des plants par le nombre de plants pour un m^2 , le rendement en g/m^2 est obtenu.

Nom parcelle	Nombre de plants/cluster	Nombre de clusters/ m^2	Nombre de plants/ m^2
N1	23	25	575
N2	22	25	550
S1	28	30	840
S2	31	20	620

Tableau 3 – Estimation du nombre de plants de riz par m^2 réalisée pendant l'échantillonnage.

Pour l'échantillonnage, 5 plants de riz ont été choisis au hasard dans 5 clusters différents par parcelle. Un cluster de riz est un regroupement de plants de riz comme visible à la figure 22d. Ensuite, le poids frais total (g) a été déterminé par plant. Les feuilles, tiges et grains ont ensuite été séparés et pesés pour obtenir le poids frais (g) par partie par plant. Le prélèvement et le relevé du poids frais des échantillons ont eu lieu le 22 septembre 2018.

Les échantillons ont ensuite été placés dans un four à 50 °C pendant une semaine. Le poids sec (g) a alors pu être déterminé pour tous les échantillons. Une fois les échantillons séchés et pesés, ils ont été placés dans des sacs perforés afin d'éviter le moisissement pendant l'envoi. Les échantillons ont été emballés individuellement et étiquetés avec le numéro de la parcelle et de l'échantillon (figure 23).



FIGURE 23 – Échantillons emballés et étiquetés de grains de riz.

4.1.3 Analyse en laboratoire

Broyage

Une fois l'inventaire des échantillons reçus effectué, un broyage a été réalisé. Étant donné la masse faible des échantillons, un broyage automatique aurait engendré trop de perte. Les plants de riz ont d'abord été pré découpés à l'aide de ciseaux. Les ciseaux utilisés sont en céramique. Ils sont lavés entre chaque échantillon avec de l'eau déminéralisée pour éviter toute contamination. Le découpage aux ciseaux permet de diminuer la taille des plants de riz à moins d'un centimètre, en vue de faciliter le broyage à l'azote liquide (figure 24). Une fois broyé, l'échantillon est placé dans un tube en plastique numéroté selon la nomenclature décidée. La nomenclature est la suivante, d'abord N ou S pour l'orientation de la parcelle, le numéro de la parcelle, un R pour riz, le numéro de l'échantillon dans cette parcelle et enfin un F (feuille), G (grain) ou T (tige) pour désigner la partie de la plante. Par exemple N1R2T désigne le deuxième échantillon de la parcelle

N1 et indique qu'il s'agit des tiges. Cette nomenclature restera identique pour le reste des manipulations.



FIGURE 24 – Échantillons pré découpés aux ciseaux

Un mortier et un pilon en céramique ont été utilisés pour broyer les échantillons à l'azote liquide. Une fois l'échantillon placé dans le mortier, on ajoute l'azote liquide. Dès que l'azote liquide est dans le mortier, il faut broyer l'échantillon avec le pilon. L'azote liquide s'évapore vite et dégage de la vapeur et du froid (figure 25). Les températures basses atteintes fragilisent les matériaux et en facilitent le broyage.



(a) Mortier et pilon utilisés pour le broyage à l'azote liquide



(b) Dégagement gazeux de l'azote liquide

FIGURE 25 – Broyage à l'azote liquide.

On peut voir à la figure 26 la taille de quelques mm obtenue après le broyage. Il peut être nécessaire d'ajouter plusieurs fois de l'azote liquide de telle sorte que l'échantillon ne fasse plus que quelques millimètres.

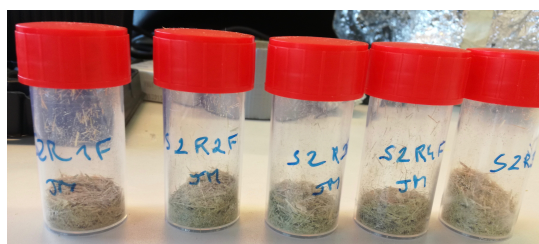


FIGURE 26 – Échantillons broyés à l'azote liquide

Préparation des échantillons en vue de la mesure à l'ICP-AES

Une fois les échantillons broyés, ils sont placés à l'étuve à 60 °C afin d'obtenir leur poids sec de référence. La tare des creusets en porcelaine est prise avant de mettre les échantillons au four. Chaque creuset contient une partie d'échantillon broyé. Il faut prélever approximativement 0,6 g de l'échantillon et surtout noter ce poids qui est le poids sec de référence à 60 °C.

Ensuite, les creusets en porcelaine contenant les différents échantillons sont placés au four. La température du four est progressivement augmentée jusqu'à 500 °C. De cette façon, il reste uniquement les cendres et la matière organique de l'échantillon est détruite. A ce stade, les échantillons sont de nouveau pesés de façon à mesurer la partie restante c'est-à-dire la partie minérale. On peut voir sur la figure 27 la diminution du volume des échantillons après leur passage au four.



(a) Échantillons dans les creusets en porcelaine avant le passage au four

(b) Échantillons restant après le passage au four

FIGURE 27 – Échantillons avant et après le passage au four à 500 °C

Des creusets en carbone sont ensuite utilisés pour réaliser une fusion dans un four à 1000 °C. Pour cela, il faut d'abord peser 1,6 g de métaborate de lithium et 0,4 g de tétraborate de lithium. La fusion au méta et tétra borate de lithium est une méthode rapide et sûre car ne demande pas d'utiliser des acides concentrés. Ensuite, le méta et tétraborate de lithium sont versés dans le creuset en porcelaine contenant l'échantillon. Le tout est mélangé dans le creuset en porcelaine avant d'être versé dans le creuset en carbone. Celui-ci a été préalablement nettoyé avec du papier Tork. Les creusets en carbone sont ensuite placés deux par deux dans le four à 1000 °C pendant 10 minutes. Lorsque l'échantillon sort du four à 1000 °C, il s'est transformé en une perle de fusion comme on peut le voir sur la figure 28.



FIGURE 28 – Échantillons en fusion.

Après cette étape, il faut dissoudre la perle de fusion obtenue avec de l'acide nitrique (HNO_3). La perle de fusion est mise dans un erlenmeyer de 100 ml avec un fond d'eau déminéralisée, placé sur une plaque chauffante à 100°C . Il faut ensuite ajouter 3 ml de HNO_3 dilué à 65% et laisser la perle de fusion se dissoudre sous agitation. Une fois la dite perle dissoute, on remplit l'erlenmeyer jusqu'au trait de jauge (100 ml) avec de l'eau déminéralisée. La solution obtenue est alors placée dans des tubes fermés et étiquetés pour être analysée.

Les échantillons sont analysés par ICP-AES (Inductively Coupled Plasma). Cette analyse va permettre de mesurer quantitativement la teneur en éléments de la solution et plus particulièrement la teneur en Si .

4.1.4 Délimitation de la zone irriguée

Pour pouvoir délimiter la zone irriguée, les bassins versants doivent être délimités. Afin de pouvoir dimensionner les bassins versants nord et sud du site du Mont Aso, le logiciel QGIS a été utilisé. Tout d'abord, pour pouvoir délimiter un bassin versant, il faut un Digital Elevation Map (DEM). Le DEM de la région concernée a été téléchargé via le site Earth Explorer (U.S. Geological Survey, EarthExplorer). Le DEM choisi est celui de ASTER GDEM. Grâce à l'outil "r.watershed", QGIS va pouvoir dériver deux rasters à partir du DEM. Le premier, appelé "flow direction" est un raster qui donne la direction de l'écoulement de l'eau à chaque pixel. Le deuxième raster, "flow accumulation" représente le nombre de pixels qui, en raison de leur emplacement, vont s'écouler dans chaque pixel. L'illustration 29 permet de mieux comprendre la différence entre ces deux rasters.

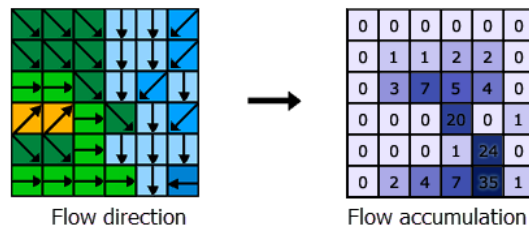


FIGURE 29 – Fonctionnement des rasters "flow direction" et "flow accumulation" (ArcGis, Fonctionnement de l'outil Accumulation de flux)

Pour que QGIS puisse délimiter le bassin versant, il faut qu'il ait un point de fermeture. C'est le point jusqu'où la zone de drainage sera délimitée. L'outil "r.water.outlet" va délimiter le bassin versant avec le raster de flow direction et les coordonnées précises du point de fermeture. Dans le cas du Mont Aso, on veut définir deux bassins versants, un pour la rivière nord et un pour la rivière sud. Il faudra donc réaliser l'opération deux fois, avec les coordonnées des points de fermeture des différentes rivières. Pour cela, il faut zoomer un maximum sur le raster "flow accumulation" et sélectionner un point juste avant la confluence des rivières.

Après cette étape, les deux bassins versants sont connus et QGIS peut facilement calculer leur surface. Ce qui est utile ici n'est pas la surface du bassin versant mais la surface de riz cultivée par bassin versant. Une couche shapefile représentant les zones cultivées est superposée au bassin versant sur QGIS. En utilisant l'outil "intersect", il reste uniquement les zones cultivées dans le bassin versant dont on va calculer les surfaces avec QGIS. Ensuite, le site de statistiques du gouvernement japonais chiffre par région les surfaces cultivées (Portal Site of Official Statistics of Japan). Pour la région de Kumamoto, la surface cultivée est estimée à 111 800 ha alors que les surfaces de champs de riz sont estimées à 68 600 ha. Cela signifie que la culture de riz en terme de surface compte pour 61,36 % des surfaces cultivées. Pour trouver la surface qu'occupent les cultures de riz, il faudra donc multiplier les surfaces cultivées trouvées via QGIS par 61,36 %.

4.1.5 Données à disposition

Les données sur les biomasses et les concentrations en Si des échantillons ont été obtenues en laboratoire. L'échantillonnage, réalisé par le professeur Hosono a eu lieu le 22 septembre 2018. Le poids frais des échantillons a été mesuré directement le 22 septembre 2018. Une fois les échantillons séchés, ils ont été pesés également au Japon, le 10 octobre 2018.

Les surfaces des bassins versants et des cultures de riz ont été déterminées via QGIS grâce à des données en libre accès.

D'autres données ont pu être utilisées car ce mémoire s'inscrit dans le projet FluxHyd (FNRS, 2016-2020). Des données de débits et de pluviométries journalières sont accessibles via le projet FluxHyd. Des données de concentration en Si dissout dans les eaux de rivières aux différents sites d'échantillonnage sont également disponibles. La carte (figure 30) représente les différents sites d'échantillonnage au niveau des rivières principales du Mont Aso où la concentration en Si est mesurée. Plusieurs campagnes d'échantillonnage ont été réalisées et seront utilisées dans le cadre de ce mémoire. La première au printemps 2015 a été effectuée entre le 13 et le 18 mai 2015. La seconde campagne, en été 2015 a eu lieu entre le 29 juin et le 15 juillet 2015. La dernière campagne dont les données sont utilisées a été réalisée les 3 et 4 juillet 2016.

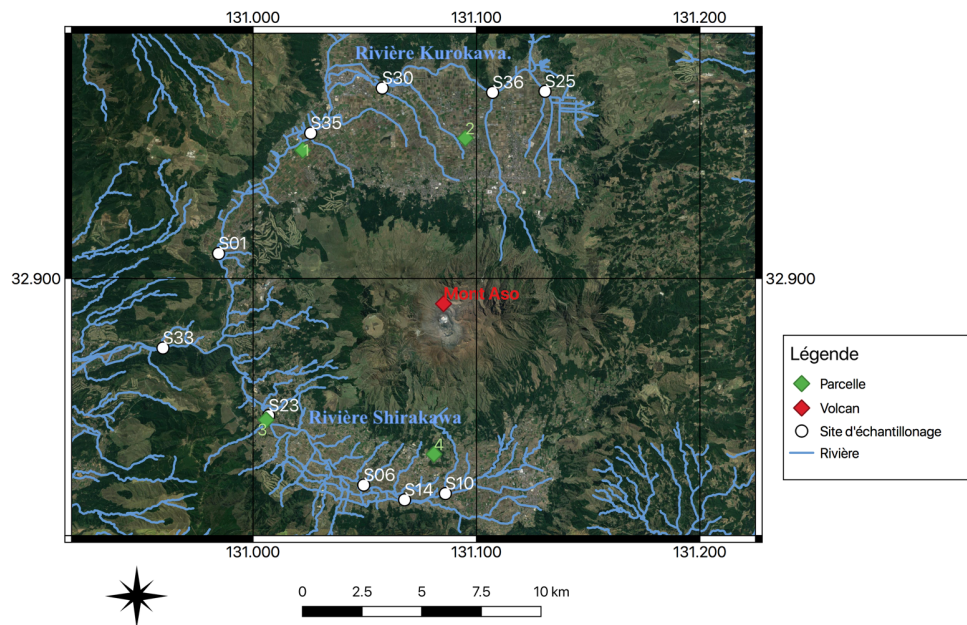


FIGURE 30 – Carte des sites d'échantillonnage des rivières au Mont Aso, Japon (Réalisée avec QGIS, basemap : google satellite)

4.2 Site d'étude de l'Ijen

4.2.1 Description du site

Le complexe volcanique de l'Ijen se situe à l'est de l'île de Java en Indonésie. Il se compose de plusieurs stratovolcans formés sur la caldeira de l'Ijen. Cette caldeira, aussi appelée caldeira de Kendeng, a un diamètre de 14 à 16 km. La figure 31 montre la caldeira et sa localisation. La caldeira est clairement délimitée au nord, par une pente abrupte. Au sud et à l'est, la frontière de la caldeira est marquée par des volcans dispersés dont le Mont Merapi qui est le volcan le plus haut et atteint 2799 m. A l'ouest du volcan Merapi se trouve le volcan Kawah Ijen, un stratovolcan actif (Ijen Volcanic Complex ; van Hinsberg et al., 2010).

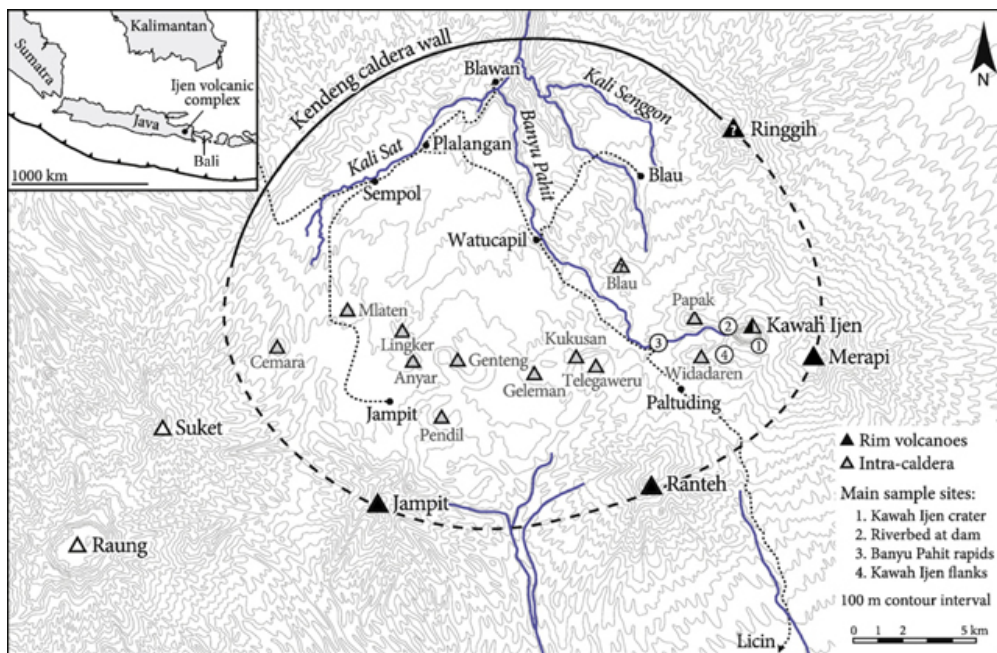


FIGURE 31 – Carte de la caldeira de l'Ijen, Indonésie (van Hinsberg et al., 2010)

Le cratère du Kawah Ijen se distingue par son lac hyper-acide. De ce lac acide découle la rivière Banyu Pahit comme on peut le voir sur la figure 31. Deux rivières, Kali Sat et Kali Sengon, se jettent dans la rivière Banyu Pahit pour former la rivière Banyuputih. Celle-ci quitte la caldeira et continue son trajet pendant 13 km jusqu'au barrage de Lewung. Le barrage de Lewung va ensuite séparer la rivière en différents canaux qui seront utilisés pour l'irrigation. La surface irriguée après le barrage est la plaine d'Asembagus. La figure 32 montre la présence de cours d'eau acides (en noir) et neutres (en gris) (Heikens et al., 2005). Les rivières acides, de source hydrothermale, viennent du lac du cratère du Kawah Ijen et ont une composition spécifique. Ces eaux ont un pH faible pouvant descendre en dessous de 4,5 et des concentrations importantes en SO_4 , Cl, F, Fe et Al (Delmelle et Bernard, 2000).

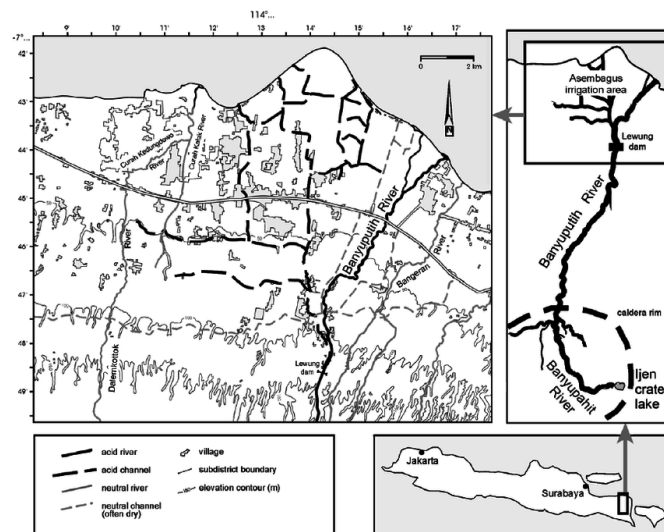


FIGURE 32 – Carte de la plaine d'Asembagus et de ses cours d'eau (Heikens et al., 2005).

4.2.1.1 Climat

L'Indonésie est un archipel étendu et composé de 17500 îles différentes. Le climat est majoritairement tropical mais varie en fonction de la localisation des îles. Le Kawah Ijen se situe sur l'île de Java où le climat est tropical. La température moyenne sur l'île de Java est assez constante durant l'année et varie de 22 à 29°C. Le climat comporte deux saisons, la saison humide, d'octobre à avril et la saison sèche, de mai à septembre.

La figure 33 montre les précipitations mensuelles à l'Ijen, à l'est de Java en 2017 et 2018. En fonction des années, on voit que la saison humide peut être un peu décalée. Par exemple, en octobre 2018 la pluviométrie est quasiment nulle et la saison des pluies en 2018 commence en réalité en novembre.

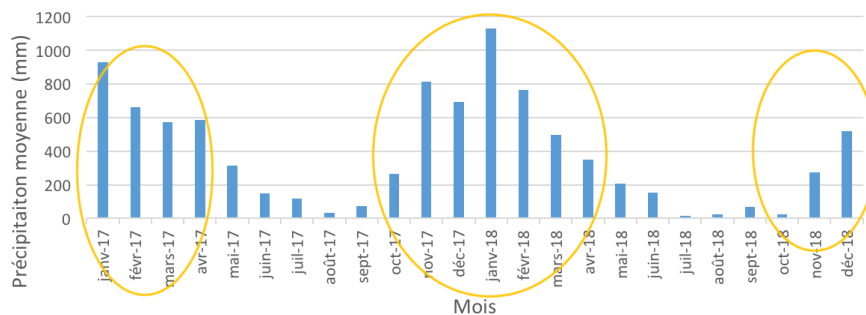


FIGURE 33 – Moyenne des précipitations mensuelles durant les années 2017 et 2018 à Ijen, Indonésie (Ijen Monthly Climate Averages). La saison humide théorique est entourée en jaune.

4.2.1.2 Culture de riz

Le riz est cultivé aussi bien en plaine qu'en plateau en Indonésie. Néanmoins, la façon la plus commune de cultiver le riz en Indonésie est en plaine. Le riz cultivé en plaine est irrigué et fertilisé. Cette technique de culture représente 90% de la surface nationale des parcelles de riz. La plus grande partie de la production de riz a lieu sur l'île de Java (USDA, Rice indonesia).

Le riz est cultivé toute l'année en Indonésie. La plupart des agriculteurs font deux cultures de riz suivies d'une culture secondaire comme le maïs et le soja. Certains agriculteurs font trois cultures de riz sur l'année et ne cultivent rien d'autre. Le calendrier de la culture de riz en Indonésie est repris à la figure 34. La culture de riz principale prend place durant la saison des pluies de octobre à mars. 60% de la production totale de riz vient de cette première culture (USDA, Rice indonesia).

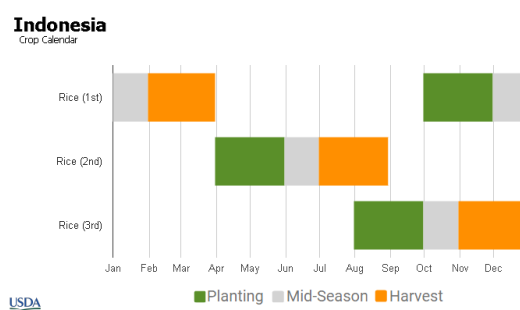


FIGURE 34 – Calendrier des différentes périodes de culture du riz en Indonésie (USDA, South East Asia - Crop Calendars).

Les variétés de riz utilisées pour la culture de plaine sont des espèces de *Oriza sativa* de sous-espèces *indica* à haut rendement (FAO, IYR 2004, All about rice : Indonesia).

4.2.2 Échantillonnage

En vue d'étudier les cultures de riz au Kawah Ijen, trois parcelles ont été échantillonnées. L'échantillonnage a eu lieu en février 2017 lors d'une mission de terrain effectuée par François Gaspard, doctorant en Earth and Life institute et Antoine de Wasseige, mémorant au laboratoire de sciences du sol et de géochimie de l'environnement durant l'année académique 2016-2017. Les parcelles échantillonnées sont visibles sur la carte d'échantillonnage à la figure 35. L'échantillonnage a eu lieu 2-3 semaines avant la période de récolte.

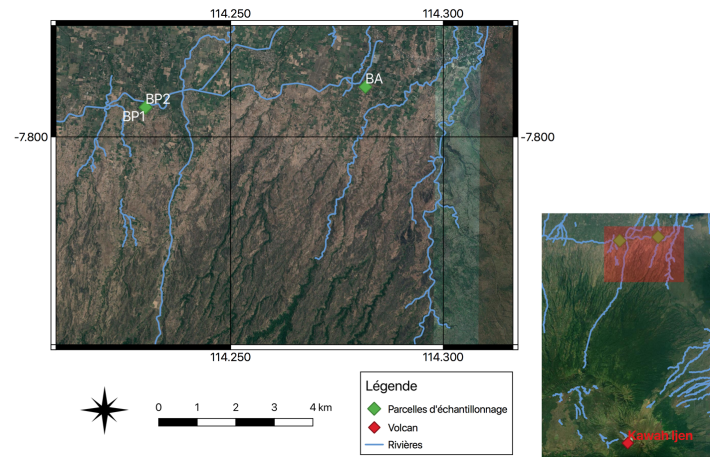


FIGURE 35 – Cartes des différentes parcelles échantillonnées pour le site du Kawah Ijen, Indonésie (Réalisée avec QGis, basemap : google satellite).

Deux des parcelles échantillonnées sont situées dans la plaine d'Asembagus et sont irriguées par la rivière Banyuputih (BP1 et BP2). La dernière parcelle échantillonnée se trouve à l'est de la plaine Asembagus et est irriguée par la rivière Bangeran (BA1). Pour chacune des trois parcelles, cinq clusters ont été prélevés aléatoirement. Ces clusters ont ensuite été pesés sur place. Un plant de riz par cluster a été gardé pour les études réalisées en laboratoire. Les 15 plants ont été séparés en feuilles, tiges et grains pour les analyses, un total de 45 échantillons sont donc étudiés pour le Kawah Ijen.

Pour chaque parcelle, le nombre de clusters par m^2 a été estimé à 36. Cela signifie que l'espacement et l'agencement des parcelles est homogène sur le site d'étude.

4.2.3 Analyse en laboratoire

Les échantillons du site du Kawah Ijen ont été analysés de la même façon que ceux provenant de l'Aso (voir section 4.1.3). La seule différence est que pour le Kawah Ijen, ce sont des échantillons composites qui ont été analysés. Les grains, tiges et feuilles des cinq plants de riz par parcelle ont été rassemblés en prenant une quantité identique de chaque partie de chaque plante pour créer des échantillons composites. Les analyses ont été réalisées par ICP-AES pour chacune des parcelles, une pour chaque partie du plant comprenant cinq échantillons de plants différents. On obtient donc directement la valeur moyenne de la concentration en Si par partie et par parcelle.

4.2.4 Délimitation de la zone irriguée

Pour le Kawah Ijen, les cultures sont situées après le barrage de Lewung. Une délimitation des bassins versants comme celle réalisée pour le site de l'Aso n'est pas possible ici. La zone irriguée est déterminée sur base de la littérature scientifique.

4.2.5 Données à disposition

Les données de biomasse et de concentration en Si des plants de riz ont été obtenues en laboratoire. L'échantillonnage a été effectué en février 2017 par François Gaspard et Antoine de Wasseige. Les analyses ont été réalisées en mars 2017. Les surfaces de la plaine d'Asembagus et des cultures irriguées ont été obtenues sur base de la littérature scientifique (Löhr et al., 2005 ; van Rotterdam-Los et al., 2008a).

Le débit des rivières irriguant les parcelles échantillonnées a été mesuré lors de la campagne d'échantillonnage en février 2017. Il est important de noter que cette mesure est une mesure ponctuelle effectuée durant la saison des pluies et n'est donc pas représentative pour toute l'année. Pour la rivière Banyuputih, d'autres données de débit au niveau du barrage de Lewung sont accessibles via l'Asembagus Irrigation office et la littérature scientifique.

La concentration en Si dans les eaux de rivière du Kawah Ijen prélevée en 2017 a été mesurée en laboratoire. Pour la rivière Bangeran, une seule mesure a été effectuée. La rivière Banyuputih a été échantillonnée en différents points (BP1 à BP10) visibles sur la figure 36. Les sites d'échantillonnage sont les mêmes que ceux analysés par Delmelle et Bernard (2000).

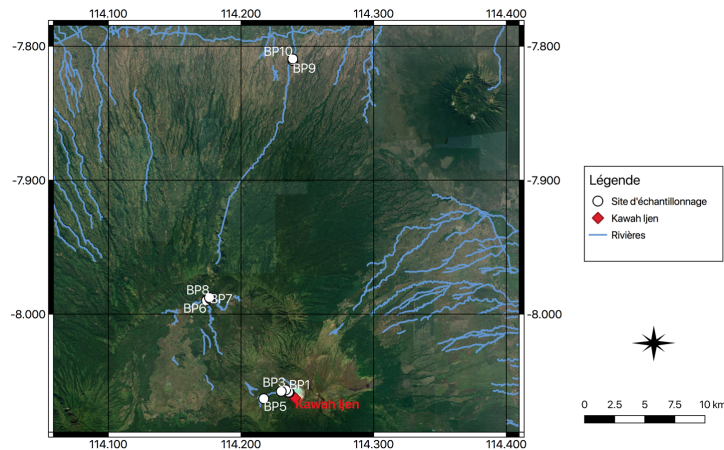


FIGURE 36 – Carte des sites d'échantillonnage de la rivière Banyuputih, Kawah Ijen (Réalisée avec QGis, basemap :google satellite).

4.3 Stratégies d'estimation des flux de Si

Cette section décrit les méthodes de calcul pour obtenir les flux de Si exportés par les plants de riz et les flux de Si des eaux de rivière.

4.3.1 Flux de Si exportés par les plants de riz

La figure 37 illustre les calculs réalisés afin d'obtenir l'export de Si (g/m^2). Ces calculs sont réalisés pour chaque parcelle séparément. Pour chaque parcelle, le poids sec moyen par plant est multiplié par le nombre de plants par m^2 dans la parcelle, cela donne alors le poids sec par m^2 . Le poids sec par m^2 doit ensuite être multiplié par la teneur en Si en $gSi/kgMS$. Cette teneur est obtenue en divisant la concentration en Si obtenue en laboratoire par le poids sec de l'échantillon concerné et en en faisant la moyenne. Le même raisonnement est suivi si on veut les résultats par parcelle et par partie du plant de riz.

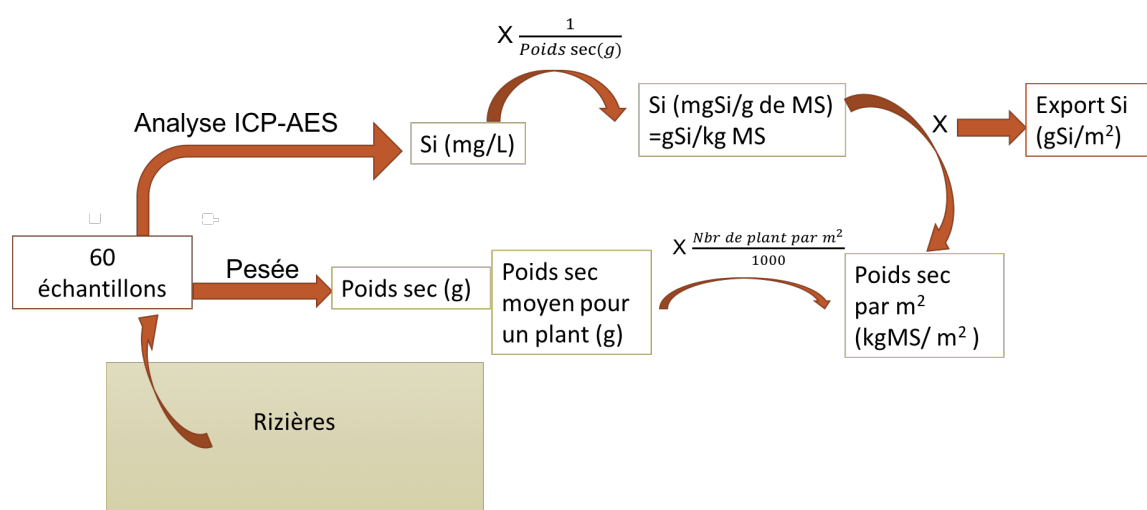


FIGURE 37 – Calculs réalisés pour obtenir l'export de Si par les cultures par m^2 .

4.3.2 Flux de Si des eaux de rivière

Le flux de Si des rivières est calculé à partir du débit et de la concentration en Si des rivières comme le montre la figure 38. Ce flux de Si nous donne une indication de la quantité de Si apportée par les rivières par an. Ce flux de Si dépend uniquement des mesures de débit et de concentration en Si des rivières.

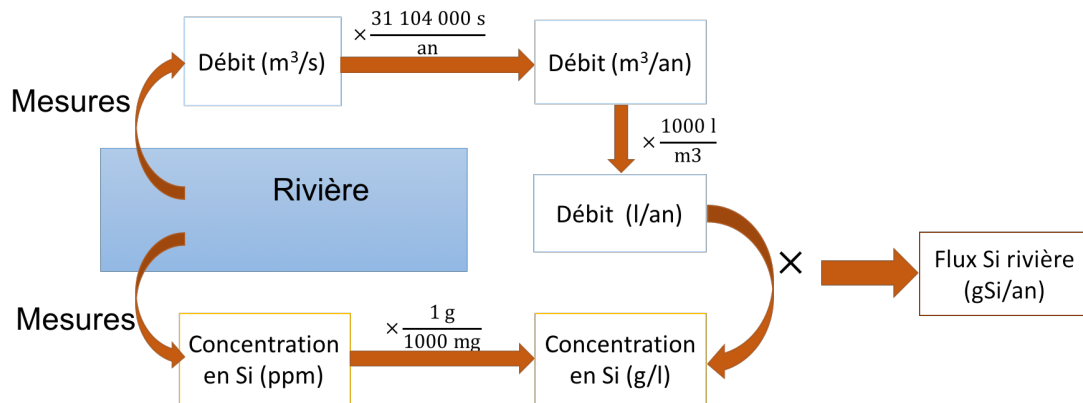
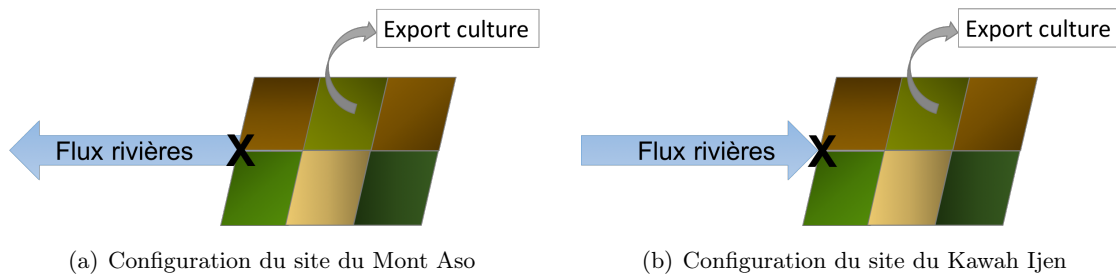


FIGURE 38 – Calculs réalisés pour obtenir le flux de Si des eaux de rivière.

Les sites du Mont Aso et du Kawah Ijen ont une disposition différente comme le montre la figure 39. A l'Aso, le flux de Si des eaux de rivière est mesuré en aval des cultures. Cela signifie que lorsque le flux est mesuré, il a déjà irrigué les cultures. Au contraire, pour le site du Kawah Ijen le flux de Si des eaux de rivière est mesuré en amont des cultures. Ce flux est donc maximal car il n'a pas encore irrigué les cultures.

FIGURE 39 – Configuration des sites pour les flux de Si des rivières du Mont Aso et du Kawah Ijen. La croix représente l'endroit où sont mesuré le débit (m^3/s) et la concentration en Si (mg/l).

5 Résultats

La section 5.1 présente les données obtenues pour le Mont Aso. D'abord, les données par rapport aux plants de riz seront explicitées, à savoir les données de biomasse, de concentration en Si, ainsi que les surfaces cultivées. Ensuite, les données concernant les rivières seront présentées, c'est-à-dire leurs débits et leurs concentrations en Si. La section 5.2 présente à son tour les données obtenues pour le site du Kawah Ijen.

5.1 Le site du Mont Aso

5.1.1 Plants de riz

5.1.1.1 Biomasse

Pour rappel, quatre parcelles ont été échantillonnées au niveau du site du Mont Aso. Deux parcelles irriguées par la rivière Kurakawa au nord, notée N1 et N2 ainsi que deux parcelles irriguées par la rivière Shirakawa au sud, notée S1 et S2. Les tableaux 15 à 18 présentés à l'annexe A.1 indiquent les résultats obtenus pour la biomasse. On y retrouve pour chaque plant et chaque partie du plant le poids sec (PS) et frais (PF) mesurés. Les pourcentages que les différentes parties représentent au niveau des poids secs et frais y sont également quantifiés.

La figure 40 affiche les poids secs des 5 échantillons par parcelle.

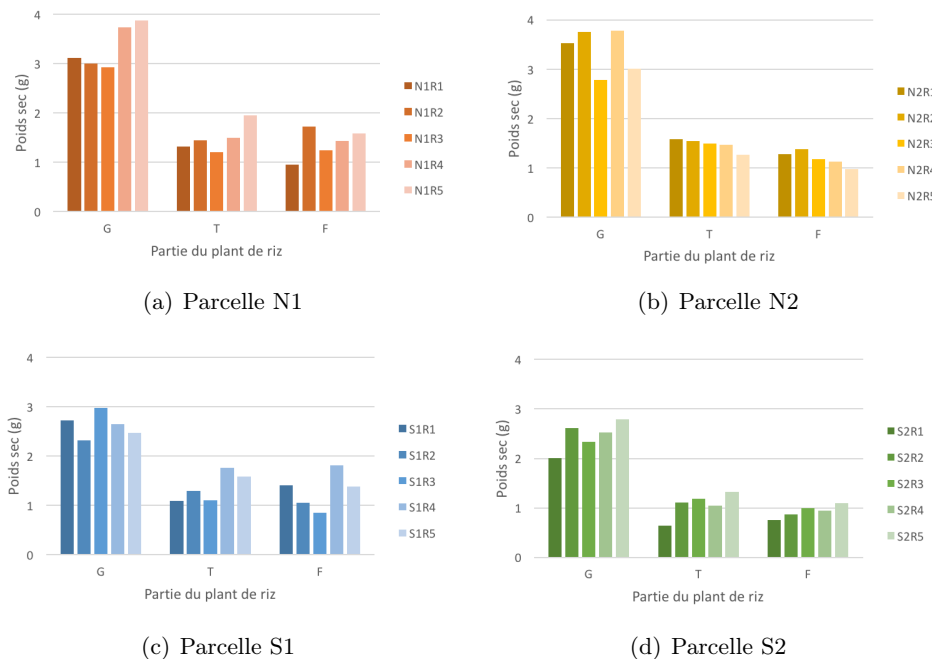


FIGURE 40 – Poids sec par partie des différents échantillons pour les quatre parcelles du Mont Aso, Japon. Chaque échantillon est représenté par une nuance de couleur différente. Chaque échantillon est un plant de riz différent avec R allant de 1 à 5 pour les 5 plants par parcelle. G = grains, T = tiges, F = feuilles.

On voit que les parcelles S1 et S2 ont un poids sec au niveau des grains aux alentours de 3 g alors que pour les parcelles N1 et N2, le poids sec des grains varie de 3 g à 4 g. Pour chaque échantillon, ce sont les grains qui ont la masse la plus élevée.

La figure 41 montre les résultats moyens pour les poids secs des quatre parcelles étudiées. On remarque que le poids sec moyen d'un plant de riz est inférieur pour les parcelles irriguées par la rivière sud. Pour chaque parcelle, la masse des grains est la plus importante puis vient celle des tiges et enfin celle des feuilles. On remarque que globalement les échantillons sont assez homogènes entre eux car l'écart-type est faible.

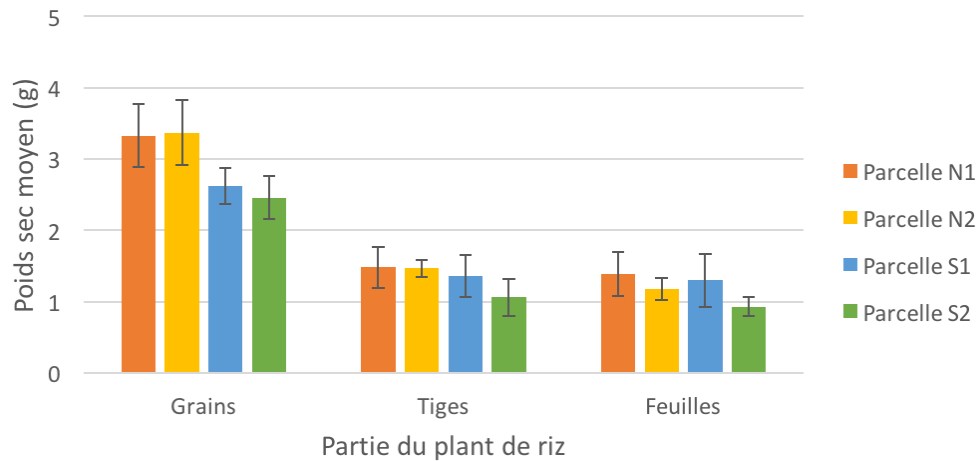


FIGURE 41 – Poids sec moyen (g) par partie des parcelles du Mont Aso, Japon. 5 échantillons ont été analysés pour chaque parcelle. La barre d'erreur représente l'écart-type.

5.1.1.2 Concentrations en Si

La figure 42 montre les concentrations en Si obtenues par ICP-AES pour les différents échantillons. Le tableau reprenant les résultats détaillés est repris dans l'annexe A.2.

On observe que les concentrations en Si sont bien plus élevées dans les feuilles que dans les autres parties du plant de riz. La teneur en Si pour les feuilles varie de 100 g à 120 g de Si par kg de MS pour les parcelles N1 et N2. Pour les parcelles sud, la teneur en Si dans les feuilles varie de 80 g à 100 g pour la parcelle S1 et de 100 g à 120 g pour la parcelle S2. On observe donc une certaine variabilité entre les parcelles. Ensuite, ce sont les tiges qui sont les plus concentrées avec une concentration variant de 40 g à 60 g en fonction des parcelles. Enfin, les grains sont les moins concentrés en Si pour tous les échantillons avec une concentration aux alentours de 20 g par kg de matière sèche (MS). La différence la moins marquée est pour la parcelle S1 où la teneur de Si dans les feuilles est moins importante. L'échelle utilisée pour tous les graphes de la figure 42 est la même. Cela permet de voir que l'ordre de grandeur pour la teneur en Si dans les différentes parcelles est similaire. La figure 42 permet également d'observer que pour chaque parcelle, les concentrations sont assez homogènes pour les cinq échantillons par partie des plants.

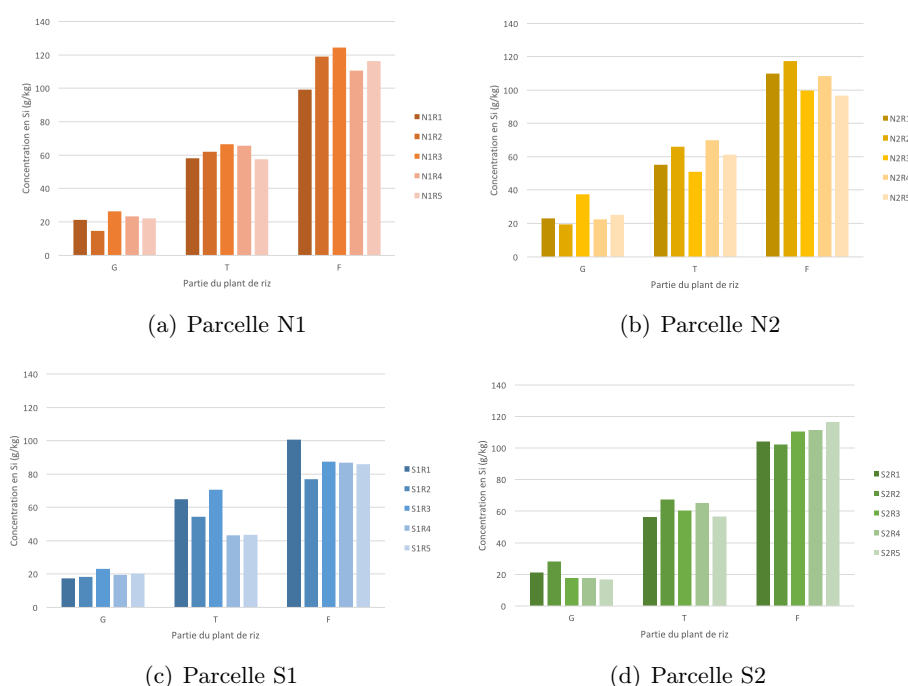


FIGURE 42 – Concentration en Si par partie des différents échantillons pour les quatre parcelles du Mont Aso, Japon. Chaque échantillon est représenté par une nuance de couleur différente. Chaque échantillon est un plant de riz différent avec R allant de 1 à 5 pour les 5 plants par parcelle. G = grains, T = tiges, F = feuilles.

La figure 43 est un graphe représentant la moyenne de la concentration en Si pour chaque parcelle et chaque partie. Ce graphe permet de voir que les tendances au niveau de la concentration en Si sont similaires pour chaque parcelle, qu'elle soit irriguée par la rivière nord ou sud. La plus grande différence de concentration est observée entre les feuilles des quatre parcelles. La concentration moyenne de Si dans les feuilles va de 90 g/kg (parcelle S1) à plus de 110 g/kg (parcelle N1). Pour les tiges, la concentration moyenne en Si est de $\simeq 60$ g/kg et pour les grains de $\simeq 20$ g/kg. La barre d'erreur est assez faible ce qui confirme qu'il y a une homogénéité au niveau des concentrations en Si pour les différents échantillons.

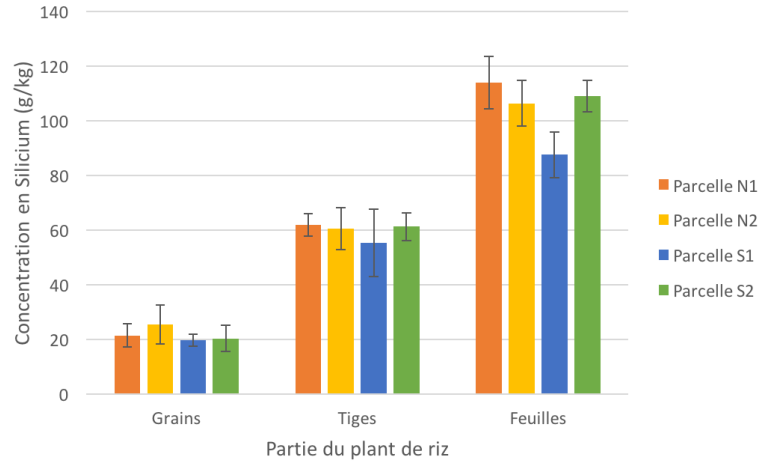


FIGURE 43 – Concentrations moyennes en Si (gSi/kgMS) en fonction des parcelles du Mont Aso, Japon, pour les différentes parties du plant. 5 échantillons ont été analysés pour chaque parcelle. La barre d'erreur représente l'écart-type.

5.1.1.3 Surfaces cultivées

La figure 44 illustre les deux bassins versants obtenus à partir du DEM via QGIS. Cette carte représente seulement l'étape finale avec les deux bassins versants délimités.

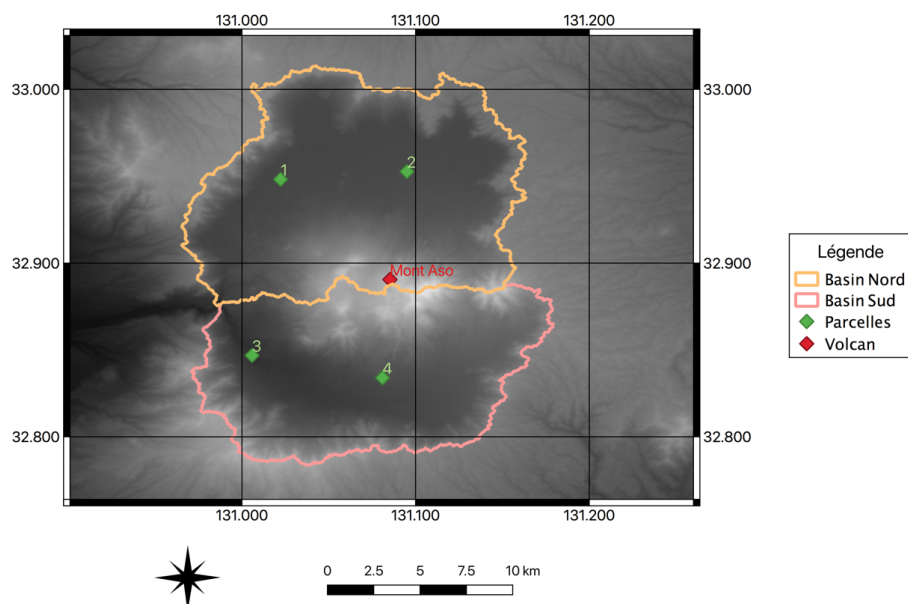


FIGURE 44 – Carte des bassins versants nord et sud du site de l'Aso (Réalisée avec QGIS, DEM : U.S. Geological Survey, Earth Explorer)

Le tableau 4 reprend les surfaces obtenues via le logiciel QGIS. La surface du bassin nord est plus importante que celle du sud comme on le visualise sur la carte (figure 44). Le tableau 4 présente également les surfaces des rizières représentant 61,36% des surfaces cultivées obtenues via QGIS. On peut voir que la surface occupée par les rizières est importante, à savoir 25% de la surface totale du bassin.

Tableau 4 – Surfaces calculées par bassin versant pour le site du Mont Aso, Japon.

Bassin versant	Surface (ha)	Surface cultivée (ha)	Pourcentage surface cultivée (%)	Surface des rizières (ha)	Pourcentage rizière (%)
Nord	20 881,45	9 575,35	46	5 875,43	28
Sud	16 799,97	6 035,66	36	3 703,48	22
Total	37 681,42	15 611,00	41	9 578,91	25

5.1.2 Rivières

Cette section reprend les données mesurées dans différents sites des rivières nord et sud de la caldeira de l'Aso. Ces données sont disponibles car ce mémoire s'inscrit dans le projet FluxHyd (FNRS, 2016-2020).

5.1.2.1 Débits

Le débit (m^3/s) est mesuré de manière journalière à la confluence des rivières nord et sud, au site S33 en 2014 et 2015. En faisant la somme des débits journaliers, on obtient le débit total par mois et par année, ce débit est présenté dans le tableau 5.

Tableau 5 – Débits totaux mensuels ($m^3/mois$) et annuels (m^3/an) de la rivière Shirakawa mesurés au site S33 du Mont Aso, Japon en 2014 et 2015.

Date	Débit site S33 ($m^3/mois$)	Date	Débit site S33 ($m^3/mois$)
Janvier 2014	40 367 808	Janvier 2015	40 669 344
Février 2014	38 724 480	Février 2015	29 337 120
Mars 2014	44 137 440	Mars 2015	51 458 112
Avril 2014	39 775 968	Avril 2015	48 609 504
Mai 2014	39 266 208	Mai 2015	40 810 176
Juin 2014	75 944 736	Juin 2015	169 898 688
Juillet 2014	110 312 064	Juillet 2015	162 300 672
Août 2014	77 108 544	Août 2015	76 133 952
Septembre 2014	51 584 256	Septembre 2015	68 752 800
Octobre 2014	48 745 152	Octobre 2015	46 596 384
Novembre 2014	36 808 992	Novembre 2015	52 098 336
Décembre 2014	35 752 320	Décembre 2015	37 194 336
Année	Débit site S33 (m^3/an)	Année	Débit site S33 (m^3/an)
2014	638 527 968	2015	823 859 424

La figure 45 permet de visualiser la variation du débit, ici en m^3/s , avec les saisons. On remarque que le débit est plus élevé lors de la saison des pluies c'est-à-dire durant les mois de juin, juillet et août. La moyenne du débit mensuel (m^3/s) en 2014 lors de la saison sèche est de $482 m^3/s$ et lors de la saison des pluies de $1016 m^3/s$ soit une augmentation d'un facteur 2,1. Pour la même saison, la pluviométrie moyenne a augmenté d'un facteur 2,6 passant de 134 mm en saison sèche à 355 mm en saison humide. Lors de l'année 2015, l'augmentation de la pluviométrie et du débit est encore plus marquée pendant la saison humide. Le débit moyen mensuel de l'année 2015 est pour la saison sèche de $534 m^3/s$ et pour la saison humide de $1575 m^3/s$, soit une augmentation d'un facteur 3. La pluviométrie moyenne de la saison sèche à la saison humide augmente, elle, d'un facteur 5, passant de $163 m^3/s$ à $852 m^3/s$. On remarque que la saison des pluies varie fortement en fonction des années. Le débit dépendra donc des conditions climatiques différentes chaque année.

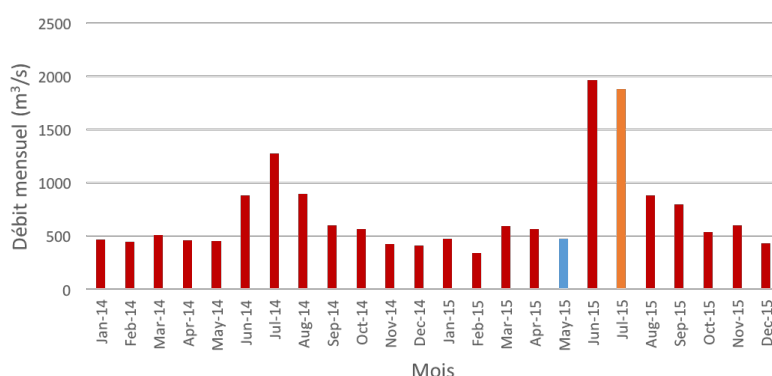


FIGURE 45 – Débit mensuel (m^3/s) au site S33. En bleu, le mois de l'échantillonnage du printemps 2015 et en orange celui de l'été 2015.

5.1.2.2 Concentrations en Si

Le graphique 46 présente la concentration en Si pour tous les sites échantillonnés au moins une fois en été et au printemps. Le tableau reprenant les valeurs des concentrations en Si aux différents sites est présenté à l'annexe A.3. Le débit présenté à la figure 45 permet de remarquer que l'échantillonnage du printemps 2015 et celui de l'été 2015 ont eu lieu lorsque le débit de la rivière était fort différent. En effet, en juillet 2015, il est 4 fois plus élevé qu'en mai 2015. On remarque que le fait que l'échantillonnage ait eu lieu en été ou au printemps n'amène pas de variation particulière au niveau de la concentration en Si, bien que le débit entre ces deux périodes soit différent. Il n'y a pas de différence de plus de 2 mg/l entre le printemps et l'été 2015. De plus, ce n'est pas toujours la même saison d'échantillonnage qui a la plus grande concentration. En effet, aux sites S36, S35, S25 et S33, c'est au printemps 2015 que la concentration en Si est la plus importante tandis que pour les autres sites échantillonnés, c'est à l'été 2015 que la concentration est plus importante.

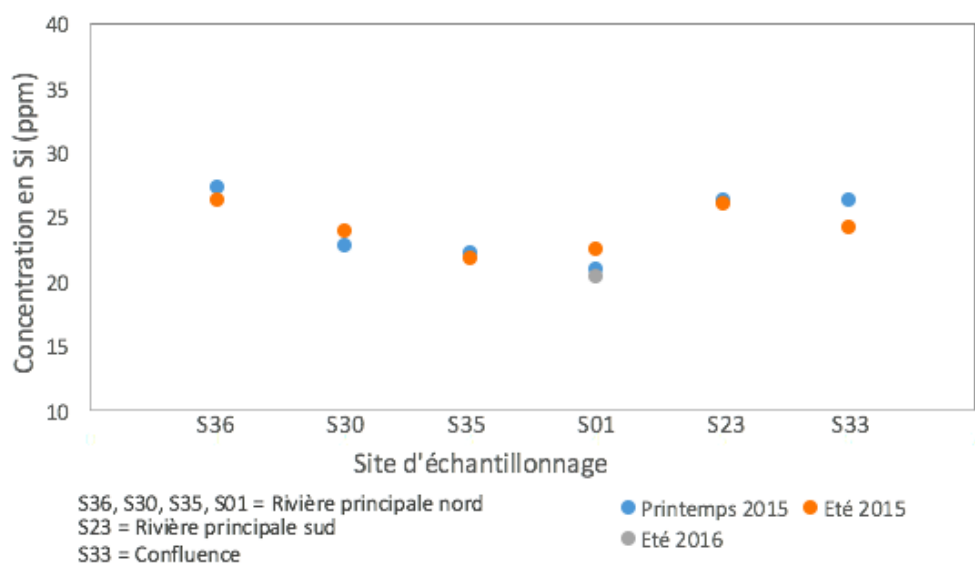


FIGURE 46 – Concentration en Si (mg/l) en différents sites d'échantillonnage et pour différentes saisons, site du Mont Aso, Japon.

5.2 Le site du Kawah Ijen

Cette section reprend les résultats des échantillons prélevés au Kawah Ijen. Les données ont été obtenues suite à une mission de terrain effectuée par François Gaspard, doctorant en Earth and Life Institute et Antoine de Wasseige, mémorant au laboratoire de sciences du sol et de géochimie de l'environnement, UCLouvain, en février 2017. D'autres données ont été récoltées dans la littérature scientifique. Ces résultats sont présentés dans cette section car ils seront utilisés lors de la discussion.

5.2.1 Plants de riz

5.2.1.1 Biomasse

Pour le site du Kawah Ijen, trois parcelles ont été échantillonnées. Deux de ces parcelles sont irriguées par la rivière acide Banyuputih (BP1 et BP2). La dernière parcelle est irriguée par la rivière neutre Bangeran (BA1).

Les tableaux 21, 22 et 23 présentent les résultats de biomasse par cluster de plants de riz pour les parcelles du Kawah Ijen et sont présentés à l'annexe A.4.

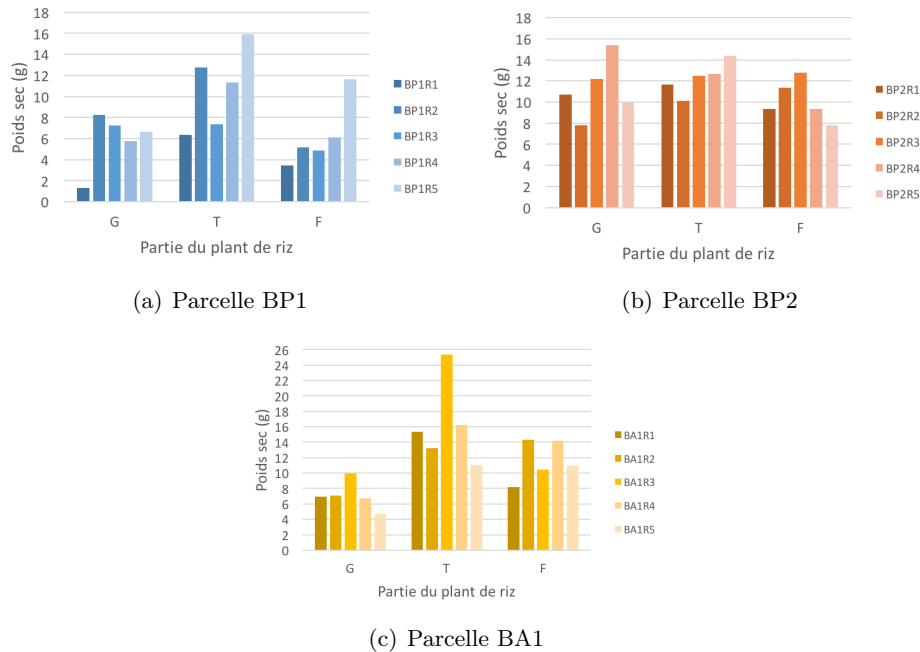


FIGURE 47 – Poids sec par partie des différents échantillons pour les trois parcelles du Kawah Ijen, Indonésie. Chaque échantillon est représenté par une nuance de couleur différente. Chaque échantillon est un cluster de riz différent avec R allant de 1 à 5 pour les 5 plants par parcelle. G = grains, T = tiges, F = feuilles.

On remarque sur la figure 47 que la masse des échantillons est assez variable au sein d'une même parcelle et entre les différentes parcelles également. La parcelle BP1 est assez hétérogène, aucune tendance ne peut en être déduite. En effet, la masse des grains de cette parcelle varie de $\simeq 1$ g à $\simeq 8$ g, celle des tiges de $\simeq 6$ g à

$\simeq 16$ g et la masse des feuilles de $\simeq 4$ g à $\simeq 12$ g en fonction des échantillons. Pour la parcelle BP2, les différentes parties du cluster de plants de riz ont approximativement la même masse, à savoir 14 g. Au niveau de la parcelle BA1, les grains ont la masse la plus faible. L'échantillon BA1R3 se distingue par un poids sec au niveau des tiges de 25 g. Les autres échantillons de la parcelle BA1 sont assez homogènes au niveau de la répartition en masse : les grains ont une masse aux alentours de 7 g, les tiges de 16 g et les feuilles de 12 g.

La figure 48 représente le poids sec moyen par parcelle pour les différentes parties du plant de riz. On remarque que le poids sec moyen pour le plant varie de 24 g à 35 g en fonction des parcelles. Au niveau de la masse des parties du plant de riz, les tiges ont la masse la plus importante. Cependant, en fonction des parcelles, ce résultat est moins clair. La barre d'erreur montre que les échantillons au sein d'une même parcelle ont des poids secs différents entre eux.

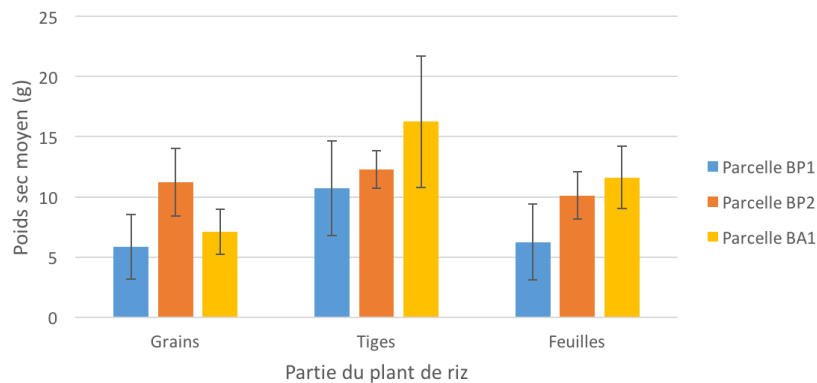


FIGURE 48 – Poids sec moyen par plant (g) et par partie (g) des trois parcelles du Kawah Ijen, Indonésie. 5 échantillons ont été analysés pour chaque parcelle. La barre d'erreur représente l'écart-type.

5.2.1.2 Concentrations en Si

Les données de concentration en Si pour chaque échantillon ne sont pas disponibles car les échantillons réalisés pour le site du Kawah Ijen sont des échantillons composites.

Le tableau 24 présente les données de concentrations en Si pour les différentes parties des parcelles du Kawah Ijen (Annexe A.5). La figure 49 permet de visualiser ces données de concentration en Si pour les différentes parcelles.

En ce qui concerne la parcelle BP1, ce sont les tiges, suivies des grains et des feuilles qui sont légèrement plus concentrées en Si. La concentration en Si est proche de 50 g/kg pour chaque partie. Pour la parcelle BP2, on remarque que ce sont les feuilles suivies des tiges qui sont les plus concentrées en Si avec une concentration de 60 g/kg. Les grains sont deux fois moins concentrés que les feuilles et les tiges dans cette parcelle. Enfin, la parcelle irriguée par la rivière Bangeran (BA) a des répartitions en teneur en Si différentes. Ce sont les grains suivis des feuilles qui sont les plus concentrés avec une concentration en Si de 60 g/kg et en dernier lieu les tiges de concentration en Si de 35 g/kg.

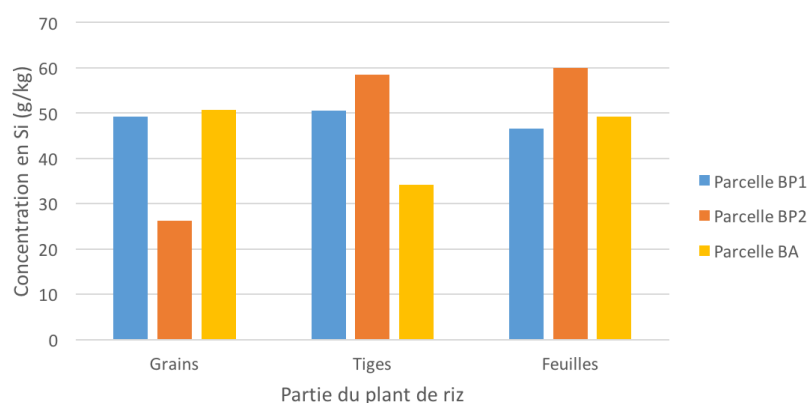


FIGURE 49 – Concentration en Si par partie pour les échantillons composites des trois parcelles du Kawah Ijen, Indonésie.

5.2.1.3 Surfaces cultivées

Pour le Kawah Ijen, trouver les bassins versants ne seraient pas utiles car les flux des rivières sont mesurés en amont des cultures. Le débit et la concentration en Si de la rivière Banyuputih sont mesurés au niveau du barrage de Lewung et de là l'eau est redistribuée pour l'irrigation. Les valeurs quant à la surface des cultures irriguées à la plaine d'Asembagus ont été obtenues dans la littérature scientifique et sont présentées dans le tableau 6. La surface irriguée n'est pas connue pour la rivière Bangeran et les flux de Si ne seront donc pas calculés pour celle-ci.

Tableau 6 – Surface totale, cultivée et de rizières à la plaine d'Asembagus (ha).

Zone étudiée	Surface (ha) (van Rotterdam-Los et al., 2008a)	Surface irriguée par Banyuputih (ha) (Löhr et al., 2005)	Pourcentage surface cultivée (%)	Surface rizières (ha)	Pourcentage rizières (%)
Plaine d'Asembagus	10000	3564	36	1000	10

5.2.2 Rivières

Seule la rivière Banyuputih sera analysée dans cette section. La rivière Bangeran ne sera pas utilisée pour calculer les flux de Si. La surface irriguée par la rivière Bangeran n'est pas connue et peu de données sont disponibles quant à son débit et sa concentration en Si.

5.2.2.1 Débits d'eau

Le tableau 7 affiche les données de débit de la rivière Banyuputih au niveau du barrage de Lewung par l'Asembagus Irrigation Office ainsi que par François Gaspard et Antoine de Wasseige lors d'une mission de terrain effectuée en février 2017. L'ensemble de ces données permet une représentativité du débit (m^3/s) en fonction des saisons.

Tableau 7 – Données ponctuelles du débit (m^3/s) au niveau du barrage de Lewung. Données de 2016 fournies par l'Asembagus Irrigation Office. Données de 2017 mesurées par François Gaspard et Antoine de Wasseige

Date	Débit moyen (m^3/s)
30 juin 2016	3,622
10 octobre 2016	4,334
20 octobre 2016	4,334
31 octobre 2016	4,308
Février 2017	7,63

La figure 50 représente ces débits avec la pluviométrie pour les mois échantillonnés. On observe que le débit semble corrélé à la pluviométrie.

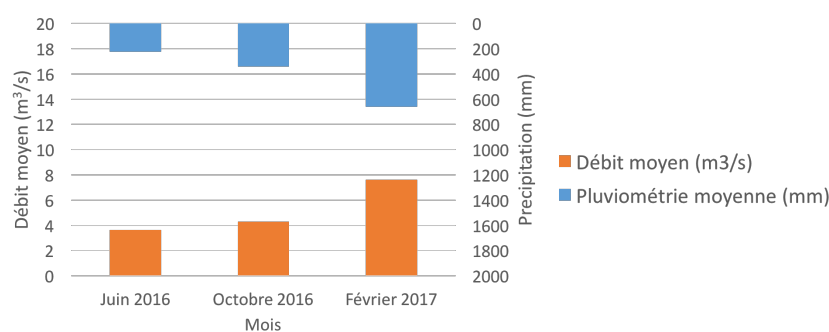


FIGURE 50 – Débit mesuré (m^3/s) au barrage de Lewung et pluviométrie moyenne (mm) lors de différentes saisons.

La figure 51 (Löhr et al., 2005) permet d'avoir une vision plus globale du débit. Le débit moyen à l'entrée du barrage de Lewung y est représenté sur une durée de 20 ans ce qui permet d'évaluer sa variabilité. On observe sur ce graphe que le débit moyen annuel avoisine les $3,5 m^3/s$.

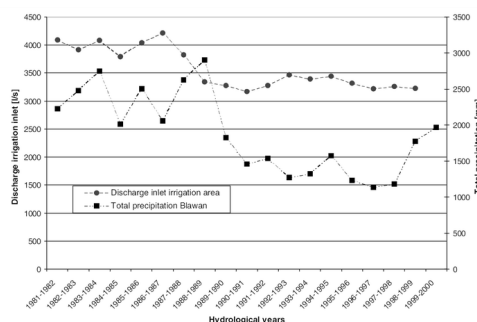


FIGURE 51 – Débit moyen (l/s) à l'entrée du barrage Lewung et pluviométrie (mm) à Blawan, de 1981 à 2000 (Löhr et al., 2005).

5.2.2.2 Concentrations en Si

Des données sur la concentration en Si dans la rivière Banyuputih sont disponibles pour différentes saisons. Lors de l'échantillonnage des parcelles de riz réalisé par François Gaspard et Antoine de Wasseige en 2017, des données sur la concentration en Si dans les rivières ont été relevées. Les sites d'échantillonnages correspondent aux sites analysés par Delmelle et Bernard (2000).

Le tableau 25 reprenant les concentrations en Si de l'article de Delmelle et Bernard (2000) en septembre 1993 et en août 1996 ainsi que les données récoltées en 2017 par François Gaspard et Antoine de Wasseige est présenté à l'annexe A.6.

La figure 52 représente ces données graphiquement. Le premier site d'échantillonnage se trouvant dans le lac lui-même et non dans les rivières, ne sera pas pris en compte ici. On remarque sur ce graphe que les rivières sont moins concentrées en Si en février 2017, c'est-à-dire lors de la saison humide. La différence entre août et septembre est moins marquée et la concentration en Si n'est pas toujours plus basse en septembre malgré que ce mois soit un peu plus humide que le mois d'août. Les variations de la concentration en Si

en fonction des saisons restent cependant assez faibles dans les rivières. Il faut garder à l'esprit que ces données n'ont pas été récoltées la même année, les différences observées ne sont pas nécessairement dues aux saisons.

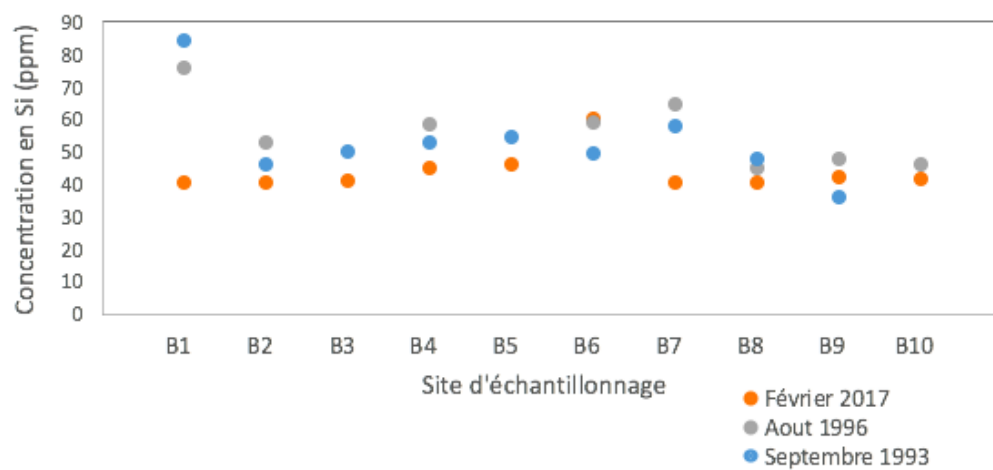


FIGURE 52 – Concentration en Si (mg/l) lors de différentes saisons aux sites d'échantillonnage de la rivière Banyuputih, Kawah Ijen, Indonésie. Les données de septembre 1993 et août 1996 proviennent de la littérature (Delmelle et Bernard, 2000) et les données de février 2017 ont été récoltées par François Gaspard et Antoine de Wasseige.

6 Discussion

6.1 Facteurs influençant les variations de biomasse des plants de riz

Dans cette section, les rendements obtenus pour les parcelles des sites du Mont Aso et du Kawah Ijen seront calculés et analysés. Le rendement des parcelles de riz pour les sites étudiés va être comparé avec d'autres données de rendement disponibles pour ces régions.

Le rendement pour les parcelles du Mont Aso a été calculé de la façon suivante :

$$\text{Rendement}(\frac{g}{m^2}) = \frac{\text{Poids sec moyen grains}}{\text{Plant de riz}}(g) \times \frac{\text{nombre de plants}}{m^2}(\frac{1}{m^2})$$

Le rendement obtenu pour les parcelles du Mont Aso dépend donc de deux facteurs : le poids sec des grains par plant et le nombre de plants par m^2 . Le rendement de la FAO est calculé en divisant le poids sec total des grains cultivés par la surface totale de culture de riz pour un pays, ici le Japon. Les données de la FAO indiquent un rendement au niveau des cultures de riz au Japon en 2017 de 6 671,2 kg/ha (FAOSTAT). Le rendement de la FAO est une moyenne pour tout le Japon et ne tient donc pas compte de la variation due à la localisation des parcelles et au climat.

La figure 53 présente le rendement par parcelle pour le site du Mont Aso ainsi que la valeur moyenne pour le Japon calculée par la FAO en 2017 (FAOSTAT). Le tableau 26 résumant le poids sec moyen pour toutes les parcelles du Mont Aso par plant et par cluster ainsi que le rendement se trouvent à l'annexe B.1. Quatre parcelles ont été échantillonnées pour étudier le site du Mont Aso, deux parcelles irriguées par la rivière nord (N1 et N2) et deux parcelles irriguées par la rivière sud (S1 et S2).

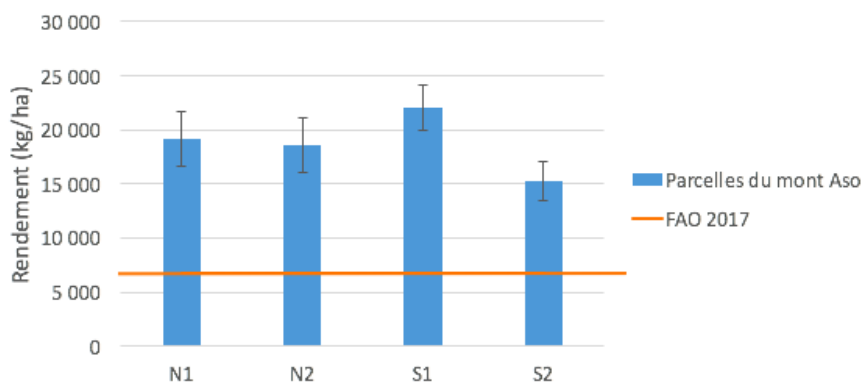


FIGURE 53 – Rendement moyen par parcelle du site du Mont Aso, Japon et rendement moyen pour le Japon en 2017 (FAOSTAT). La barre d'erreur représente l'écart-type.

La figure 53 montre que les rendements des parcelles N1, N2, S1 et S2 du Mont Aso sont respectivement 19 147, 18 546, 22 042 et 15 240 kg/ha. Le rendement est donc plus de deux fois supérieur au rendement de la FAO pour chaque parcelle. Le rendement des parcelles du Mont Aso peut s'expliquer par les deux facteurs de variabilité mis en avant par l'équation du rendement.

L'estimation du nombre de plants par m^2 a été réalisée sur place. Tout d'abord le nombre de clusters de plants de riz par m^2 a été estimé en faisant l'hypothèse qu'ils étaient à équidistance les uns des autres et plantés de manière homogène sur l'ensemble de la parcelle. Ensuite, le nombre de plants par cluster a été approximé en prenant un cluster de référence pour y compter le nombre de plants de riz. On peut observer sur la figure 54 que les clusters des plants de riz sont de tailles différentes. Sur la figure 54 le deuxième cluster (entouré en jaune) est beaucoup plus fourni que le troisième cluster (entouré en rouge). Cela signifie qu'en fonction du cluster de référence pris pour faire l'approximation du nombre de plants par cluster, les valeurs de plants par cluster seront différentes. Il a été calculé qu'il y a entre 550 et 840 plants de riz par m^2 en fonction des parcelles. Il est possible que le nombre de plants par m^2 ait été surestimé si le cluster ou le m^2 choisi comme référence pour estimer le nombre de plants n'était pas représentatif de l'ensemble de la parcelle. Comme un seul cluster a été sélectionné par parcelle pour servir de référence, un calcul de l'erreur sur l'estimation n'est pas possible.



FIGURE 54 – Variabilité de différents clusters de la parcelle S2 du Mont Aso, Japon. Le deuxième cluster de l'image est entouré en jaune et le troisième en rouge.

La biomasse des plants de riz et donc également la masse des grains peut être surestimée dû à l'effet de bordure. L'effet de bordure, c'est la différence de croissance et donc de rendement qu'il peut y avoir entre les plants situés à l'extérieur et ceux situés à l'intérieur d'une parcelle. Gomez et Datta (1971) ont étudié l'effet de bordure sur des parcelles de riz qui sont entourées par une allée de minimum un mètre et non cultivée. Ils ont reporté une augmentation du rendement allant de 63% à 159% pour les plants de riz se situant en frontière de parcelle. Les plants de riz situés en bord de parcelle se développent mieux que ceux situés plus à l'intérieur des parcelles. Cela pourrait être dû au fait qu'ils ont plus de soleil, une meilleure ventilation et moins de compétition pour les nutriments (Gomez et Datta, 1971 ; Sato et Takahashi, 1983). La surestimation du rendement dû à l'effet de bordure serait plus importante pour les parcelles plus petites et rectangulaires (Wang et al., 2013). La surestimation par effet de bordure est plausible sur le site du Mont Aso. Étant donné la densité des plants de riz (visible à la figure 55), l'échantillonnage a peut-être été effectué en bordure de parcelle. La figure 55 permet de visualiser la parcelle N1 qui est de taille assez faible. Cela veut dire que l'effet de bordure y serait plus marqué car les bords sont importants comparativement à la surface de la parcelle.



FIGURE 55 – Parcelle N1 du Mont Aso, Japon.

De plus, les parcelles échantillonnées sont situées à proximité du volcan Aso et cultivées sur des andosols. Les andosols sont des sols fertiles dû à leur capacité de rétention en eau élevée et le fait que ces sols soient riches en minéraux et en matière organique (Shoji et al., 1993 ; Shoji et Takahashi, 2002 ; Delmelle et al., 2015). L'ajout de cendres lors d'éruptions permet de lutter contre l'érosion mais aussi d'ajouter un nouveau substrat qui dynamise les processus du sol. L'ajout de cendres volcaniques amène une nouvelle source de nutriments dans le sol et améliore sa fertilité (Ugolini et Dahlgren, 2002). Tous ces facteurs peuvent expliquer le bon rendement des plants de riz sur le site du Mont Aso.

La figure 56 montre les valeurs du rendement pour les trois parcelles étudiées au Kawah Ijen. Le rendement par parcelle est calculé de la même façon que pour le Mont Aso. Le tableau 27 présentant les valeurs moyennes du poids sec par cluster ainsi que le nombre de clusters par m^2 et le rendement par parcelle se trouve à l'annexe B.1. Pour rappel, trois parcelles ont été échantillonnées sur le site du Kawah Ijen. Deux de ces parcelles sont irriguées par la rivière BanyuPutih (BP1 et BP2) tandis que la troisième est irriguée par la rivière Bangeran (BA).

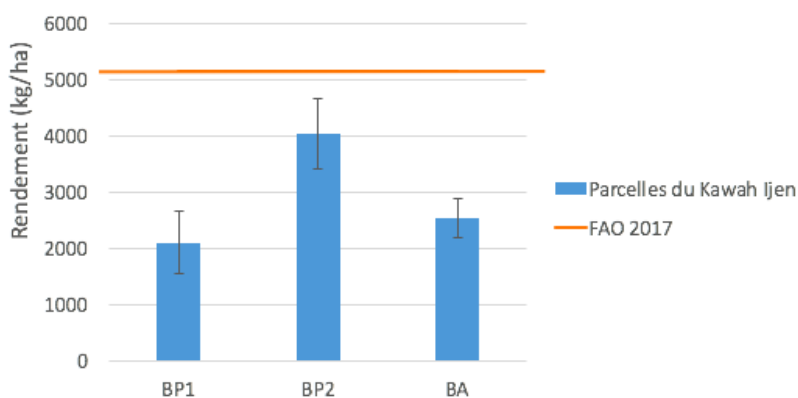


FIGURE 56 – Rendement moyen par parcelle du site du Kawah Ijen, Indonésie et rendement moyen pour l'Indonésie en 2017 (FAOSTAT). La barre d'erreur représente l'écart-type.

Sur le site de la FAO, le rendement pour les cultures de riz en Indonésie est indiqué comme étant de 5 154,7 kg/ha en 2017 (FAOSTAT). Ce rendement est mesuré en divisant le poids sec des grains cultivés

par la surface cultivée sur la totalité du territoire en Indonésie. Le rendement observé sur les parcelles échantillonnées est inférieur à celui évalué par la FAO pour l'Indonésie comme visible sur la figure 56. Le nombre de clusters par m^2 ainsi que le poids des grains par cluster sont les facteurs déterminants du rendement.

Pour le site du Kawah Ijen, ce sont les clusters qui ont été pesés et non pas les plants. Au Mont Aso, le nombre de plants par cluster a été estimé et ensuite le nombre de clusters par m^2 . Pour les Kawah Ijen, les clusters entiers sont pesés et donc le nombre de plants par cluster ne doit pas être estimé. Il y a donc une variable en moins comparativement au Mont Aso. Le nombre de clusters a été déterminé à $36/m^2$ pour toutes les parcelles du Kawah Ijen. Cela laisse supposer qu'il y a une certaine homogénéité entre les parcelles.

Au niveau du poids des grains par cluster, plusieurs facteurs peuvent expliquer leur faible valeur malgré le fait qu'ils soient situés sur des andosols. Les parcelles BP1 et BP2 sont irriguées par la rivière Banyuputih qui est une rivière acide. Cette rivière est d'origine hydrothermale, elle prend sa source dans le lac hyper-acide du cratère du Kawah Ijen. La rivière a un pH acide pouvant descendre en dessous de 4,5 et une concentration élevée en SO_4 , Cl, F, Fe et Al (Delmelle et Bernard, 2000). L'irrigation de la plaine d'Asembagus avec l'eau acide de cette rivière change la composition chimique de la couche arable du sol. La concentration en Al totale et disponible dans cette couche du sol augmente avec l'utilisation de cette rivière pour l'irrigation. La concentration en Ca et Mg a, elle, diminué dans le sol à cause de la dissolution de minéraux et de la compétition avec l'Al pour l'adsorption sur le complexe d'échange cationique (van Rotterdam-Los et al., 2008a; van Rotterdam-Los et al., 2008b). L'irrigation acidifie les sols et va provoquer une diminution du rendement, plus importante encore pour la culture de riz que pour d'autres cultures (van Rotterdam-Los et al., 2008a). Cela peut expliquer pourquoi le rendement pour les parcelles irriguées par la rivière Banyuputih est inférieur à celui de la FAO.

La parcelle irriguée par la rivière Bangeran (BA) qui est une rivière neutre a cependant elle aussi un rendement inférieur à celui de la FAO. Le rendement des parcelles de cette région irriguées par des eaux neutres est de 3000 à 4000 kg par hectare (van Rotterdam-Los et al., 2008a). Le graphique (figure 56) montre que le rendement de la parcelle BA est entre 2000 et 3000 kg/ha avec l'écart-type. Le rendement de la parcelle BA, irriguée par une rivière neutre est donc inférieur au rendement de la littérature. La parcelle BP2 a un rendement supérieur à la parcelle BA pourtant elle est irriguée par une rivière acide. Cela peut s'expliquer éventuellement par une différence au niveau de la maturité des plants de riz lors de l'échantillonnage. Le faible rendement des parcelles peut s'expliquer également par le fait que les plants n'avaient pas encore atteint leur maturité comme expliqué à la section 4.2.2.

6.2 Facteurs influençant les variations de concentrations en Si dans les plants de riz

La figure 57 illustre la moyenne de la concentration en Si des plants de riz pour les deux sites étudiés ainsi que des valeurs de concentration en Si obtenues dans la littérature.

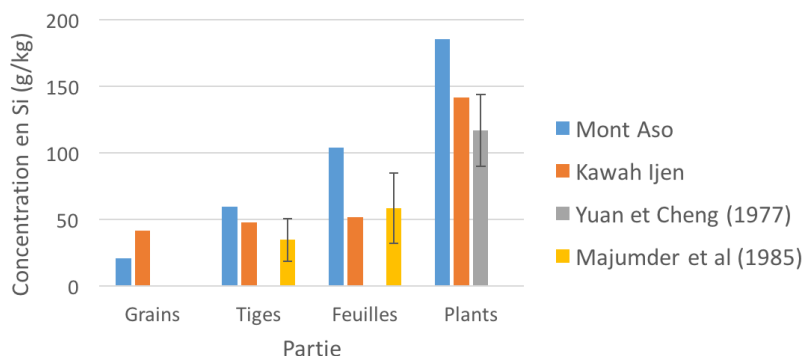


FIGURE 57 – Concentrations en Si (gSi/kgMS) par partie pour les parcelles de riz du Mont Aso, Japon et du Kawah Ijen, Indonésie et gammes de concentrations en Si obtenues dans la littérature pour des plants de riz (Yuan et Cheng, 1977 ; Majumder et al., 1985).

Les résultats résumés à la figure 57 montrent que c'est au Mont Aso que la concentration en Si est la plus importante par plant et par partie du plant sauf pour les grains. La concentration en Si obtenue pour le site de l'Aso dans les plants est de $\simeq 180$ g/kg, dans les feuilles de $\simeq 100$ g/kg et dans les tiges de $\simeq 60$ g/kg. Le Kawah Ijen a des concentrations en Si inférieures. La concentration en Si obtenue sur les parcelles d'étude du Kawah Ijen est en moyenne de 140 g/kg pour un plant de riz et de $\simeq 40$ g/kg par partie.

Yuan et Cheng (1977) ont mesuré la concentration en silicium total pour un plant. Ils ont analysé différentes sous-espèces de *oriza sativa* : le *japonica* et l'*indica*. Lors de l'étude, les plants de riz ont été irrigués avec de l'eau concentrée en Si (100 mg/l). Ils obtiennent des concentrations de Si allant de 117 g/kg à 171 g/kg. Les valeurs obtenues pour le site de l'Aso atteignant les 180 g/kg sont légèrement supérieures à cette fourchette, comme on peut le voir sur la figure 57. Majumder et al. (1985) ont analysé la concentration en Si dans les feuilles, les tiges et les racines pour différents génotypes. Au moment où les plants de riz sont prêts pour la récolte, ce sont les feuilles qui ont la plus grande concentration en Si avec une valeur de 32 g/kg à 85 g/kg. Pour les tiges, la concentration est de 19 g/kg à 51 g/kg en fonction des génotypes qu'ils ont étudiés. Les valeurs obtenues pour le Mont Aso sont plus élevées que les valeurs obtenues par Majumder et al. (1985). La répartition des concentrations en Si dans les parties du plant de riz est néanmoins semblable.

Deren et al. (1992) ont réalisé une expérience étudiant 10 génotypes de *Oriza sativa* différents. Ces variétés ont été plantées en serre dans un sol pauvre en Si et fertilisées avec du silicate de calcium à trois concentrations différentes (0, 10 et 25 Mg/ha). Le tableau 8 montre les résultats obtenus lors de cette étude. On remarque deux choses, la teneur en Si varie avec les génotypes et augmente quand la fertilisation en Si augmente. Lorsqu'il y a eu fertilisation, c'est le génotype "A 301" qui a la teneur en Si la plus importante. Ce génotype est de la variété *Oriza sativa* temperate *japonica*. Le génotype le moins concentré en Si est le "Jasmine 85", le seul génotype de la variété *indica* présent dans cette étude. Dans le même article de

Deren et al. (1992) une expérience similaire a été réalisée en champs et a donné la même tendance au niveau de la teneur en Si des différents génotypes. Deren (2001) confirme que les variétés *indica* sont moins efficaces pour l'acquisition de Si que les *japonica*. Deren (2001) affirme que même lorsque les génotypes de riz sont proches, ils ont des différences significatives en terme de concentration en Si. La variété étudiée au Mont Aso est de type temperate *japonica*, cela peut dès lors expliquer la concentration importante de Si dans les plants de riz de ces parcelles.

Tableau 8 – Teneur moyenne en Si des tissus végétaux de dix génotypes de riz cultivés en serre à trois niveaux de fertilisation (Deren et al., 1992).

Génotypes	Teneur moyenne Si (%)		
	Controle	10 Mg/ha	25 Mg/ha
Lebonnet	0,27	0,75	2,23
Lemont	0,42	1,02	2,35
88 URN 70	0,22	1,07	2,94
Gulfmont	0,31	1,37	2,64
88 URN 148	0,29	1,44	2,65
Rico 1	0,32	1,32	2,25
Katy	0,28	1,18	2,32
Jasmine 85	0,27	1,01	2,10
Delia X-2	0,31	1,24	2,6
A 301	0,40	1,46	3

De plus, en fonction de la disponibilité en Si dans l'environnement, l'absorption du Si par les plantes sera différente comme le montre le tableau 8. Liang et al. (1994) ont montré que les parcelles de riz fertilisées avec du Si contenaient une plus grande concentration de Si et que le rendement de ces parcelles de riz augmentait de 4,6% à 20,7%. Les engrais à base de Si sont une bonne solution pour augmenter le rendement et la qualité des plants de riz (Alvarez et Datnoff, 2001 ; Yan et al. 2018). Les parcelles du Mont Aso sont irriguées par des rivières riches en Si en plus d'être situées sur des andosols. Cela peut expliquer la concentration importante en Si des plants de riz du Mont Aso par rapport aux données de concentration en Si des plants de riz de la littérature.

La concentration en Si obtenue pour un plant de riz sur les parcelles d'études du Kawah Ijen est en moyenne de 140 g/kg (figure 57). Cette valeur se trouve dans la gamme de variation obtenue par Yuan et Cheng (1977) allant de 117 g/kg à 171 g/kg. L'étude de Majumder et al. (1985) a montré qu'au moment de la récolte, les feuilles ont une plus grande concentration (32-85 g/kg) que les tiges (19-51 g/kg). Cette étude établit également qu'après 60 jours de croissance, la concentration dans les feuilles est inférieure comparé au moment de la récolte et varie de 11 g/kg à 70 g/kg. Sur les parcelles étudiées au Kawah Ijen, les concentrations des différentes parties des plants semblent avoir le même ordre de grandeur, de l'ordre de 40 g/kg. Cela peut s'expliquer par le fait que les plants n'étaient pas encore arrivés complètement à maturité. En effet, l'ordre de grandeur de la concentration en Si dans les feuilles est plus proche de la

concentration à 60 jours de croissance que de la concentration au moment de la récolte (Majumder et al., 1985).

On remarque sur la figure 57 que la concentration en Si au Kawah Ijen ainsi que sa répartition par partie est différente du Mont Aso. Sur le site du Mont Aso, la concentration totale de Si dans un plant de riz atteint les 190 g/kg tandis que pour le Kawah Ijen, elle est de $\simeq 140$ g/kg. Cela peut s'expliquer par le fait que la variété étudiée au Kawah Ijen est de type *indica* tandis que celle étudiée au Mont Aso est de type *japonica* (FAO, indonesia ; FAO, Japan). La variété *indica* accumule en effet moins de Si que la variété *japonica* (Deren et al., 1992 ; Deren, 2001).

En ce qui concerne la répartition de la concentration en Si, au Kawah Ijen, les parties des plants semblent avoir la même concentration en Si tandis qu'au Mont Aso les feuilles sont les plus concentrées suivies des tiges et des grains. Le stade de maturité des plants de riz pourrait expliquer la différence de répartition de la concentration en Si par partie. A 60 jours de croissance, la concentration en Si dans les feuilles est plus faible qu'au moment de la récolte (Majumder et al., 1985). Il faudrait une connaissance plus complète des types de sol sur les deux sites et de leurs propriétés, sans cela il n'est pas possible d'affirmer à quoi est dû la plus faible concentration en Si pour les plants de riz des parcelles du Kawah Ijen.

6.3 Calcul des flux de Si exportés par les plants de riz dans les zones étudiées

Le tableau 9 présente les valeurs obtenues pour la quantité de Si exportée par hectare de culture pour les sites du Mont Aso et du Kawah Ijen. Deux scénarios sont représentés dans ce tableau, le premier considère que toutes les parties du plant sont exportées, le deuxième que les tiges sont restituées aux sols comme fertilisant naturel. On voit que restituer les tiges aux sols permet de diminuer l'export en Si par les plants. En effet, au Mont Aso restituer les tiges diminue l'export de 500 kg/ha et au Kawah Ijen de 200 kg/ha. D'autres scénarios ainsi que leur impact sur les flux de Si annuels exportés sont envisagés dans la section 6.5.

Tableau 9 – Export moyen de Si en kg par hectare cultivé à l'échelle d'une récolte pour les parcelles du Mont Aso, Japon et du Kawah Ijen, Indonésie.

Mont Aso			Kawah Ijen		
Parcelles	Export moyen Si (kg/ha)	Export moyen Si avec restitution des tiges (kg/ha)	Parcelles	Export moyen Si (kg/ha)	Export moyen Si avec restitution des tiges (kg/ha)
N1	1855	1330	BP1	404	205
N2	1647	1157	BP2	584	324
S1	2008	1397	BA	536	339
S2	1348	944			
Moyenne des parcelles	1714	1207	Moyenne des parcelles	508	290
Écart type	285	202	Écart type	93	74

Des parcelles de riz ont été étudiées par Makabe et al. (2009) sur la plaine Shonai au Japon. Cette étude obtient un résultat d'export de Si par les plants de riz de 500 kg/ha. Une autre étude réalisée en Camargue en France obtient un export de riz de 270 ± 80 kg/ha en tenant compte de la restitution des racines et d'une partie des tiges à la culture. Sans restitution, c'est 320 ± 70 kg/ha qui seraient exportés dans cette étude (Desplanques et al., 2006).

Ces valeurs d'export de la littérature sont bien inférieures aux valeurs obtenues pour les parcelles du Mont Aso. En moyenne pour le Mont Aso, l'export de Si par les plants de riz est de 1714 ± 285 kg/ha, soit 2 à 4 fois supérieur aux valeurs mesurées dans la littérature. La grande quantité de Si exporté par les cultures au Mont Aso peut s'expliquer par plusieurs facteurs.

Tout d'abord, le rendement important par ha de ces parcelles de riz (comme expliqué à la section 6.1) signifie qu'il y a une plus grande quantité de biomasse par ha. Si le nombre de plants et donc le poids par hectare est supérieur, cela va se répercuter sur l'export de Si par ha. Ensuite, l'environnement dans lequel les plants de riz sont cultivés ainsi que la variété des plant de riz influencent l'absorption du Si de ceux-ci. On a vu dans la section 6.2 que les plants de riz échantillonnés au Mont Aso ont une concentration en Si importante. Étant donné qu'à la fois le rendement et la concentration en Si dans les plants de riz sont assez importants, il n'est pas surprenant de voir que l'export de Si dépendant de ces deux facteurs est

lui aussi important. De plus, il n'y a pas d'information sur les variétés de riz étudiées dans les articles de Desplanques et al. (2006) et Makabe et al. (2009). Or, la concentration en Si des plants de riz et donc la quantité de Si exportée par ceux-ci dépendent des variétés de riz (Deren et al., 1992 ; Deren, 2001). Il est probable que la variété de riz des parcelles du Mont Aso absorbe plus de Si ce qui pourrait également expliquer l'export élevé de Si de ces parcelles.

Pour les parcelles du Kawah Ijen, on obtient une valeur moyenne d'export de Si de 508 ± 93 kg/ha rejoignant les chiffres de Makabe et al. (2009). On a cependant vu à la section 6.1 que le rendement des parcelles étudiées à l'Ijen était moindre que ce qu'on pouvait attendre. Cela peut s'expliquer par le fait que les plants ont été récoltés avant le stade final de croissance de la plante. Donc au moment de la récolte, il est probable que la quantité d'export obtenue soit plus importante.

L'export de Si par les parcelles du Mont Aso est trois fois supérieur à celui des parcelles du Kawah Ijen. Néanmoins, des nuances peuvent être apportées en tenant compte des pratiques culturales des sites étudiés. Au Mont Aso, une restitution des tiges a lieu lors de la récolte et une seule récolte par an est effectuée. Ces informations ont été transmises par le professeur à l'université de Kumamoto, Takahiro Hosono, sur base d'observations sur le terrain. Au Kawah Ijen, les pratiques culturales sont différentes : aucune partie des plants de riz n'est restituée au sol et 3 récoltes sont effectuées sur l'année. Les informations sur les pratiques culturales du Kawah Ijen ont été récoltées sur place par François Gaspard et Antoine de Wasseige lors d'une mission de terrain en février 2017. Il y a la récolte principale durant la saison des pluies, correspondant aux plants de riz analysés ici, suivie de deux récoltes moins importantes (voir section 4.2.1.2). La récolte principale apporte 60% de la production annuelle. L'export obtenu par cette récolte est divisé par 0,6 de façon à avoir l'export total annuel. Le tableau 10 tient compte des spécificités des deux sites et représente l'export de Si par hectare et par an.

Tableau 10 – Export moyen de Si en kg par hectare cultivé et par an pour les parcelles de riz du Mont Aso, Japon et du Kawah Ijen, Indonésie.

Mont Aso		Kawah Ijen	
Parcelles	Export moyen Si (kg/ha.an)	Parcelles	Export moyen Si (kg/ha.an)
N1	1330	BP1	673
N2	1157	BP2	973
S1	1397	BA	893
S2	944		
Moyenne	1207	Moyenne	846
Écart type	202	Écart type	155

On remarque sur le tableau 10 que lorsque les pratiques culturales sont prises en compte, les différences d'export entre les deux sites se réduisent. Au Mont Aso l'export de Si est de 1207 ± 220 kg/ha.an tandis qu'au Kawah Ijen il est de 846 ± 155 kg/ha.an. Les pratiques culturales ont une grande influence sur l'export de Si par les cultures. Le fait de restituer les tiges aux sols comme sur les parcelles du Mont Aso

limite l'export de Si. La restitution des parties non comestibles aux sols permettrait de fertiliser les sols et de limiter ainsi l'export de Si par les cultures (Savant et al., 1997 ; Guntzer et al., 2012). Le nombre de récoltes a une influence sur l'export de Si, cependant toutes les récoltes n'ont pas la même productivité.

Malgré le fait que sur le site du Mont Aso il n'y ait qu'une culture par an et que les tiges sont restituées au sol, l'export en Si est plus important qu'au Kawah Ijen. Cela peut s'expliquer d'une part par un rendement au Mont Aso plus important qu'au Kawah Ijen. D'autre part, la variété *Oriza sativa japonica*, cultivée au Japon, absorbe plus de Si que la variété *Oriza sativa indica*, cultivée en Indonésie (Deren, 2001). De plus, les plants de riz des parcelles du Kawah Ijen n'avaient pas encore atteint le stade de maturité lorsqu'ils ont été récoltés.

6.4 Calcul des flux de Si des eaux de rivière dans les zones étudiées

Pour quantifier les flux de Si des eaux de rivière, trois données sont utilisées ici : le débit des rivières, leur concentration en Si et la surface irriguée par la rivière. Un set de données important est disponible et des choix quant aux données utilisées ont dû être effectués afin d'avoir l'estimation de l'apport de Si par les rivières la plus précise possible. La surface irriguée est une donnée fixe donc elle ne nécessite pas de choix entre différentes données. Pour la rivière Bangeran, cette donnée n'est pas disponible et l'estimation du flux de Si ne sera donc pas effectuée.

Au Mont Aso, le débit a été mesuré tous les jours de l'année pendant deux ans au niveau du site S33 c'est-à-dire à la confluence des rivières. La concentration en Si a été mesurée au printemps 2015 (en mai), en été 2015 (juillet) et en été 2016 (juillet). Le débit mensuel de la rivière pour l'année 2014 et 2015 est visible à la figure 45 (section 5.1.2.1) où il a été mis en évidence au moment des échantillonnages. Cela indique que durant l'échantillonnage de printemps 2015 le débit était faible alors qu'il était élevé lors de l'échantillonnage de l'été 2015. La figure 20 présentée dans la section 5.1.2.2 montre que la concentration en Si entre les périodes d'échantillonnage de printemps et d'été 2015 ne varie pas de plus de 2 mg/l. Cela signifie qu'en fonction des saisons la concentration en Si reste assez constante même lorsque le débit augmente d'un facteur 4. Les concentrations en soluté semblent ne pas être sensibles au phénomène de dilution qui devrait se produire avec une augmentation du débit. Godsey et al. (2009) montrent que pour de nombreux bassins versants aux États-Unis la concentration en solutés reste stable même lorsque les débits sont variables. Ce comportement est un comportement "chimiosé". Plusieurs mécanismes peuvent expliquer que la concentration en soluté reste constante malgré une augmentation de débit. L'augmentation du débit augmente l'altération des minéraux et ainsi la concentration en éléments dissous. Gaillardet et al. (2011b) suggèrent également l'existence d'un mécanisme de tampon hydrologique qui stabiliserait la concentration en soluté. La contribution hydrothermale des rivières est suffisamment importante pour que la concentration en soluté ne se dilue pas avec les précipitations.

Pour le Mont Aso, le débit journalier a été sommé de façon à avoir un débit annuel pour l'année 2014 et 2015. Deux débits seront donc utilisés le débit total de l'année 2014 et celui de l'année 2015. En ce qui concerne la concentration en Si, les mesures effectuées sont plus restreintes. La figure 20 présentée dans la section 5.1.2.2 indique que la concentration en Si pendant les mois pluvieux ne varie pas de manière significative. La moyenne des concentrations disponibles en Si pour le site S33 a donc été utilisée. Le tableau 11 reprend en bleu les valeurs utilisées pour calculer le flux de Si des eaux de la rivière Shirakawa au site S33.

Pour le Kawah Ijen, moins de mesures de débit sont disponibles. Pour la rivière Banyuputih, la moyenne annuelle de la littérature (Löhr et al., 2005 ; figure 51, section 5.2.2.1) au barrage de Lewung semble être la valeur la plus fiable. Idéalement, il faudrait prendre deux mesures de débit différentes, une pour la saison des pluies et une pour la saison sèche. Le manque de données ne le permet cependant pas. Pour la concentration en Si de la rivière Banyuputih, il a été démontré (figure 52, section 5.2.2.2) que la concentration en Si reste assez constante de la saison sèche à la saison des pluies, comme pour le Mont Aso. En effet, le fait que la concentration en soluté reste constante dans les rivières malgré une variation des débits est observé dans

Tableau 11 – Valeurs du débit et de la concentration en Si choisies pour calculer le flux de Si des eaux de la rivière Sharakawa (site S33), Mont Aso, Japon. Les valeurs en bleu sont les valeurs utilisées pour déterminer le flux de Si des eaux de la rivière.

Mesures	Site S33
Débit 2014 (km^3/an)	0,638
Débit 2015 (km^3/an)	0,824
Débit 2014 (l/an)	$6,38.10^{11}$
Débit 2015 (l/an)	$8,24.10^{11}$
Conc Si (mg/l) Printemps 2015	26,4
Conc Si (mg/l) Été 2015	24,2
Moyenne conc Si (mg/l)	25,3

de nombreux sites (Godsey et al., 2009 ; Gaillardet et al., 2011b). La concentration en Si mesurée au même endroit que le débit sera choisie pour plus de précision. La moyenne de la concentration en Si au site BP10 (au niveau du barrage de Lewung) sera donc utilisée pour les calculs des flux de Si des eaux de rivière au Kawah Ijen. Les valeurs utilisées pour calculer le flux de Si des eaux de rivière sont résumées au tableau 12.

Tableau 12 – Valeurs du débit et de la concentration en Si choisies pour calculer le flux de Si des eaux de la rivière Banyuputih, Kawah Ijen, Indonésie. Les valeurs en bleu sont les valeurs utilisées pour déterminer le flux de Si des eaux de la rivière.

Données	Rivière Banyuputih (BP10)
Débit (l/s)	3500
Débit (l/an)	$1,1.10^{11}$
Conc Si (mg/l) Aout 1996	45,81
Conc Si (mg/l) Février 2017	41,4
Conc Si (mg/l) moyenne	43,6

La tableau 13 présente les valeurs utilisées pour le calcul des flux de Si ainsi que les flux de Si obtenus. Le débit est multiplié par la concentration en Si pour obtenir l'apport de Si en t par an. Ensuite l'apport de Si est divisé par la surface totale de la zone que la rivière irrigue et le flux de Si en kg par ha et par an est ainsi obtenu.

Les valeurs obtenues pour le flux de Si sont de $491 \text{ kg/ha.an} \pm 88 \text{ kg/ha.an}$ pour le Mont Aso en tenant compte de la moyenne sur 2014 et 2015 et de $476,65 \text{ kg/ha.an}$ pour le Kawah Ijen.

Les flux de Si, à l'échelle de bassins versants, sont assez variables. Stednick (1981) obtient un flux de Si de $55,2 \text{ kg/ha.an}$ pour un bassin versant en Alaska. L'étude d'un bassin versant dans les montagnes de Luquillo au Porto Rico obtient un flux de Si de $235,9 \text{ kg/ha.an}$ (White et al., 1998). En fonction des régions, les flux de Si peuvent donc varier fortement. Plusieurs facteurs ont été identifiés pour expliquer cette variabilité des flux de Si (Bluth et Kump, 1994 ; Braun et al., 2005 ; Sommer et al., 2006). La na-

Tableau 13 – Valeurs du débit et de la concentration en Si choisis pour calculer le flux de Si des eaux de rivière ainsi que les valeurs obtenues pour le flux de Si des eaux de rivière Shirakawa, Mont Aso Japon et Banyuputih, Kawah Ijen, Indonésie.

Rivière	Débit (km^3/an)	Conc Si (mg/l)	Apport Si (t/an)	Flux Si ($kg/ha.an$)
Shirakawa (2014)	0,64	25,3	16154,8	428,7
Shirakawa (2015)	0,82	25,3	20843,6	553,1
Banyuputih	0,11	43,6	4746,47	476,65

ture des roches du bassin versant est le premier facteur à prendre en considération. En effet, la teneur en minéraux altérables du matériau parental va influencer l'altération et le contenu en éléments dissous tel le Si. Ensuite les conditions hydrologiques vont également influencer sur les flux de Si des eaux de rivière. Plus le débit est important, plus le flux de Si sera important lui aussi. La température et les précipitations peuvent également augmenter l'altération et donc potentiellement le flux en Si des eaux de rivière. Il existe une balance entre l'altération chimique et physique, c'est-à-dire que sans altération physique, il ne peut y avoir une grande altération chimique (Bluth et Kump, 1994 ; Millot et al., 2002).

Les sites étudiés ont un flux de Si dans les eaux de rivière plus important que les valeurs rencontrées dans la littérature. La différence la plus importante est que ces sites sont situés à proximité de volcans actifs. L'altération hydrothermale peut expliquer pourquoi les flux de Si sont assez importants. En effet, les eaux de rivière d'origine hydrothermale sont chargées en acide (H_2SO_4 et HCl) et cela va favoriser l'altération chimique (Dessert et al., 2009 ; Gaillardet et al., 2011). Pour le Kawah Ijen, on remarque que la concentration en Si dans les eaux de rivière (mg/l) est plus importante que pour le Mont Aso. Cela peut s'expliquer par le fait que la rivière Banyuputih prend sa source dans le lac acide du Kawah Ijen marqué par des concentrations en éléments dissous très élevées. Même si celle-ci est diluée par d'autres rivières neutres, les concentrations en éléments dissous restent importantes (Delmelle et Bernard, 2000). De plus, les roches volcaniques, en majorité des basaltes et andésites, sont facilement altérables (Gaillardet et al. 1999 ; Dupré et al., 2003). Le climat des sites étudiés s'accorde également avec une altération élevée surtout pour le site du Kawah Ijen. La région où se situe le Kawah Ijen est une région où les températures sont hautes et où les précipitations sont élevées ce qui favorise également l'altération.

En ce qui concerne les débits, le tableau 13 permet de constater que le débit influence considérablement le flux de Si des eaux de rivière. En effet, entre l'année 2014 et 2015 la seule variation dans les données utilisées pour calculer le flux de Si vient du débit. Il passe de $0,64 km^3/an$ à $0,82 km^3/an$ entre l'année 2014 et 2015 et cela provoque une augmentation du flux de Si de $124,43 kg$ de Si par ha et par an. Cela confirme l'influence du débit sur les flux de Si dans les eaux de rivière.

6.5 Comparaison entre les flux de Si exportés par les plants de riz et les flux de Si exportés par les rivières

Afin de comparer les flux de Si exportés par les cultures de riz et les flux de Si des eaux de rivière, il faut qu'ils soient ramenés aux mêmes unités, en kg de Si par hectare du bassin étudié et par an.

L'export de Si par les plants de riz, à la section 6.3 est exprimé en kg par hectare de culture de riz et par an. Pour ramener les flux en hectare de bassin, le flux de Si exporté (kgSi/hectare de culture.an) est multiplié par la surface des cultures de riz. La quantité de Si en kg par an obtenue est divisée par la surface totale du bassin versant. La figure 39 illustre les flux de Si des sites d'étude.

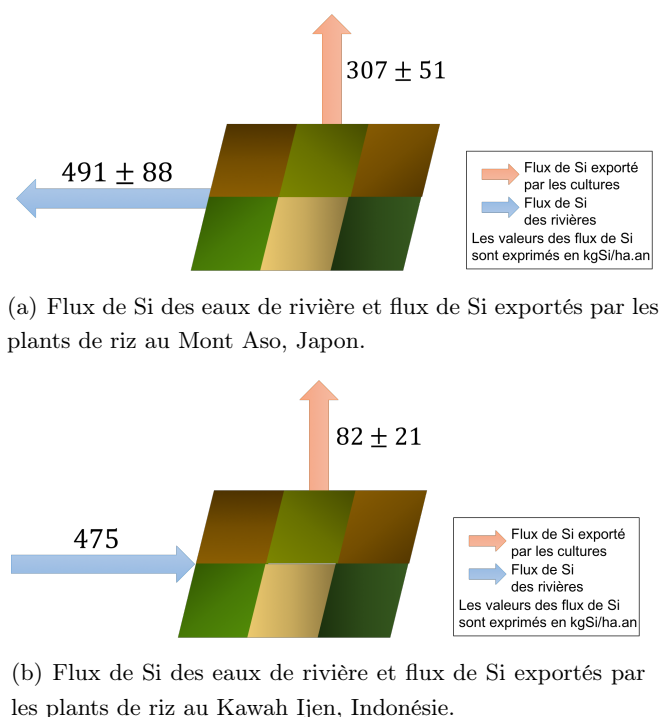


FIGURE 58 – Flux de Si des eaux de rivière et flux de Si exportés par les plants de riz pour les deux sites étudiés en kgSi/ha.an en tenant compte des pratiques culturelles spécifiques des sites d'étude.

Les flux de Si des eaux de rivière sont semblables pour les deux sites. En effet, au Mont Aso le flux de Si est de 491 ± 88 kg/ha.an et le flux de Si au Kawah Ijen de 475 kg/ha.an. Au niveau de l'export de Si par les cultures, les valeurs obtenues pour le Mont Aso sont plus de 3 fois supérieures (307 ± 51 kg/ha.an) à celles du Kawah Ijen (85 ± 15 kg/ha.an).

Lorsque l'export de Si est quantifié en kg de Si par hectare de culture de riz comme à la section 6.3, l'écart entre les deux sites est moindre. Comme présenté dans le tableau 10 (section 6.3), l'export moyen par surface de riz cultivé au Mont Aso est de 1207 kg/ha cultivé.an et celui du Kawah Ijen de 846 kg/ha cultivé.an, soit environ deux fois moins. La différence ici est que l'export est ramené à la surface totale du bassin étudié. Au Mont Aso, 25 % de la surface totale du bassin est utilisée pour la culture de riz tandis

qu'au Kawah Ijen c'est seulement 10%. Dans ce mémoire, les cultures de riz uniquement sont prises en considération or d'autres cultures accumulatrices de Si pourraient être présentes dans les sites étudiés. Par exemple, au Kawah Ijen, la canne à sucre, culture accumulatrice de Si, est encore plus cultivée que le riz. Cette culture occupe 20 % de la surface du bassin étudié.

Une autre différence à noter entre les deux sites est qu'au Mont Aso le flux de Si des rivières mesuré est situé après les cultures et représente donc le flux minimum de Si. Il est possible qu'il soit supérieur à cela en amont des cultures. Pour le Kawah Ijen, le flux de Si est mesuré avant que la rivière irrigue les cultures et est donc considéré comme maximal.

Les flux présentés à la figure 58 présentent les flux réels des deux sites d'étude, c'est-à-dire les flux obtenus en tenant compte de leurs pratiques culturales. Au Mont Aso, une restitution des tiges a lieu lors de la récolte et une seule récolte par an est effectuée tandis qu'au Kawah Ijen, il n'y a pas de restitution et 3 récoltes sont effectuées sur l'année (section 6.3). Les flux de la figure 39 prennent également en compte le pourcentage des surfaces de riz cultivées par bassin. En tenant compte de ces spécificités, le flux d'export de Si par les cultures de riz représente 62,5 % pour le Mont Aso et 17,9 % pour le Kawah Ijen par rapport au flux de Si des eaux de rivière. L'impact des flux d'export est donc significatif; d'autant plus que seules les cultures de riz sont ici prises en compte pour calculer l'export de Si.

Cette constatation rejoint différentes études. Dans l'étude de Desplanques et al. (2006) qui étudie une parcelle de riz en Camargue, en France, l'export de Si par les plants de riz est de $270 \text{ kgSi/ha.an} \pm 80 \text{ kgSi/ha.an}$ tandis que les flux de Si arrivant sur la parcelle via l'irrigation et les précipitations sont estimés à $133 \text{ kgSi/ha.an} \pm 17 \text{ kgSi/ha.an}$. L'influence de l'export de Si via les cultures y est donc encore plus importante que pour les sites étudiés ici. Desplanques et al. (2006) montrent que le flux de Si des eaux de rivière ne peut apporter que 44 % des besoins des plants de riz en Si. Cela signifie que 56 % du Si des plants de riz provient du sol. Ils font l'hypothèse que seul le Si biogénique est une source de Si pour la plante dans le sol et estiment ainsi qu'en 5 ans le stock de Si biogénique dans le sol serait épuisé. Une autre étude réalisée en France analyse l'effet de l'incorporation des parties non comestibles pour des champs de blé (Meunier et al., 2008). Les premiers résultats montrent que pour les champs où tout le blé est exporté, le sol a une concentration en Si amorphe inférieure au champs où une partie est restituée au sol (Meunier et al., 2008). L'export de Si par les plantes mène à une diminution importante du stock de Si dans le sol. Il y a une diminution des phytolithes restitués qui constituent un stock de Si à plus ou moins long terme en fonction de la solubilité de ceux-ci (Keller et al., 2012). Cela pourrait alors impacter le rendement des cultures qui ont besoin du Si pour une bonne croissance et pour résister à différents stress.

Le tableau 14 présente les résultats des flux de Si exportés par les cultures pour différents scénarios, dépendant des pratiques culturales. La valeur utilisée qui va varier en fonction des différents scénarios est la première valeur du tableau. Elle indique le flux de Si exporté par les plantes, sans restitution et en prenant en compte une seule récolte. Cette valeur tient compte du pourcentage réel des surfaces de rizières par rapport au bassin versant pour les deux sites ($\simeq 25\%$ pour le Mont Aso et 10% pour le Kawah Ijen).

Tableau 14 – Influence des pratiques culturelles sur les flux de Si exportés par les cultures de riz à l'échelle des bassins versants. Tous les flux d'export de Si sont exprimés en kgSi/ha.an. En bleu, sont représentées les valeurs réelles des flux de Si exportés par les cultures de ces sites, en tenant compte des pratiques culturelles.

Pratiques culturelles	Valeur de base	Restitutions de certaines parties		Nombre de récoltes par an		Pourcentage surface rizière par rapport au bassin versant		
		Tiges restituées	Parties non comestibles restituées	2	3	10%	25%	50%
Moyenne Mont Aso	436	307	103	622	726	171	429	857
Ecart-type	73	51	17	104	121	28	71	143
Moyenne Kawah Ijen	49	26	10	71	82	49	123	247
Ecart-type	13	8	0,3	18	21	13	32	64

Le premier scénario fait varier la restitution de certaines parties des plants de riz sur les parcelles. Lorsqu'il n'y a pas de restitution, l'export de Si est bien supérieur que lorsque certaines parties des plants de riz sont restituées. Lorsque les tiges sont restituées, l'export de Si pour le Mont Aso passe de 436 kg/ha.an à 307 kg/ha.an, soit 1,4 fois moins et celui du Kawah Ijen de 49 kg/ha.an à 26 kg/ha.an soit 1,9 fois moins. Si toutes les parties non comestibles du plant de riz sont restituées l'export de Si par les cultures sera encore inférieur. Il est alors de 103 kg/ha.an pour le Mont Aso ce qui est 4,2 fois moins que lorsqu'aucune partie n'est restituée au sol. Pour le Kawah Ijen, il est de 10 kg/ha.an ce qui représente un flux exporté 4,9 fois moins important que si toutes les parties étaient exportées. Cela démontre l'importance de la restitution des parties non comestibles afin de diminuer l'export de Si par les cultures. Cette constatation corrobore différents articles qui affirment l'importance de la restitution des parties non comestibles pour la fertilisation des cultures et également pour limiter l'export de Si par les cultures (Savant et al., 1997 ; Guntzer et al., 2012).

Le deuxième scénario prévoit la variation du nombre de récoltes par an. Lorsque plusieurs cultures de riz ont lieu sur une année, cela augmente l'export annuel de Si par les cultures mais pas de façon proportionnelle. En effet, lorsque différentes cultures de riz ont lieu lors d'une même année, le rendement est différent d'une culture à l'autre. La culture lors de la saison des pluies aura ainsi un meilleur rendement. Il a été supposé ici que lorsque deux récoltes ont lieu sur l'année, la première récolte compte pour 70% de la récolte totale annuelle. Si trois récoltes ont lieu, la première récolte est considérée comme apportant 60% de la récolte totale annuelle (Rice indonesia, USDA). C'est avec ces hypothèses que les flux de Si ont été calculés pour 2 et 3 récoltes annuelles. Lorsque deux récoltes, au lieu d'une, sont effectuées sur une année, on observe une augmentation d'un facteur $\simeq 1,4$ de l'export annuel de Si par les cultures et lorsque 3 récoltes ont lieu, l'export est multiplié par un facteur $\simeq 1,7$.

Le troisième scénario fait varier le pourcentage que représente la surface des rizières par rapport à la surface totale du bassin versant. La surface occupée par les cultures de riz au sein du bassin versant est un autre paramètre important. Si la surface occupée par les cultures de riz passe de 10% à 25%, le flux de Si exportés par ces cultures à l'échelle du bassin versant augmente d'un facteur 2,5. Si la surface passe de 10% à 50% c'est une augmentation de facteur 5 qui a lieu. Cela signifie qu'en fonction de la surface des cultures sur le bassin versant, l'export sera très différent. Or dans ce mémoire seules les cultures et donc les surfaces de riz sont prises en compte. D'autres cultures accumulatrices éventuellement cultivées sur les sites étudiés ne rentrent pas dans les calculs et pourraient augmenter les flux de Si exportés par les cultures.

Les valeurs en bleu dans le tableau 14 représentent les valeurs d'export par les sites étudiés en tenant compte de leurs pratiques culturales et de la surface allouée à la culture de riz. Les différents scénarios démontrent l'importance de prendre en compte les pratiques culturales des sites étudiés lors des calculs de l'export de Si.

6.6 Implications potentielles pour les flux de Si exportés à l'océan

Conley (2002) estime que la quantité de Si fixé par les plantes est du même ordre de grandeur que celle fixée par les organismes marins. Les phytolithes sont plus solubles que la plupart des autres minéraux silicatés rencontrés dans le sol comme la smectite et la kaolinite (Guntzer et al., 2012). Cela signifie que les phytolithes influencent certainement les flux de Si des eaux de rivière arrivant à l'océan. L'étude de Derry et al. (2005) confirme cette hypothèse. Leurs résultats montrent que la plus grande partie de Si des rivières hawaïennes provient du système sol-plante tandis qu'une plus faible proportion de Si provient de l'altération des minéraux du sol.

A court terme, l'export de Si par les plantes mènerait à une diminution du stock de Si dans le sol. A plus long terme, l'export de Si par les plantes influencerait la teneur en Si dans l'eau de mer (Meunier et al., 2008). Ce mémoire confirme la contribution importante de l'interaction sol-plante en milieu cultivé pour une plante accumulatrice de Si, sur les flux de Si des eaux de rivière. Le flux de Si des rivières vers l'océan est responsable de 80% du Si dissout amené dans l'océan. Or le Si est un nutriment essentiel pour les diatomées qui consomment du CO₂ (Tréguer et De La Rocha, 2013). De plus, les flux de Si des rivières sont utilisés pour les calculs des flux d'altération. L'altération des silicates consomme du CO₂ atmosphérique et la bonne estimation des flux d'altération est donc importante. Les flux de Si exportés par les cultures accumulatrices de Si ne sont pas pris en compte lors du calcul des flux d'altération. Les flux d'altération et la consommation de CO₂ qui en découlent sont donc sous-estimés quand les flux de Si exportés par les cultures accumulatrices ne sont pas pris en compte. L'altération en région volcanique est responsable de 30 % de la consommation globale de CO₂ par altération des silicates (Gaillardet et al. 1999 ; Dupré et al., 2003). De plus, les régions volcaniques sont fortement cultivées. Pour ces raisons, la prise en compte des flux de Si exportés par les cultures en régions volcaniques est essentielle afin d'avoir une estimation plus correcte des flux d'altération.

7 Conclusion et perspectives

Dans ce mémoire, les flux de Si exportés par les cultures de riz au sein de deux sites situés dans des arcs volcaniques ont été étudiés. L'objectif est d'estimer ces flux exportés par les cultures de riz et de les comparer aux flux de Si exportés par les eaux de rivière dans ces zones d'arcs volcaniques. Les sites étudiés sont le volcan Aso et Kawah Ijen. Les régions volcaniques ont un taux d'altération élevé dû à la nature basaltique ou andésite du matériau parental et dû à l'altération hydrothermale. De plus, les sols volcaniques sont fertiles et utilisés pour l'agriculture. Pour chaque site, des parcelles de riz, cultures accumulatrices de Si, ont été analysées. Le rendement et la teneur en Si ont été quantifiés de façon à estimer les flux de Si exportés par les cultures de riz et les comparer aux flux de Si des eaux de rivière.

La teneur en Si dans les plants de riz entre les deux sites est différente. La concentration moyenne en Si pour les plants de riz du mont Aso est de 180 g/kg et pour le Kawah Ijen de 140 g/kg. De plus, au mont Aso la concentration en Si est beaucoup plus importante dans les feuilles ($\simeq 100$ g/kg) que dans les tiges ($\simeq 60$ g/kg) et les grains ($\simeq 40$ g/kg) alors qu'au Kawah Ijen la teneur en Si est semblable pour chaque partie de la plante ($\simeq 50$ g/kg). Cela peut s'expliquer par différents facteurs comme le stade de maturité des plants ou encore la variété de riz cultivée.

En ce qui concerne l'export de Si par les plants de riz, les résultats obtenus montrent qu'il dépend de plusieurs facteurs. L'export de Si sans restitution obtenu pour le mont Aso est de 1714 kg/ha alors qu'il est de 508 kg/ha pour le Kawah Ijen, soit plus de 3 fois plus. Cette différence peut s'expliquer par le fait que le rendement au mont Aso est bien supérieur à celui du Kawah Ijen ($\simeq 20000$ kg/ha pour le mont Aso et $\simeq 3000$ kg/ha pour le Kawah Ijen). Il faut toutefois préciser que les plants de riz du Kawah Ijen n'étaient pas encore à maturité lors de la récolte et que donc le rendement pourrait augmenter.

Pour le mont Aso, le flux de Si exporté par les eaux de rivière est en moyenne de 491 kgSi/ha.an et pour le Kawah Ijen de 475 kgSi/ha.an. Les flux de Si obtenus pour ces sites sont supérieurs à ceux retrouvés dans la littérature pour des régions non volcaniques. Cela peut s'expliquer par différents facteurs comme l'altération hydrothermale, la source hydrothermale des rivières, les roches volcaniques favorables à l'altération ainsi qu'un climat favorisant l'altération.

Pour les deux sites étudiés, lorsqu'on compare les flux de Si exportés obtenus à l'échelle d'un bassin versant en kgSi/ha.an aux flux de Si des eaux de rivière, on observe qu'ils sont du même ordre de grandeur. Pour le mont Aso, la valeur moyenne du flux de Si exporté en tenant compte des pratiques culturales du site est de 307 kgSi/ha.an et le flux de Si des eaux de rivière de 491 kgSi/ha.an. Le flux d'export de Si par les cultures de riz représente donc 62,5 % par rapport au flux de Si exporté par les eaux de rivière. Pour le Kawah Ijen le flux de Si par les cultures de riz représente 17,9 % par rapport au flux de Si exporté par les eaux de rivière. Le flux de Si exporté par les cultures de riz est de 82 kgSi/ha.an et celui exporté par les eaux de rivière est de 475 kgSi/ha.an. Ces valeurs montrent que les flux de Si exportés par les cultures sont significatifs par rapport au flux de Si des eaux de rivière. Ces valeurs prennent en compte les pratiques culturales des sites étudiés.

Les pratiques culturales jouent un rôle prépondérant dans l'export de Si par les plants de riz. Si la densité des plants de riz ainsi que les conditions de culture sont optimales, cela va augmenter l'export de biomasse et donc l'export de Si. Les résultats montrent que lorsqu'une partie des plants de riz est restituée au sol, cela permet de diminuer considérablement l'export de Si par les plants de riz. Si toutes les parties non comestibles du plant de riz sont restituées au sol, cela peut réduire les flux de Si exportés par les cultures d'un facteur 4,2 pour le mont Aso et 4,9 pour le Kawah Ijen. Le nombre de récoltes par an va également influencer le flux de Si exporté par les cultures. En prenant l'hypothèse que lorsqu'il y a trois cultures celle effectuée durant la saison des pluies est plus productive que les autres (USDA), le flux de Si exporté augmente d'un facteur 1,4 pour le mont Aso et 1,7 pour le Kawah Ijen. Enfin, le pourcentage des surfaces des rizières par rapport à la surface totale du bassin étudié a également un impact sur les flux de Si exportés. Par exemple, si la surface occupée par les rizières passe de 10% à 25% l'export de Si augmente d'un facteur 2,5. Or dans ce mémoire, seules les cultures de riz sont prises en compte pour l'export de Si.

Ce mémoire montre que dans les deux régions d'arcs insulaires volcaniques étudiées, les flux de Si exportés par les cultures de riz sont significatifs par rapport aux flux de Si exportés par les eaux de rivière. Si les flux de Si exportés par les cultures de riz ne sont pas pris en compte, les flux d'altération calculés à partir des flux de Si exportés par les eaux de rivière sont sous-estimés ce qui peut induire une sous-estimation des quantités de CO₂ atmosphérique consommées lors de l'altération. Les pratiques culturales doivent également être considérées car elles peuvent avoir un impact non négligeable sur les flux de Si exportés par les cultures et donc sur leur proportion par rapport aux flux de Si exportés par eaux de rivière.

D'autres études devraient être entreprises afin de déterminer l'impact des cultures en régions volcaniques sur les flux de Si des eaux de rivière. Ce mémoire étudie seulement deux sites en particuliers, d'autres sites dans des arcs volcaniques devraient être étudiés pour confirmer que les flux de Si exportés par les cultures de riz sont significatifs. Des études prenant en compte toutes les cultures accumulatrices de Si et non uniquement un type de culture seraient précieuses afin d'estimer l'export de Si par les cultures accumulatrices. Multiplier les sites d'étude dans les régions volcaniques qui sont à la fois des régions où l'altération est importante et où l'agriculture est très présente est essentiel afin de pouvoir quantifier le flux d'export de Si par les cultures accumulatrices. Les Philippines, par exemple, pourraient être un site d'étude approprié. Elles ont un taux d'altération élevé. De plus, c'est un pays très producteur de riz mais également d'autres cultures accumulatrices de Si comme la canne à sucre et le blé. Une modélisation de toutes les zones de cultures accumulatrices de Si irriguées par des eaux de rivière dans les arcs insulaires volcaniques permettrait de quantifier l'importance de ces flux et leur impact sur les calculs des flux d'altération.

8 Bibliographie

- Alvarez, J., Datnoff, L. E. 2001. The economic potential of silicon for integrated management and sustainable rice production. *Crop Protection*, 20(1), pp.43-48.
[https://doi.org/10.1016/S0261-2194\(00\)00051-X](https://doi.org/10.1016/S0261-2194(00)00051-X)
- Bakhat, H. F., Bibi, N., Zia, Z., Abbas, S., Fahad, S., Rizwan, M., Rabbani, F. 2018. Silicon mitigates biotic stresses in crop plants : A review. *Crop Protection*, 104, pp.21–34.
<https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.10.008>
- Berner, R. A., Lasaga, A. C., Garrels, R. M. 1983. The carbonate-silicate geochemical cycle and its effect on atmospheric carbon dioxide over the past 100 million years. *American Journal of Science*, 283, pp.641–683. <https://doi.org/10.2475/ajs.283.7.641>
- Bluth, G. J. S., Kump, L. R. 1994. Lithologic and climatologic controls of river chemistry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(10), pp.2341-2359. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(94\)90015-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90015-9)
- Bogie, I., Lawless, J.V., Rychagov, S., Belousov, V. 2005. Magmatic-related hydrothermal systems : classification of the types of geothermal systems and their ore mineralization.
- Braun, J.-J., Ngoupayou, J. R. N., Viers, J., Dupre, B., Bedimo Bedimo, J.-P., Boeglin, J.-L., Muller, J.-P. 2005. Present weathering rates in a humid tropical watershed : Nsimi, South Cameroon. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(2), pp.357-387. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.06.022>
- Carey, J. C., Fulweiler, R. W. 2012. The Terrestrial Silica Pump. *PLoS One*, 7(12).
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0052932>
- Carey, J. C., Fulweiler, R. W. 2016. Human appropriation of biogenic silicon - the increasing role of agriculture. *Functional Ecology*, 30(8), pp.1331-1339. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12544>
- Cooke, J., Leishman, M. R. 2011. Is plant ecology more siliceous than we realise ? *Trends in Plant Science*, 16(2), pp.61-68. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2010.10.003>
- Cornelis, J.-T., Delvaux, B. 2016. Soil processes drive the biological silicon feedback loop. *Functional Ecology*, 30(8), pp.1298-1310. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12704>
- Cornelis, J.-T., Delvaux, B., Georg, R. B., Lucas, Y., Ranger, J., Opfergelt, S. 2011. Tracing the origin of dissolved silicon transferred from various soil-plant systems towards rivers : a review. *Biogeosciences*, 8(1), pp.89-112. <https://doi.org/10.5194/bg-8-89-2011>

- Delmelle, P., Bernard, A. 2000. Downstream composition changes of acidic volcanic waters discharged into the Banyupahit stream, Ijen caldera, Indonesia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 97(1), pp.55-75. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(99\)00159-6](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(99)00159-6)
- Delmelle, P., Opfergelt, S., Cornelis, J.-T., Ping, C.-L. 2015. Chapter 72 - Volcanic Soils. In H. Sigurdsson (Éd.), *The Encyclopedia of Volcanoes (Second Edition)*, pp.1253-1264. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00072-9>
- Deren, C. W. 2001. Chapter 8 Plant genotype, silicon concentration, and silicon-related responses. In L. E. Datnoff, G. H. Snyder, G. H. Korndörfer (Éd.), *Studies in Plant Science*. pp. 149-158. [https://doi.org/10.1016/S0928-3420\(01\)80012-4](https://doi.org/10.1016/S0928-3420(01)80012-4)
- Deren, C. W., Datnoff, L. E., Snyder, G. H. 1992. Variable silicon content of rice cultivars grown on everglades histosols. *Journal of Plant Nutrition*, 15(11), pp.2363-2368. <https://doi.org/10.1080/01904169209364480>
- Derry, L. A., Kurtz, A. C., Ziegler, K., Chadwick, O. A. 2005. Biological control of terrestrial silica cycling and export fluxes to watersheds. *Nature*, 433(7027), pp.728. <https://doi.org/10.1038/nature03299>
- Desplanques, V., Cary, L., Mouret, J.-C., Trolard, F., Bourrié, G., Grauby, O., Meunier, J.-D. 2006. Silicon transfers in a rice field in Camargue (France). *Journal of Geochemical Exploration*, 88(1-3), pp.190-193. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2005.08.036>
- Dessert, C., Dupré, B., Gaillardet, J., François, L. M., Allègre, C. J. 2003. Basalt weathering laws and the impact of basalt weathering on the global carbon cycle. *Chemical Geology*, 202(3-4), pp.257-273. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2002.10.001>
- Dessert, C., Gaillardet, J., Dupre, B., Schott, J., Pokrovsky, O. S. 2009 Fluxes of high- versus low-temperature water-rock interactions in aerial volcanic areas : Example from the Kamchatka Peninsula, Russia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(1), pp.148-169. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.09.012>
- Detienne M. 2016. Volcanic Flank and Sector Collapses ; Unravelling the Role of Hydrothermal Alteration Using Combined Mineralogical, Experimental, and Numerical Modelling Studies. PhD thesis, Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, 401 p.
- Dupré, B., Dessert, C., Oliva, P., Goddérès, Y., Viers, J., François, L., Gaillardet, J. 2003. Rivers, chemical weathering and Earth's climate. *Comptes Rendus Geoscience*, 335(16), pp.1141-1160. <https://doi.org/10.1016/j.cрте.2003.09.015>
- Epstein, E. 1994. The anomaly of silicon in plant biology. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 91(1), pp.11-17. <https://doi.org/10.1073/pnas.91.1.11>

- Epstein, E. 2009. Silicon : its manifold roles in plants. *Annals of Applied Biology*, 155, pp.155–160. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2009.00343.x>
- Finizola, A. 2002. Etude de systèmes hydrothermaux de volcans actifs : Misti (Pérou) et Stromboli (Italie) ; Approches géophysiques et géochimiques. PhD thesis. 206p.
- Frings, P. J., Clymans, W., Fontorbe, G., De La Rocha, C. L., Conley, D. J. 2016. The continental Si cycle and its impact on the ocean Si isotope budget. *Chemical Geology*, 425, pp.12-36. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.01.020>
- Gaillardet, J., Dupré, B., Louvat, P., Allègre, C. J. 1999. Global silicate weathering and CO₂ consumption rates deduced from the chemistry of large rivers. *Chemical Geology*, 159(1-4), pp.3-30. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(99\)00031-5](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(99)00031-5)
- Gaillardet, J., Louvat, P., Lajeunesse, E. 2011a. Rivers from Volcanic Island Arcs : The subduction weathering factory. *Applied Geochemistry*, 26, pp.350-353. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.03.057>
- Gaillardet, J., Rad, S., Rivé, K., Louvat, P., Gorge, C., Allègre, C. J., Lajeunesse, E. 2011b. Orography-driven chemical denudation in the Lesser Antilles : Evidence for a new feed-back mechanism stabilizing atmospheric CO₂. *American Journal of Science*, 311(10), pp.851-894. <https://doi.org/10.2475/10.2011.02>
- Godsey, S. E., Kirchner, J. W., Clow, D. W. 2009. Concentration–discharge relationships reflect chemostatic characteristics of US catchments. *Hydrol. Process.*, 23, pp.1844-1864. <https://doi.org/10.1002/hyp.7315>
- Goldsmith, S. T., Carey, A. E., Johnson, B. M., Welch, S. A., Lyons, W. B., McDowell, W. H., Pigott, J. S. 2010. Stream geochemistry, chemical weathering and CO₂ consumption potential of andesitic terrains, Dominica, Lesser Antilles. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(1), pp.85-103. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.10.009>
- Gomez, K. A., Datta, S. K. D. 1971. Border Effects in Rice Experimental Plots I. Unplanted Borders. *Experimental Agriculture*, 7(1), pp.87-92. <https://doi.org/10.1017/S0014479700004816>
- Grotzinger, J., Jordan, T. H. 2014. *Understanding Earth* (7th Edition). W.H.Freeman et Co Ltd, Macmillan Learning.
- Guntzer, F., Keller, C., Meunier, J.-D. 2012. Benefits of plant silicon for crops : a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32(1), pp.201–213. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0039-8>
- Hase, H., Hashimoto, T., Sakanaka, S., Kanda, W., Tanaka, Y. 2005. Hydrothermal system beneath Aso volcano as inferred from self-potential mapping and resistivity structure. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 143(4), pp.259-277. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2004.12.005>

- Heikens, A., Widianarko, B., C Dewi, I., L M De Boer, J., Seinen, W., Van Leeuwen, K. V. L. 2005. The Impact of the Hyperacid Ijen Crater Lake. Part I : Concentrations of Elements in Crops and Soil. *Environmental geochemistry and health*, 27, pp.409-418. <https://doi.org/10.1007/s10653-005-0827-7>
- Huang, P. M., Berthelin, J., Bollag, J.-M., McGill, W. B. 1995. *Environmental Impacts of Soil Component Interactions : Land Quality, Natural and Anthropogenic Organics*. CRC Press.
- Huang, Z.-T., Jiang, P.-K., Chang, S. X., Zhang, Y., Ying, Y.-Q. 2014. Production of Carbon Occluded in Phytolith Is Season-Dependent in a Bamboo Forest in Subtropical China. *PLOS ONE*, 9(9), e106843. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0106843>
- Jones, M. T., Hembury, D. J., Palmer, M. R., Tonge, B., Darling, W. G., Loughlin, S. C. 2011. The weathering and element fluxes from active volcanoes to the oceans : a Montserrat case study. *Bulletin of Volcanology*, 73(3), pp.207-222. <https://doi.org/10.1007/s00445-010-0397-0>
- Keller, C., Guntzer, F., Barboni, D., Labreuche, J., Meunier, J.-D. 2012. Impact of agriculture on the Si biogeochemical cycle : Input from phytolith studies. *Comptes Rendus Geoscience*, 344(11-12), pp.739-746. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2012.10.004>
- Liang, Y. C., Ma, T. S., Li, F. J., Feng, Y. J. (1994). Silicon availability and response of rice and wheat to silicon in calcareous soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 25(13-14), pp.2285-2297. <https://doi.org/10.1080/00103629409369189>
- Löhr, A., Bogaard, T., Heikens, A., R Hendriks, M., Sumarti, S., J Van Bergen, M., Widianarko, B. (2005). Natural Pollution Caused by the Extremely Acid Crater Lake Kawah Ijen, East Java, Indonesia (7 pp). *Environmental science and pollution research international*, 12, pp.89-95. <https://doi.org/10.1065/espr2004.09.118>
- Ma, J. F., Goto, S., Tamai, K., Ichii, M. 2001. Role of Root Hairs and Lateral Roots in Silicon Uptake by Rice. *Plant Physiology*, 127(4), pp.1773-1780. <https://doi.org/10.1104/pp.010271>
- Majumder, N. D., Rakshit, S. C., Borthakur, D. N. 1985. Genetics of silica uptake in selected genotypes of rice (*O. sativa* L.). *Plant and Soil*, 88(3), pp.449-453. <https://doi.org/10.1007/BF02197502>
- Makabe, S., Kakuda, K., Sasaki, Y., Ando, T., Fujii, H., Ando, H. 2009. Relationship between mineral composition or soil texture and available silicon in alluvial paddy soils on the Shounai Plain, Japan. *Soil Science & Plant Nutrition*, 55, pp.300-308. <https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2008.00352.x>

- Makabe-Sasaki, S., Kakuda, K.-I., Sasaki, Y., Ando, H. 2014. Effects of slag silicate fertilizer on silicon content of rice plants grown in paddy fields on the Shounai Plain, Yamagata, Japan. *Soil Science and Plant Nutrition*, 60(5), pp.708-721. <https://doi.org/10.1080/00380768.2014.936305>
- Meunier, J. D., Guntzer, F., Kirman, S., Keller, C. 2008. Terrestrial plant-Si and environmental changes. *Mineralogical Magazine*, 72(1), pp.263-267. <https://doi.org/10.1180/minmag.2008.072.1.263>
- Millot, R., Gaillardet, J., Dupré, B., Allègre, C. J. 2002. The global control of silicate weathering rates and the coupling with physical erosion : new insights from rivers of the Canadian Shield. *Earth and Planetary Science Letters*, 196(1), pp.83-98. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00599-4](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00599-4)
- Mitani, N., Ma, J.F. 2005. Uptake System of Silicon in Different Plant Species. *Journal of Experimental Botany*, 56(414), pp.1255-1261. <https://doi.org/10.1093/jxb/eri121>
- Parr, J. F., Sullivan, L. 2005. Soil carbon sequestration in phytoliths. *Soil Biology and Biochemistry*, 37(1), pp.117-124. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.06.013>
- Pringle, C. M., Triska, F. J. 2000. 7 - Emergent Biological Patterns and Surface-Subsurface Interactions at Landscape Scales. In J. B. Jones & P. J. Mulholland (Éd.), *Streams and Ground Waters* (pp.167-193). <https://doi.org/10.1016/B978-012389845-6/50008-9>
- Ramankutty, N., Evan, A., Monfreda, C., Foley, J. A. 2008. Farming the planet : 1. Geographic distribution of global agricultural lands in the year 2000. *Global Biogeochemical Cycles*, 22. <https://doi.org/10.1029/2007GB002952>
- Rodríguez, A., van Bergen, M. J. 2015. Volcanic hydrothermal systems as potential analogues of Martian sulphate-rich terrains. *Netherlands Journal of Geosciences*, 1, pp.1-17. <https://doi.org/10.1017/njg.2015.12>
- Roeder, Di. 2012. 6 - Convergent margins and orogenic belts. In D. G. Roberts & A. W. Bally (Éd.), *Regional Geology and Tectonics : Principles of Geologic Analysis*, pp.112-177. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53042-4.00006-6>
- Rosen, A. M. 2008. Phytolith analysis. *Encyclopedia of Archaeology*. Deborah M. Pearsall. Academic Press, Massachusetts, États-Unis, pp.1818-1822. <https://doi.org/10.1016/B978-012373962-9.00247-8>
- Sangster, A. G. 1970. Intracellular Silica Deposition in Mature and Senescent Leaves of *Sieglingia decumbens* (L.) Bernh. *Annals of Botany*, 34(3), pp.557-570. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a084391>
- Sangster, A. G., Hodsonband, M. J., Tubbs, H. J. 2001. Silicon Deposition in Higher Plants. *Silicon in Agriculture*. Datnoff, L.E. Elsevier Science, Massachusetts, États-Unis, pp.85-113.

- Sato, K., Takahashi, K. 1983. An Analysis of the Border Effect in the Rice Paddy Fields. *Japanese Journal of Crop Science*, 52(2), pp. 168-176. <https://doi.org/10.1626/jcs.52.168>
- Savant, N. K., Datnoff, L. E., Snyder, G. H. 1997. Depletion of plant-available silicon in soils : A possible cause of declining rice yields. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 28(13-14), pp.1245-1252. <https://doi.org/10.1080/00103629709369870>
- Shakoor, S. A., Bhat, M. A., Mir, S. H. 2014. Phytoliths in Plants : A Review. *Research and Reviews : Journal of Botanical Sciences*, 3(3), pp.10-24.
- Shoji, S., Nanzyo, M., Dahlgren, R. 1993. Chapter 8 Productivity and Utilization of Volcanic Ash Soils. In Sadao Shoji, M. Nanzyo, & R. Dahlgren (Éd.), *Developments in Soil Science*, pp.209-251. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)70269-1](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)70269-1)
- Shoji, S., Takahashi, T. 2002. Environmental and agricultural significance of volcanic ash soils. *Global Journal of Environmental Research*, 6, pp.113-135.
- Sommer, M., Kaczorek, D., Kuzyakov, Y., Breuer, J. 2006. Silicon pools and fluxes in soils and landscapes — a review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 169(3), pp.310-329. <https://doi.org/10.1002/jpln.200521981>
- Song, Z., Müller, K., Wang, H. 2014. Biogeochemical silicon cycle and carbon sequestration in agricultural ecosystems. *Earth-Science Reviews*, 139, pp.268-278. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.09.009>.
- Song, Z., Liu, H., Strömberg, C. A. E., Yang, X., Zhang, X. 2017. Phytolith Carbon Sequestration in Global Terrestrial Biomes. *Science of the Total Environment*, 603-604, pp.502-509. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.107>
- Song, Z., Wang, H., Strong, P. J., Guo, F. 2014. Phytolith carbon sequestration in China's croplands. *European Journal of Agronomy*, 53, pp.10-15. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.11.004>
- Stednick, D. J. 1981. Hydrochemical Balance of an Alpine Watershed in Southeast Alaska. *Arctic and Alpine Research*, 13, pp.431. <https://doi.org/10.2307/1551054>
- Stimac, J., Goff, F., Goff, C. J. 2015. Chapter 46 - Intrusion-Related Geothermal Systems. In H. Sigurdsson (Éd.), *The Encyclopedia of Volcanoes (Second Edition)*, pp.799-822. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00046-8>
- Tréguer, P., De La Rocha, C. L. 2013. The world ocean silica cycle. *Annual Review of Marine Science*, 5, pp.477-501. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-121211-172346>

- Tréguer, P., Nelson, D. M., Bennekom, A. J. Van, Demaster, D. J., Leynaert, A., Queguiner, B. 1995. The Silica Balance in the World Ocean : A Reestimate. *Science*, 268(5209), pp.375-379.
<https://doi.org/10.1126/science.268.5209.375>
- Ugolini, F., Dahlgren, R. A. 2002. Soil development in volcanic ash. *Global Environ. Res. Engl. Ed.*, 6.
- van Hinsberg, V., Berlo, K., van Bergen, M., Williams-Jones, A. 2010. Extreme alteration by hyperacidic brines at Kawah Ijen volcano, East Java, Indonesia : I. Textural and mineralogical imprint. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 198(1), pp.253-263. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.09.002>
- van Rotterdam-Los, A. M. D., Vriend, S. P., van Bergen, M. J., van Gaans, P. F. M. 2008 a. The effect of naturally acidified irrigation water on agricultural volcanic soils. The case of Asembagus, Java, Indonesia. *Journal of Geochemical Exploration*, 96(1), pp.53-68. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2007.07.003>
- van Rotterdam-Los, A. M. D., Heikens, A., Vriend, S. P., van Bergen, M. J., van Gaans, P. F. M. 2008 b. Impact of acid effluent from Kawah Ijen crater lake on irrigated agricultural soils : Soil chemical processes and plant uptake. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 178(2), pp.287-296.
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.06.027>
- Wang, K., Zhou, H., Wang, B., Jian, Z., Wang, F., Huang, J., Nie, L., Cui, K., Peng, S., 2013. Quantification of border effect on grain yield measurement of hybrid rice. *Field Crops Research*, 141, pp.47-54.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.11.012>
- White, A. F., Blum, A. E., Schulz, M. S., Vivit, D. V., Stonestrom, D. A., Larsen, M., Eberl, D. 1998. Chemical Weathering in a Tropical Watershed, Luquillo Mountains, Puerto Rico : I. Long-Term Versus Short-Term Weathering Fluxes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(2), pp.209-226.
[https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(97\)00335-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(97)00335-9)
- Yan, G., Nikolic, M., Ye, M., Xiao, Z., Liang, Y. 2018. Silicon acquisition and accumulation in plant and its significance for agriculture. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(10), pp.2138-2150.
[https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)62037-4](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)62037-4)
- Yuan, H-F. Cheng, Y-S. 1977. Tile physiological significance in rice plants : the influence of pH on silicon uptake of rice plants and the presence of silica in the cell wall. *Proc. Nat. Sci. Council (Taiwan)*, 10, pp.2-13.
- Zhang, J., Lu, H., Sun, G., Flad, R., Wu, N., Huan, X., Wang, Y. 2016. Phytoliths reveal the earliest fine reedy textile in China at the Tianluoshan site. *Scientific Reports*, 6, pp.18664.
<https://doi.org/10.1038/srep18664>

Sites web

ArcGis. Fonctionnement de l'outil Accumulation de flux. Consulté le 10 avril 2019, à l'adresse :

<http://desktop.arcgis.com/fr/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-flow-accumulation-works.htm>

FAO. Indonesia. Consulté le 28 mai 2019, à l'adresse :

<http://www.fao.org/3/Y4347E/y4347e0x.htm>

FAO. IYR 2004 : All about rice : Indonesia. Consulté le 23 mai 2019, à l'adresse :

<http://www.fao.org/rice2004/en/p15.htm>

FAO. Japan. Consulté le 16 avril 2019, à l'adresse :

<http://www.fao.org/3/Y4347E/y4347e10.htm>

FAOSTAT. Consulté le 02 mai 2019, à l'adresse :

<http://www.fao.org/faostat/fr/#data/QC>

Futura. Le Old Faithful du parc national de Yellowstone. Consulté le 2 février 2019, à l'adresse :

<https://www.futura-sciences.com/planete/photos/geologie-plus-beaux-geysers-monde-1294/geologie-old-faithful-parc-national-yellowstone-9222/>

Gbank. AsoIntroduction/ Topography of the caldera / Growth history of Aso volcano. Consulté le 11 mars 2019, à l'adresse :

<https://gbank.gsj.jp/volcano/ActVol/aso/text/eng/exp04-1e.html>

Ijen Monthly Climate Averages. Consulté le 18 mai 2019, à l'adresse :

<https://www.worldweatheronline.com/ijen-weather/east-java/id.aspx>

Ijen Volcanic Complex, consulté le 20 mai à l'adresse :

<https://www2.ulb.ac.be/sciences/cvl/DKIPART3.pdf>

IRRI. Steps to successful rice production. Rice Production Manual, Los Baños (Philippines) : International Rice Research Institute. Consulté 28 février 2019, à l'adresse :

<http://www.knowledgebank.irri.org/images/docs/12-Steps-Required-for-Successful-Rice-Production.pdf?pdf=12-Steps-Required-for-Successful-Rice-Production>

IUSS Working Group WRB. 2015. Base de référence mondiale pour les ressources en sols 2014, Mise à jour 2015. Système international de classification des sols pour nommer les sols et élaborer des légendes de cartes pédologiques. Rapport sur les ressources en sols du monde N 106. FAO, Rome. ISSN 1020-430X. Consulté le 20 mai à l'adresse :

<http://www.fao.org/3/i3794fr/I3794FR.pdf>

JMA (Japan Meteorological Agency), Climate Northern Kyushu district. Consulté 13 avril 2019, à l'adresse :
<https://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/longfcst/en/tourist/file/NorthernKyushu.html>

Kome-Academy. Rice Farming in Japan. Consulté 13 avril 2019, à l'adresse :
https://kome-academy.com/en/kome_library/make.html

Loupiote. Bubbling hot springs, lassen volcanic national park. Consulté le 2 février 2019, à l'adresse :
<https://www.loupiote.com/photos/20774596529.shtml>

Nippon. Ontake Erupts, Shows Difficulty of Predicting Volcanic Disaster. (2/10/2014). Consulté le 13 avril 2019, à l'adresse :
<https://www.nippon.com/en/behind/l00066/ontake-erupts-shows-difficulty-of-predicting-volcanic-disaster.html>

Portal Site of Official Statistics of Japan. Consulté le 15 mars 2019, à l'adresse :
<https://www.e-stat.go.jp/en>

RICE HUB. The Rice Plant. Consulté le 2 février 2019, à l'adresse :
<http://www.ricehub.org/RT/crop-establishment/-the-rice-plant/>

Ricepedia. Cultivated rice species. Consulté le 25 février 2019, à l'adresse :
<http://ricepedia.org/rice-as-a-plant/rice-species/cultivated-rice-species>

Shinmei Global Site. How to grow rice Tradition & JapanRice & JAPAN RICE Shinmei Global Site. Consulté le 15 mars 2019, à l'adresse :

USDA. Indonesia rice Mars 2012. Consulté 18 mai 2019, à l'adresse :
https://ipad.fas.usda.gov/highlights/2012/03/Indonesia_rice_Mar2012/

USDA. South East Asia - Crop Calendars. Consulté le 22 mai 2019, à l'adresse :
https://ipad.fas.usda.gov/rssiws/al/crop_calendar/seasia.aspx

U.S. Geological Survey. EarthExplorer. Consulté le 21 mars 2019, à l'adresse :
<https://earthexplorer.usgs.gov/>

A Annexe : Résultats

A.1 Biomasse des plants de riz des parcelles du Mont Aso, Japon

Tableau 15 – Biomasse des plants de riz de la parcelle N1 du Mont Aso, Japon. G = grains, T = tiges, F= feuilles.

Plant de riz	Label	Poids frais (g)	Poids frais total (g)	% PF	Poids sec (g)	Poids sec total (g)	% PS
1	N1R1G	3,45	6,84	50,44	3,11	5,38	57,81
	N1R1T	2,35		34,36	1,32		24,54
	N1R1F	1,04		15,20	0,95		17,66
2	N1R2G	3,55	8,48	41,86	3	6,17	48,62
	N1R2T	2,85		33,61	1,44		23,34
	N1R2F	2,08		24,53	1,73		28,04
3	N1R3G	3,23	7,13	45,30	2,93	5,37	54,56
	N1R3T	2,54		35,62	1,2		22,35
	N1R3F	1,36		19,07	1,24		23,09
4	N1R4G	4,34	9,84	44,11	3,73	6,66	56,01
	N1R4T	3,78		38,41	1,5		22,52
	N1R4F	1,72		17,48	1,43		21,47
5	N1R5G	4,08	8,72	46,79	3,88	7,42	52,29
	N1R5T	3,06		35,09	1,95		26,28
	N1R5F	1,58		18,12	1,59		21,43

Tableau 16 – Biomasse des plants de riz de la parcelle N2 du Mont Aso, Japon. G = grains, T = tiges, F= feuilles.

Plant de riz	Label	Poids frais (g)	PF total (g)	% PF	Poids sec (g)	PS total (g)	% PS
1	N2R1G	4,27	9,33	45,77	3,53	6,39	55,24
	N2R1T	3,44		36,87	1,58		24,73
	N2R1F	1,62		17,36	1,28		20,03
2	N2R2G	4,36	9,70	44,95	3,76	6,68	56,29
	N2R2T	3,62		37,32	1,54		23,05
	N2R2F	1,72		17,73	1,38		20,66
3	N2R3G	3,33	8,06	41,32	2,78	5,44	51,10
	N2R3T	3,28		40,69	1,49		27,39
	N2R3F	1,45		17,99	1,17		21,51
4	N2R4G	4,49	9,59	46,82	3,78	6,37	59,34
	N2R4T	3,67		38,27	1,47		23,08
	N2R4F	1,43		14,91	1,12		17,58
5	N2R5G	3,60	7,40	48,65	3,01	5,25	57,33
	N2R5T	2,63		35,54	1,27		24,19
	N2R5F	1,17		15,81	0,97		18,48

Tableau 17 – Biomasse des plants de riz de la parcelle S1 du Mont Aso, Japon. G = grains, T = tiges, F= feuilles.

Plant de riz	Label	Poids frais (g)	PF Total (g)	% PF	Poids sec (g)	PS total (g)	PS %
1	S1R1G	3,63	8,49	42,76	2,72	5,22	52,11
	S1R1T	2,6		30,62	1,09		20,88
	S1R1F	2,26		26,62	1,41		27,01
2	S1R2G	3,03	7,43	40,78	2,31	4,65	49,68
	S1R2T	2,85		38,36	1,29		27,74
	S1R2F	1,55		20,86	1,05		22,58
3	S1R3G	3,91	8,46	46,22	2,97	4,92	60,37
	S1R3T	2,96		34,99	1,1		22,36
	S1R3F	1,59		18,79	0,85		17,28
4	S1R4G	3,42	9,42	36,31	2,65	6,22	42,60
	S1R4T	3,32		35,24	1,76		28,30
	S1R4F	2,68		28,45	1,81		29,10
5	S1R5G	3,23	8,69	37,17	2,47	5,43	45,49
	S1R5T	3,4		39,13	1,58		29,10
	S1R5F	2,06		23,71	1,38		25,41

Tableau 18 – Biomasse des plants de riz de la parcelle S2 du Mont Aso, Japon. G = grains, T = tiges, F= feuilles.

Plant de riz	Label	Poids frais (g)	PF total (g)	% PF	Poids sec (g)	PS total (g)	PS%
1	S2R1G	2,57	5,58	46,06	2,01	3,41	58,94
	S2R1T	1,81		32,44	0,64		18,77
	S2R1F	1,2		21,51	0,76		22,29
2	S2R2G	3,41	7,29	46,78	2,62	4,6	56,96
	S2R2T	2,82		38,68	1,11		24,13
	S2R2F	1,06		14,54	0,87		18,91
3	S2R3G	3,08	7,32	42,08	2,34	4,53	51,66
	S2R3T	2,85		38,93	1,19		26,27
	S2R3F	1,39		18,99	1		22,08
4	S2R4G	3,09	7,02	44,02	2,53	4,52	55,97
	S2R4T	2,59		36,89	1,05		23,23
	S2R4F	1,34		19,09	0,94		20,80
5	S2R5G	3,63	8,27	43,89	2,79	5,21	53,55
	S2R5T	3,03		36,64	1,32		25,34
	S2R5F	1,61		19,47	1,1		21,11

A.2 Concentration en Si des plants de riz des parcelles du Mont Aso, Japon

Tableau 19 – Concentration en Si (g de Si par kg de biomasse) des plants de riz des échantillons du Mont Aso, Japon.

Plant de riz	Parcelle N1		Parcelle N2		Parcelle S1		Parcelle S2	
	NOM	Si g/kg	NOM	Si g/kg	NOM	Si (g/kg)	NOM	Si (g/kg)
1	N1R1G	21,22	N2R1G	22,94	S1R1G	17,20	S2R1G	21,23
	N1R1T	58,12	N2R1T	55,24	S1R1T	64,86	S2R1T	56,41
	N1R1F	99,23	N2R1F	109,88	S1R1F	100,60	S2R1F	104,22
2	N1R2G	14,57	N2R2G	19,32	S1R2G	18,28	S2R2G	28,30
	N1R2T	62,08	N2R2T	65,87	S1R2T	54,45	S2R2T	67,49
	N1R2F	118,95	N2R2F	117,21	S1R2F	77,02	S2R2F	102,13
3	N1R3G	26,23	N2R3G	37,41	S1R3G	22,91	S2R3G	17,87
	N1R3T	66,63	N2R3T	50,96	S1R3T	70,44	S2R3T	60,41
	N1R3F	124,57	N2R3F	99,54	S1R3F	87,31	S2R3F	110,55
4	N1R4G	23,18	N2R4G	22,33	S1R4G	19,45	S2R4G	17,66
	N1R4T	65,51	N2R4T	69,95	S1R4T	43,32	S2R4T	65,17
	N1R4F	110,67	N2R4F	108,45	S1R4F	86,72	S2R4F	111,40
5	N1R5G	22,09	N2R5G	25,20	S1R5G	20,39	S2R5G	16,63
	N1R5T	57,49	N2R5T	61,04	S1R5T	43,59	S2R5T	56,57
	N1R5F	116,21	N2R5F	96,61	S1R5F	86,01	S2R5F	116,37

A.3 Concentration en Si des rivières pour différentes saisons en différents sites du Mont Aso, Japon.

Tableau 20 – Concentration en Si des rivières pour différentes saisons en différents sites du Mont Aso, Japon.

Rivière	Saison d'échantillonnage	Site d'échantillonnage	Concentration en Si (ppm)
Rivière principale nord	Printemps 2015	S36	27,4
Rivière principale nord	Eté 2015	S36	26,4
Rivière principale nord	Printemps 2015	S30	22,9
Rivière principale nord	Eté 2015	S30	24,00
Rivière principale nord	Printemps 2015	S35	22,3
Rivière principale nord	Eté 2015	S35	21,8
Rivière principale nord	Printemps 2015	S01	21,0
Rivière principale nord	Eté 2015	S01	22,6
Rivière principale nord	Eté 2016	S01	20,4
Rivière principale sud	Printemps 2015	S23	26,4
Rivière principale sud	Eté 2015	S23	26,1
Rivière principale après la confluence	Printemps 2015	S33	26,4
Rivière principale après la confluence	Eté 2015	S33	24,20

A.4 Biomasse des plants de riz des parcelles du site du Kawah Ijen, Indonésie

Tableau 21 – Biomasse des plants de riz de la parcelle 1 irriguée par la rivière Banyuputih (BP1) du site du Kawah Ijen, Indonésie. G = grains, T = tiges, F= feuilles.

Cluster de plants de riz	Label	Poids frais (g)	Poids frais total (g)	Pourcentage PF (%)	Poids sec (g)	Poids sec total (g)	Pourcentage PS (%)
1	BP1R1G	2,76	41,14	6,71	1,31	11,12	11,82
	BP1R1T	26,42		64,22	6,33		56,98
	BP1R1F	11,96		29,07	3,47		31,20
2	BP1R2G	19,03	83,09	22,90	8,27	26,21	31,57
	BP1R2T	48,50		58,37	12,77		48,74
	BP1R2F	15,56		18,73	5,16		19,69
3	BP1R3G	11,76	54,13	21,73	7,22	19,45	37,12
	BP1R3T	30,66		56,64	7,36		37,85
	BP1R3F	11,71		21,63	4,87		25,03
4	BP1R4G	12,63	70,25	17,98	5,74	23,24	24,70
	BP1R4T	40,09		57,07	11,36		48,88
	BP1R4F	17,53		24,95	6,14		26,42
5	BP1R5G	14,23	101,13	14,07	6,66	34,16	19,49
	BP1R5T	61,60		60,91	15,88		46,50
	BP1R5F	25,30		25,02	11,62		34,01

Tableau 22 – Biomasse des plants de riz de la parcelle 2 irriguée par la rivière Banyuputih (BP2) du site du Kawah Ijen, Indonésie. G = grains, T = tiges, F= feuilles.

Numéro	Label	Poids frais (g)	Poids frais total (g)	Pourcentage PF (%)	Poids sec (g)	Poids sec total (g)	Pourcentage PS (%)
1	BP2R1G	20,28	94,27	21,51	10,72	31,74	33,79
	BP2R1T	49,28		52,28	11,68		36,81
	BP2R1F	24,71		26,21	9,33		29,40
2	BP2R2G	15,22	90,46	16,83	7,81	29,29	26,68
	BP2R2T	47,37		52,37	10,13		34,60
	BP2R2F	27,87		30,81	11,34		38,72
3	BP2R3G	23,12	117,12	19,74	12,19	37,47	32,54
	BP2R3T	64,41		54,99	12,50		33,36
	BP2R3F	29,59		25,26	12,77		34,10
4	BP2R4G	22,82	106,22	21,48	15,42	37,44	41,19
	BP2R4T	52,04		48,99	12,69		33,88
	BP2R4F	31,36		29,52	9,33		24,93
5	BP2R5G	15,72	88,76	17,71	9,96	32,12	31,02
	BP2R5T	52,20		58,81	14,37		44,75
	BP2R5F	20,84		23,48	7,79		24,24

Tableau 23 – Biomasse des plants de riz de la parcelle irriguée par la rivière Bangeran (BA) du site du Kawah Ijen, Indonésie. G = grains, T = tiges, F= feuilles.

Cluster de plants de riz	Label	Poids frais (g)	Poids frais total (g)	Pourcentage PF (%)	Poids sec (g)	Poids sec total (g)	Pourcentage PS (%)
1	BA1R1G	15,42	106,85	14,43	6,92	30,51	22,68
	BA1R1T	60,90		57,00	15,38		50,42
	BA1R1F	30,53		28,57	8,21		26,90
2	BA1R2G	13,32	97,74	13,63	7,07	34,57	20,44
	BA1R2T	52,58		53,80	13,21		38,20
	BA1R2F	31,84		32,58	14,30		41,36
3	BA1R3G	19,48	130,44	14,93	9,96	45,80	21,75
	BA1R3T	72,16		55,32	25,38		55,42
	BA1R3F	38,80		29,75	10,46		22,83
4	BA1R4G	14,17	105,83	13,39	6,72	37,11	18,12
	BA1R4T	53,38		50,44	16,24		43,76
	BA1R4F	38,28		36,17	14,15		38,12
5	BA1R5G	10,28	63,02	16,31	4,72	26,76	17,62
	BA1R5T	34,28		54,40	11,06		41,32
	BA1R5F	18,46		29,29	10,99		41,06

A.5 Concentration en Si des plants de riz des parcelles du Kawah Ijen, Indonésie

Tableau 24 – Concentration en Si (g de Si par kg de matière sèche) des plants de riz des parcelles du site du Kawah Ijen, Indonésie. G = grains, T = tiges, F= feuilles.

Parcelle	Partie	Moyenne Si (g/kg)	Moyenne Si par plant (g/kg)
Banyuputih 1	G	49,15	146,26
	T	50,62	
	F	46,50	
Banyuputih 2	G	26,16	84,60
	T	58,44	
	F	60	
Bangeran 1	G	50,74	134,09
	T	34,16	
	F	49,20	

A.6 Concentration en Si des rivières pour différentes saisons en différents sites du Kawah Ijen, Indonésie.

Tableau 25 – Concentration en Si (ppm) lors de différentes saisons aux sites d'échantillonnage de la rivière Banyuputih, Kawah Ijen, Indonésie.

Site d'échantillonnage	Concentration Si (ppm) Septembre 1993 (Delmelle et Bernard, 2000)	Concentration Si (ppm) Aout 1996 (Delmelle et Bernard, 2000)	Concentration Si (ppm) Février 2017
BP1	84,14	75,26	40,01
BP2	45,81	52,54	40,02
BP3	49,55	/	40,63
BP4	52,36	57,97	44,41
BP5	54,23	/	45,69
BP6	49,08	58,9	59,92
BP7	57,5	64,04	39,91
BP8	47,68	44,88	40,26
BP9	35,53	47,21	41,57
BP10	/	45,81	41,35

B Annexe : Discussion

B.1 Biomasse

Tableau 26 – Valeurs moyennes du poids sec (PS) par plant et par cluster ainsi que du rendement pour les parcelles du Mont Aso, Japon.

Parcelle	Plant par m2	PS moyen par plant (g)	PS moyen par cluster (g)	Rendement moyen (kg/ha)
N1	575	6,2	142,60	19 147,50
N2	550	6,03	132,57	18 546,00
S1	840	5,29	148,06	22 041,60
S2	620	4,45	138,07	20 647,20

Tableau 27 – Valeurs moyennes du poids sec (PS) par plant et par cluster ainsi que du rendement pour les parcelles du site du Kawah Ijen, Indonésie.

Parcelle	Cluster par m2	PS moyen par cluster (g)	Rendement moyen (kg/ha)
BanyuPutih 1	36	22,84	2 103,03
BanyuPutih 2	36	33,61	4 040,34
Bangeran 1	36	34,95	2 547,88

Export de silicium par les cultures de riz par rapport aux flux de Si exportés par les rivières dans les arcs insulaires volcaniques

Présenté par Julie Meunier

Résumé

A long terme l'altération des silicates de magnésium et de calcium consomme du CO_2 atmosphérique. Les régions volcaniques sont responsables de 30 % de la consommation totale de CO_2 atmosphérique par l'altération des silicates bien que ces régions représentent moins de 5 % de la surface de la terre. Le flux de silicium (Si) exporté par les rivières est utilisé pour les calculs des flux d'altération. Les cultures accumulatrices de Si dans ces régions pourraient impacter les flux de Si exportés par les eaux de rivière utilisés pour calculer les flux d'altération.

Ce mémoire vise à évaluer si les flux de Si exportés par les cultures sont significatifs par rapport aux flux de Si des eaux de rivière dans deux sites situés dans des arcs insulaires volcaniques. Ces zones volcaniques sont caractérisées par à la fois des taux d'altération élevés et des sols fertiles, ce qui en fait des sites d'étude idéaux pour répondre à notre objectif. La culture de riz en particulier est étudiée dans ce mémoire car c'est la culture qui produit le plus de Si biogénique annuellement à l'échelle mondiale.

Les sites étudiés sont les volcans actifs de l'Aso, au Japon, et de l'Ijen, en Indonésie. Pour chaque site, des plants de riz sont analysés pour différentes parcelles. Une analyse de la biomasse et de la concentration en Si de ces plants de riz est effectuée. L'export de Si par les cultures de riz est calculé à l'aide des données de biomasse et de concentration en Si des plants de riz. Les flux de Si des eaux de rivière sont déterminés à partir du débit des rivières et de leurs concentrations en Si.

La comparaison des flux de Si exportés par les cultures de riz à l'échelle d'un bassin versant par rapport aux flux de Si des eaux de rivière montre que ces flux sont significatifs. En tenant compte des pratiques culturelles des sites, le flux de Si exporté par les cultures de riz par rapport au flux de Si exporté par les eaux de rivière représente 62,5% pour le Mont Aso et 17,9% pour le Kawah Ijen. Différents scénarios ont également été réalisés et les résultats obtenus montrent l'influence des pratiques culturelles lors du calcul des flux de Si exportés par les cultures. En effet, les pratiques culturelles telles que le nombre de récoltes par an ou la restitution éventuelle de parties non comestibles font varier considérablement les flux de Si exportés. De plus, on peut envisager que l'export de Si par les cultures est plus significatif encore si l'on tient compte des autres cultures accumulatrices de Si.

Ce mémoire suggère que les flux de Si exportés par les cultures devraient être pris en considération lors des calculs de flux de Si liés à l'altération dans les arcs insulaires volcaniques, ceci afin d'améliorer les estimations de la consommation en CO_2 atmosphérique associée à l'altération dans ces régions.