

Université de Montréal

Distribution en taille des particules et nutriments : relation entre le matériel parental et la poussière minérale en désert côtier de la Namibie

Par

Amélie Chaput

Département de géographie

Faculté des arts et des sciences

Mémoire présenté en vue de l'obtention

Du grade de M. Sc. en géographie

Avril 2020

© Amélie Chaput, 2020

Université de Montréal

Département de Géographie/Université de Montréal

Ce mémoire intitulé

**Distribution en taille des particules et nutriments : relation entre le matériel parental et la
poussière minérale en désert côtier de la Namibie**

Présenté par

Amélie Chaput

A été évalué par un jury composé des personnes suivantes

Julie Talbot, Présidente-rapporteuse

James King, Directeur de recherche

Paola Formenti, Membre du jury

Résumé

Le rôle des particules de poussières comporte une grande incertitude des modèles climatiques, alors qu'ils constituent une grande influence sur le bilan radiatif global et l'apport en nutriments pour divers écosystèmes. Ce projet de recherche permet d'évaluer la composition de particules de poussières en Namibie, en fonction de trois vallées constituées de rivières éphémères en région côtière. La sélection des vallées s'est basée sur leur fréquence importante d'émissivité, observée par image satellitaire. En 2017, des mesures en temps réel ont été prises ainsi que des échantillons de surface, dont l'analyse des sols et filtres s'est effectuée en laboratoire. Les propriétés des sols, c'est-à-dire la distribution de la taille, de la minéralogie et composition élémentaire, seront traitées dans ce mémoire. Le but étant d'évaluer les sources d'émission et le potentiel de transport des poussières, par une meilleure connaissance de l'interaction des sols en relation avec les particules transportées par le vent. Il a été observé que le transect de la vallée du Huab possède une taille de particule plus fine en raison de divers facteurs, dont une rivière éphémère plus active. Le transect de la vallée de Omaruru quant à lui possède une composition en minéraux plus variée, dont une petite concentration en éléments lourds. Pour le transect de la vallée du Kuiseb, en raison du site d'échantillonnage et une forte influence de la mer de sable, des particules plus près de la fraction du sable ont été identifiées en plus grande quantité par rapport aux autres sites. Il est donc suggéré que, malgré une grande concentration de particules fines pour le Huab, son processus d'émission demande une fréquence de vent et un environnement propice à l'émission des particules par suspension. Contrairement à certaines vallées telles que le Hoanib ou le Hunkab, le Kuiseb et le Omaruru semblent influencés par la désintégration des argiles lors de la saltation et le bombardement de particules plus grossières.

Mots-clés :

Géomorphologie éolienne, poussières, région côtière, environnement aride, distribution particules, minéralogie, élémentaire.

Abstract

Dust particles are primarily known to modify radiative forcing as well as nutrient contribution of coastal regions, but account for an important part of climatic model uncertainties. This project evaluates the characteristics of dust particles in river valleys of Namibia within three valleys of the coastal region. The selection of sites was determined by their frequency of emissions observed by satellite imagery. In 2017, fieldwork measures were taken as well as surfaces samples, which were analysed for their particle size distribution, their mineralogy as well as their elemental composition. The results presented in this thesis look at potential transport emission, to better understand interactions between soil and airborne particles. It was observed that the transect of the Huab valley presents the finest distribution of particles, primarily because of its active river providing finer particles to dust sources. The transect of the Omaruru has a more varied particle size distribution relative to the Huab valley and the Kuiseb, but has some coarser particles present in small quantities. Because of its location, the transect of the Kuiseb is strongly influenced by the Namib sand sea, which is reflected in its particle size distribution. Because of existing literature about dust particles, it is possible to suggest that the Huab valley needs stronger winds to be able to be emissive as it erodes predominantly through a modified direct suspension mechanism. Saltation and bombardment seem to play a more important role in the Kuiseb valley than the other valleys along the coast, such as the Hoanib or the Hunkab, because of its important composition of sand and geomorphology proprieties.

Keywords:

Aeolian geomorphology, dust, coastal region, arid environments, particle distribution, mineralogy, elemental.

Table des matières

Résumé	V
Abstract	VI
Table des matières	VII
Liste des tableaux	IX
Liste des figures.....	XI
Liste des images et annexes.....	XVI
Liste des sigles et abréviations	XVIII
Remerciements	XIX
Introduction générale.....	20
Chapitre 1: Cadre théorique.....	24
1.1: Problématique et hypothèses	24
1.2: Géologie et géomorphologie côtière	29
1.3: Circulation atmosphérique	32
1.3.1: Patrons de circulation	32
1.3.2: Systèmes anticyclones.....	34
1.3.3: Dépression hivernale	34
1.3.4: Zone de convergence tempérée tropicale	34
1.4: Patrons d'émission	35
1.5: Dynamique des particules	37
1.5.1: Initiation du mouvement	37
1.5.2: Déplacement des particules	39
1.5.3: Facteurs d'émissions et de déposition des sédiments.....	41
1.6: Chimie et minéralogie des poussières	43
Chapitre 2: Site d'étude et méthodologie	47
2.1: Description individuelle des sites.....	48
2.1.1: Huab	48

2.1.2: Omaruru	48
2.1.3: Kuiseb.....	49
2.2: Méthodologie et traitements des résultats	51
2.2.1: Site d'étude :.....	52
2.2.2: Données de terrain.....	54
2.2.3: Analyses de données en laboratoire :	56
2.2.4: Description des outils d'analyses en laboratoire	57
2.2.5: Analyses statistiques.....	67
Chapitre 3: Résultats	69
3.1: Résultats généraux.....	69
3.2: Distribution en taille des particules.....	70
3.3: Minéralogie du sol.....	73
3.4: Composition élémentaire.....	74
3.5: Analyses statistiques.....	78
3.5.1: Tests préliminaires	78
3.5.2: Analyse de similarité.....	79
Chapitre 4: Discussion et conclusion des résultats.....	81
4.1: Interprétation des résultats.....	81
4.1.1: Quelle est la distribution en taille des poussières émises en région côtière ?.....	81
4.1.2: Quelle est la composition élémentaire et minéralogique ? Y a-t-il une homogénéité des poussières minérales entre les vallées de la Namibie ?	83
4.2: Relation entre les variables à l'étude.....	85
4.2.1: Quels sont les potentiels processus d'érosion responsables de l'entraînant des poussières minérales ?.....	85
4.2.2: Y a-t-il une variation entre le sol, le matériel parental et les poussières potentiellement émises par ce dernier ?.....	87
Conclusion générale	89
4.3: Implication de l'étude.....	90

Bibliographie	91
Annexe A.....	99
Annexe B.....	106

Liste des tableaux

Tableau 1 : Quantification globale de la présence d'éléments à l'étude dans la couche supérieure de la croûte terrestre. En gris représente les unités en ppm (Taylor and McLennan, 1995).	44
Tableau 2 : Données de Fe soluble selon les trajectoires d'origines (Trapp et al., 2010).	47
Tableau 3 : Représentation du nombre d'échantillons analysés et utilisés pour générer les résultats de ce projet. Pour plus de détails sur l'ordre de sélection, voir Figure 20. Les échantillons non traités correspondent aux échantillons qui n'ont pas été sélectionnés faute de temps où inférieur à la limite de détection.....	51
Tableau 4 : Description et justification des objectifs pour l'utilisation des instruments de mesure lors du terrain en Namibie 2017. Voir Figure 23 pour la correspondance avec l'installation des instruments. Les Astérisques en rouge signifient qu'ils seront manquants dans le mémoire.....	55
Tableau 5 : Analyse en laboratoire des échantillons récoltés en Namibie à l'été 2017. L'astérisque rouge signifie que les analyses seront manquantes dans ce mémoire.	56
Tableau 6 : Description des instruments d'analyses pour l'étude de la distribution des particules, sur de courtes longueurs d'onde (Di-Biagio et al., 2017 ; Wang et al., 2011).....	60
Tableau 7 : Exemples de techniques d'analyse et leur application : analyses inorganiques (Dean, 2014).....	62
Tableau 8 : Analyses statistiques des trois sites, selon les données récoltées : 1) Distribution en taille des particules ; 2) Composition minéralogique du sol (< 60 µm) ; 3) Composition élémentaire (a. <20 µm; b. < 60 µm) (Legendre and Legendre, 2012; Paliy and Shankar, 2016).	68
Tableau 9 : Description des analyses statistiques effectuées sur les résultats du mémoire avant les tests statistiques.	68

Tableau 10 : Résumé des résultats d'analyses sur les échantillons de la campagne en Namibie à l'été 2017 pour les sites du Huab, du Kuiseb et du Omaruru. Les éléments étudiés sont la taille des particules (μm), le pourcentage de masse des échantillons tamisés, la minéralogie du sol (analyse DRX) et la composition élémentaire (analyse SFX).	70
Tableau 11 : Résumé de la distribution en taille des particules (% masse) selon les échantillons tamisés. Données collectées lors de la campagne en Namibie à l'été 2017.	71
Tableau 12 : Groupement résumé des minéraux d'échantillons de sol, selon les trois sites à l'étude (Huab, Kuiseb, Omaruru). Les résultats sont séparés en groupes minéralogiques (%).	73
Tableau 13 : Test de post- hoc. Kruskal. Nemenyi sur l'ensemble des sites à l'étude selon la composition minéralogique. En gras constitue les sites statistiquement similaires (lorsque plus de deux sites sont considérés comme significatifs), alors que le contraire signifie que les sites sont statistiquement différents.	74
Tableau 14 : Test de post- hoc. Kruskal. Nemenyi sur l'ensemble des sites à l'étude selon la composition élémentaire. En gras constituent les sites statistiquement similaires (lorsque plus de deux sites sont considérés comme significatifs), alors que le contraire signifie que les sites sont statistiquement différents.	76
Tableau 15 : Différence des moyennes élémentaires entre les aérosols générés par le CESAM (STAE) ainsi que les échantillons de sol tamisé à $63 \mu\text{m}$ (STPE). En gras constituent les sites statistiquement similaires (lorsque plus de deux sites sont considérés significatifs), alors que le contraire signifie que les sites sont statistiquement différents. Données récoltées à l'été 2017, puis traitées en 2018 pour la vallée du Huab, Kuiseb et du Omaruru.	77

Liste des figures

Figure 1 : Schéma identifiant les principaux effets perturbateurs, associés au transport des poussières (Marx et al., 2018). La poussière influence le réchauffement et le refroidissement de l'atmosphère, par son influence sur les échanges radiatifs, à la fois directe (1) et sur le développement des nuages, i.e. acteur de condensation de noyaux (2). Il y a donc aussi un impact sur les précipitations (3). Une autre influence significative de la poussière se situe au cours des périodes glaciaires où la réduction de l'albédo de la glace par la déposition des poussières accélérerait le processus de fonte (4). La déposition de poussières fertiles des écosystèmes marins (5) et terrestres (6), en plus de la contribution à la formation du sol est aussi observée. Le rôle le plus significatif de la déposition des poussières en environnement marin se localise en régions de haute teneur en nutriments et faibles en chlorophylle. 20

Figure 2 : Diagramme à bandes pour la période entre 1750-1002, basé sur les composantes (gazes, aérosols, et précurseurs d'aérosols) ou autres changements. Le forçage positif est indiqué en rouge, alors que le forçage négatif en bleu, utilisé pour les composantes émises qui affectes les agents de forçage. Plusieurs couleurs sont utilisées pour les éléments qui affectent les diverses composantes, ceux-ci sont indiqués au haut à droite du diagramme. La barre verticale indique l'incertitude relative du forçage radiatif induit pour chacun des composants. Leur longueur varie proportionnellement selon l'épaisseur de la bande, c'est-à-dire que la longueur totale égalise l'épaisseur de la bande pour une incertitude de +/- 50 %. L'impact net des éléments est indiqué par un symbole de diamant avec son incertitude (intervalle de confiance de 5 à 95 %), indiqué par la barre d'erreur horizontale. ERFaci est ERF en raison de l'interaction nuage-aérosol. BC et CO sont coémis, particulièrement pour l'émission de la combustion de biomasse et pour une grande partie des émissions fossiles et du biocarburant. (Myhre et al., 2013)..... 21

Figure 3 : Schéma des étapes de modélisation du transport de poussière. L'image à droite du titre « Modèles atmosphériques » présente la modélisation de poussières selon différents indexes. Les panneaux de gauche présentent le modèle AOD (profondeur optique des aérosols), celui du milieu l'instrument MISR (spectroRadiomètre d'Imagerie à multiangle) AOD et celui de droite l'indexe d'aérosols pour Janvier à Mars (JFM), d'avril à juin (AMI), de juillet à septembre (JAS) et d'octobre à décembre (OND) en 2006. (Pérez et al., 2011; Shao, 2008; Tanaka and Chiba, 2006). L'image au-dessous du titre « Modèle d'assimilation des données » présente une simulation moyenne annuelle des émissions de poussières (a) et de la déposition totale (b). 22

Figure 4 : Exemple d'images où il y a une grande mobilisation de sédiments dans l'atmosphère. Les flèches indiquent certains panaches de poussières.	24
Figure 5 : a. Identification des bassins émetteurs (Image Landsat), selon le nombre de jours où il y a un évènement d'émission. b. Représentation des émissions des bassins. c. Identification des évènements de transport selon les mesures pris par MODIS (Von-Holdt et al., 2017).....	25
Figure 6 : Localisation des stations AERONET (Tegen et al., 2019). Toutes les stations sont regroupées selon un code de couleur dans lequel ils se situent : Rouge : Amérique du Nord ; Bleu : Europe ; Brun : Asie de l'est ; Rose : Sibérie ; Jaune : Nord de l'Afrique ; Vert : Afrique du Sud ; Orange : Sud de l'Amérique ; Vert foncé : Australie ; Bleu pâle : Régions océaniques ; Gris : Autres (Environnement côtier et mixte).....	26
Figure 7 : Rose des vents (hiver 2013) présentant la distribution de la vitesse des vents (U - m/s) selon la direction, pour une station météorologique de haut de vallée, le long de la vallée du Huab (créé par : Philippe Gauvin-Bourdon).	27
Figure 8 : Histoire géologique de la Namibie (Goudie and Viles, 2015) selon une échelle de temps de millions d'années passées. Les divisions géologiques majeures sont associées à leur temps respectif (ACACIA Projet E1, 2002).	30
Figure 9 : a. Carte géologique des types de roches de la Namibie. b. Carte géologique des complexes de la Namibie. C. Représentation d'imagerie satellitaire de la région de la Namibie.	31
Figure 10 : A. Ratio moyen des précipitations (mm day-1) pour les mois de novembre à février (1979-1995) (Todd and Washington, 1999). B. Moyenne des températures (°C) selon certaines stations météorologiques (Goudie and Viles, 2015).....	32
Figure 11 : Images MODIS modifiées (NASA, 2018). a. Patrons de circulations (3 décembre 2017). b. Patrons de circulation (3 juillet 2018). Basse pression (L) et haute pression (H), et zone de convergence intertropicale (ZCIT) indiquées.....	33
Figure 12 : Zone d'émissions de panaches de poussière au sud d'Afrique. (a) Bassin d'Etosha (b) bassin de Makgadikgadi (c) Sources de la côte de la Namibie (d) Sources du sud de l'ouest Kahlari (e) Sources d'États libres. Les cercles indiquent la fréquence pondérée du nombre panaches de poussière. Les diagrammes à bande indiquent le nombre de jours ou il y a eu détection de panaches	

de poussières. La région côtière de la Namibie émet de manière plus importante entre les mois de juin et août (Vickery et al., 2013).....	35
Figure 13 Carte des bassins versants en région côtière de la Namibie.	36
Figure 14 : Forces exercées sur une particule : F_L , F_F , F_D , F_G . Correspondant respectivement à la force de soulèvement, la force de traînée, la force d'entraînement puis la force de gravité (Ellis and Sherman, 2013).	37
Figure 15 : Profil de vitesse du vent au seuil du fluide (ligne verte), impact du seuil (ligne bleue) et lors de la saltation (ligne noire). Simulation par COMSALT (Kok et al., 2012; Kok and Renno, 2009). La longueur de rugosité aérodynamique (Z_0) lors de la saltation est aussi observée.	38
Figure 16 : Illustration du glissement, de la saltation et suspension des particules de sol durant un évènement d'érosion. Saltation est classifié entre saltation pure et modifiée est divisé entre la suspension à court et long terme. Transport des particules en fonction de leur taille. (Shao, 2008). En rouge sont les tailles/processus étudiées pour ce projet.	40
Figure 17 : Trois processus mécaniques du déplacement des particules par mise en suspension. (a) Entrainement aérodynamique (b) Saltation et bombardement (c) désagrégation (Shao, 2008). ...	41
Figure 18 : Illustration des trois phases d'érosion du vent, du transport et de la déposition. Les conditions atmosphériques, la propriété des sols, les caractéristiques de surfaces et du contrôle de l'érosion de surface contrôlent les processus d'érosion (modifié de Lu, 1999) (Shao, 2008).....	42
Figure 19 : A. Distribution globale du Fe ($\text{g m}^{-2} \text{ year}^{-1}$). (a) Observations (b) un modèle, en fonction des données de Ginoux et al. (2001) contenant des concentrations en aérosols $< 10 \mu\text{m}$. (Mahowald et al., 2009). B. Distribution globale du PT (Phosphore total) basé sur des observations directes (ng m^{-3}) (Mahowald et al., 2008).....	45
Figure 20 : Planification générale des analyses. Les acronymes sont indiqués en gris pâle, alors que l'astérisque signifie que ces analyses seront manquantes dans le travail présenté.	51
Figure 21 : Représentation cartographique des sites d'études de la vallée Huab, Omaruru et Kuiseb.	52
Figure 22 : Structure des interactions des facteurs affectant l'érosion et les effets résultant de l'érosion, selon les objectifs du proposé. (modifié de Ravi et al., 2011). Les éléments soulignés sont	

d'intérêt pour les études du laboratoire. L'astérisque signifie que les données de terrains rattachés aux facteurs in situ ne seront pas traitées dans le mémoire.	53
Figure 23 : Plan descriptif des installations d'équipement pour le terrain 2017.	54
Figure 24 : Représentation du Coulter Counter. a. Multisizer 4e (Photo prise par : Amélie Chaput). b. Multisizer 4 ^e (Petkov, 2011).....	57
Figure 25 : Schéma de fonctionnement du Multisizer 4 ^e modifié (McTainsh et al., 1997). Les sédiments sont déposés dans une solution isotonique, puis agités afin de mettre les sédiments en suspension.	58
Figure 26 : Schéma des instruments et connexions au CESAM (Chambre expérimentale de simulation atmosphérique). a) GRIMM ; b) Processus de mise en suspension (Échantillon contenu dans un erlenmeyer posé sur une plaque vibrante) ; c) Porte-filtre (seuls deux filtres sont connectés pour les analyses du projet) ; d) CAPS. Photos ; Amélie Chaput. Voir Tableau 6 pour la description des instruments.	59
Figure 27 : Installation du manifold avec erlenmeyer sur plaque vibrante et connexion au Grimm® et deux portes filtrent. Photo : Amélie Chaput. Voir Tableau 6 pour description des instruments.	61
Figure 28 : a. Analyse effectuée avec une analyse par DRX. (Nowak et al., 2018). Instrument d'analyse. b. Panalytical Empyrean diffractomètre avec le détecteur PIXcel (225 canaux) et une anode tube en Cu (K α 1= 1,540 6 Å) à 45 kV et 40 mA (Nowak et al., 2018 ; Paris Diderot UFR de Chimie, 2018).....	63
Figure 29 : Identification des pics (p. ex. échantillon H131 de la vallée du Huab). Axe des x : Angle. Axe des y : Intensité. Créée par : Sophie Nowak.	63
Figure 30 : Station de traitement. Déposition de 1 ml de 12 μ g de sol < 63 μ m, dilués dans 30 ml d'éthanol. Photo : Amélie Chaput	64
Figure 31 : Instrument d'analyse : Spectromètre de Fluorescence X Panalytical 2404, 4 kW, dispersif en longueur d'onde photo : Amélie Chaput.....	65
Figure 32 : Principe de Spectromètre de Fluorescence X : a) Perte d'un électron de la couche interne de l'atome après radiation par rayons X. b) Transfert d'un électron à un autre état, afin de remplir	

le vide créé par l'émission du rayon X (état d'énergie inférieur) résultant de l'émission d'un rayon X (Dean, 2014).....	65
Figure 33 : Arbre de décision pour le regroupement des éléments (similaires ou différents), selon la limite de détection et le test de similarité de post- hoc. Kruskal. Nemenyi. Les éléments inférieurs à la limite de détection ont été éliminés pour l'analyse alors que les éléments similaires et différents seront traités.	68
Figure 34 : Résultats d'analyses du Multisizer 4e par la méthode Coulter pour les trois vallées (Huab, Kuiesb, Omaruru) selon les données collectées : 2017. A. Différences en volume (Moyenne %) ; B. Régression locale des différences en volume (Moyenne %) en \log^{10} . L'Axe des x représente la taille des particules (μm) - log, l'axe des y représente le volume (%) dV/dD.....	72
Figure 35 : Composition minéralogique des sols selon les trois sites à l'étude. L'axe des x représente le type de minéralogie et l'axe des y représente la composition minéralogique (%)...	73
Figure 36 : Arbre de décision pour le regroupement de minéralogique (similaires ou différents), selon la limite de détection et le test de similarité de post- hoc. Kruskal. Nemenyi. Les éléments inférieurs à la limite de détection ont été éliminés pour l'analyse alors que les éléments similaires et différents seront traités.	74
Figure 37 : A. Ratio d'enrichissement des échantillons de STAE. B. Ratio d'enrichissement des échantillons de STPE. Les échantillons de STPE furent récoltés en 2017, alors que les STAE furent générés dans le CESAM à l'été 2017 (vallées du Huab, Kuiseb et Omaruru). L'unité des valeurs originales se trouvait sous forme de masse, puis a été transformée sur un ratio commun (Al – 0,08).	75
Figure 38 : Arbre de décision pour le regroupement de la composition élémentaire (similaires ou différents), selon la limite de détection et le test de similarité de post- hoc. Kruskal. Nemenyi. Les éléments inférieurs à la limite de détection ont été éliminés pour l'analyse alors que les éléments similaires et différents seront traités.....	76
Figure 39 : Résultats d'une PCoA regroupant les informations sur les échantillons de STPE, STAE, STPM et STPC. Les éléments suivis d'un « _a » (p. ex. Ca_a) représentent les échantillons de STAE.....	80

Figure 40 : Variation des formations géomorphologiques, selon la quantité et la taille des particules (échantillons de croûtes et sous-croûtes du « Etosha Pan », « Makgadikgadi Pan »). (Dansie et al., 2017).....	82
---	----

Liste des images et annexes

Image 1 : Photos de terrain 2017. Prise par Amélie Chaput.....	48
Image 2 : Photos de terrain 2017. Prise par Amélie Chaput.....	48
Image 3 : Photos de terrain 2017. Prise par Amélie Chaput.....	49
Tab_A 1 : Paramètres et variables de l'instrument ARA-N-FRM. Traduit de l'anglais (Instruments ARA, 2017).	103
Tab_A 2 : Taille des tubes selon la taille et le volume des particules analysées (Petkov, 2011). 104	
Tab_A 3 : Représentation des différentes analyses en ordination possible selon un espace spatial réduit (Legendre and Legendre, 2012).	105
Tab_B 1 : Description de la précision des pièges à sédiments de type BSNE (Shao et al., 1993a)	108
Tab_B 2 : Composition minéralogique des sols fins. Regroupement des statistiques descriptives et analytiques pour la minéralogie des trois sites (Huab, Kuiseb, Omaruru). Kurtosis et asymétrie = normalité des données, test post hoc de Kruskal Nemenyi = groupement	109
Tab_B 3 : Regroupement des statistiques descriptives et analytiques pour les STPE et STAE des trois sites (Kurtosis et asymétrie = normalité des données, test post hoc de Kruskal Nemenyi = groupement similaire). En gras sont les sites statistiquement similaires.....	109
Tab_B 4 : Shapiro teste pour la composition élémentaire et minéralogique.....	109
Tab_B 5 : Analyses statistiques effectuées sur la minéralogie dont la moyenne est inférieure à la limite de détection.	110

Tab_B 6 : Analyses statistiques effectuées sur la composition élémentaire dont la moyenne est inférieure à la limite de détection.	111
Fig_A 1 : Carte géologique de la vallée de Huab (en amont du site d'étude) (Duncan et al., 1989).	99
Fig_A 2 : Localisation due la région de Kaoko et du Damara Oregon (Goscombe et al., 2003).	100
Fig_A 3 : Localisation du bassin versant du Kuiseb (Grodek et al., 2013).....	101
Fig_A 4 : Image Google Earth. Capture d'écran prise le 10 février 2020. Date des Images satellitaires : a. 14/12/2018 ; b. 9/11/208 ; c. 19/01/2019 ; Localisation du transect (points GPS verts) en rapport avec le barrage du Delta du Omaruru ;.....	102
Fig_A 5 : Schéma du CESAM (Wang et al., 2011)	105
Fig_B 1 : Description de l'ARA N-FRM Sampler (Instruments ARA, 2017).....	106
Fig_B 2 : Description des pièges à sédiments de type BSNE. (Shao et al., 1993a)	107

Liste des sigles et abréviations

SNT	Échantillons de sols non tamisés (Sols Non Tamisés)
STP	Échantillons de sols tamisés < 63 µm (Sols Tamisés distribution Poussière (< 63 µm))
STS	Échantillons tamisés > 63 µm (Sol Tamisés distribution sol [> 63 µm])
STPE	Échantillons de sols composition élémentaire [Sols Tamisés distribution Poussière (< 63 µm) Élémentaire]
STPM	Échantillons de sols composition minéralogique [Sols Tamisés distribution Poussière (< 63 µm) Minéralogique]
STAE	Échantillons d'aérosols [donc échantillons STS mise en suspension dans le CESAM] composition élémentaire [Sols Tamisés distribution Aérosols composition Élémentaire]
STPC	Échantillons passés dans le <i>Multisizer 4^e – Coulter Counter</i> (Sol Tamisé distribution poussière Coulter)
Cl	Chlore
S	Soufre
Ca	Calcium
Fe	Fer
Na	Sodium
Mg	Magnesium
Al	Aluminium
Si	Silicium
P	Phosphore
K	Potassium
Ti	Titanium
Mn	Manganèse
V	Vanadium
Ni	Nickel

Remerciements

J'aimerais remercier en premier mon directeur de maîtrise James King qui m'a permis de devenir la chercheuse que je suis aujourd'hui, dans un environnement positif et enrichissant.

Merci à Philippe Gauvin-Bourdon d'avoir partagé une expérience de terrain inoubliable (oui je fais en partie référence au pneu crevé au milieu du désert ! Aussi aux paysages à couper le souffle). Merci à Marie-Pierre Bastien-Thibault de m'avoir aidé durant les analyses en laboratoire, ainsi qu'à tous mes collègues du laboratoire LÉÉ. Merci à l'Université de Montréal pour les bourses ainsi qu'à Mitacs de m'avoir offert l'opportunité d'effectuer un stage en à Créteil en France et assister à une conférence internationale. Les moments passés furent exceptionnellement enrichissants, en majeure partie grâce aux chercheurs que j'ai pu rencontrer.

Un énorme merci à ma famille qui m'a toujours encouragé à poursuivre ce qui me passionne, même si ce n'est pas toujours passionnant pour eux ! Cela s'applique aussi à tous mes amis de la communauté d'escalade qui m'ont entendu dire si souvent : « c'est bientôt fini » pendant 1 an... (62 !). Je termine cette expérience avec un grand sourire, énormément de reconnaissance et une passion encore plus grande qu'il y a trois ans.

« It is important to draw wisdom from many different places. If you take it from only one place, it becomes rigid and stale. Understanding others [...] will help you become whole » – Uncle Iroh

Introduction générale

Sous certaines conditions environnementales, telles qu'en milieu aride ou désertique, l'érosion éolienne peut entraîner l'émission d'une quantité importante de poussières minérales. Les aérosols ($< 20 \mu\text{m}$) peuvent être entraînés sur de grandes distances (ex. désert du Sahara jusqu'en Amazonie) (Swap et al., 1992), alors que les particules entre $20 \mu\text{m}$ et $60 \mu\text{m}$ peuvent se déplacer sur de relativement plus courtes distances (Shao, 2008). Les propriétés optiques, chimiques et physiques des particules de poussières sont donc changeantes et peuvent affecter l'environnement. Les impacts de ces changements ont des répercussions à la fois physiques et humaines (Tanaka and Chiba, 2006). En plus, la variation et l'intensité d'évènements perturbateurs peuvent engendrer des effets de rétroactions soit positives ou négatives selon la quantité et les propriétés des particules émises (France et al., 2013). Deux grands impacts sont reliés au transport de particules fines ($< 60 \mu\text{m}$) : l'alimentation potentielle des nutriments fournis par celles-ci (Bhattachan et al., 2016 ; Journet et al., 2008 ; Shao, 2008) et l'influence de l'absorption et la réflectance des particules sur la composition de l'atmosphère et son impact sur le bilan radiatif (Alfaro et al., 1998 ; Choobari et al., 2014 ; Kok et al., 2014 ; Myhre et al., 2013).

Les poussières minérales contribuent donc au forçage radiatif, dont l'absorption ou la diffusion par des aérosols dépendent de plusieurs facteurs, tels que la taille, la forme et le type de minéraux (Mahowald et al., 2014). Au final, les principaux effets physiques rattachés aux processus d'émissions constituent la modification de la composition atmosphérique, température, cycle hydrologique et la modification des patrons de vents (Hartmann et al., 2013). Une mauvaise compréhension de ces émissions et caractéristiques des aérosols mène ainsi à une incertitude plus large, dont l'importance de celle-ci varie particulièrement en fonction de la source (Figure 1).

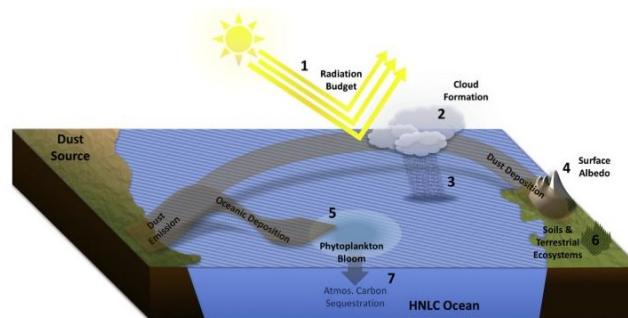


Figure 1 : Schéma identifiant les principaux effets perturbateurs, associés au transport des poussières (Marx et al., 2018). La poussière influence le réchauffement et le refroidissement de l'atmosphère, par son influence sur les échanges radiatifs, à la fois directe (1) et sur le développement des nuages, i.e. acteur de condensation de noyaux (2). Il y a donc aussi un impact sur les précipitations (3). Une autre influence significative de la poussière se situe au cours des périodes glaciaires où la réduction de l'albédo de la glace par la déposition des poussières accélérât le processus de fonte (4). La déposition de poussières fertiles des écosystèmes marins (5) et terrestres (6), en plus de la contribution à la formation du sol est aussi observée. Le rôle le plus significatif de la déposition des poussières en environnement marin se localise en régions de haute teneur en nutriments et faibles en chlorophylle.

La modélisation du climat peut ainsi mener à une meilleure compréhension de la répartition des poussières, mais les incertitudes quant au transport de celles-ci et les effets de rétroactions positives sont encore mal représentés (Figure 2).

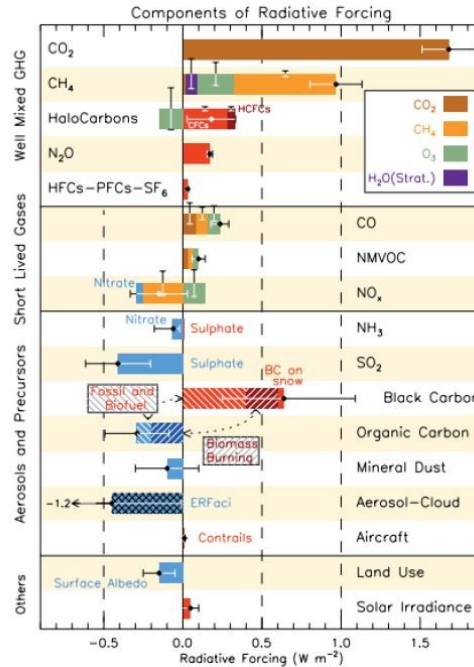


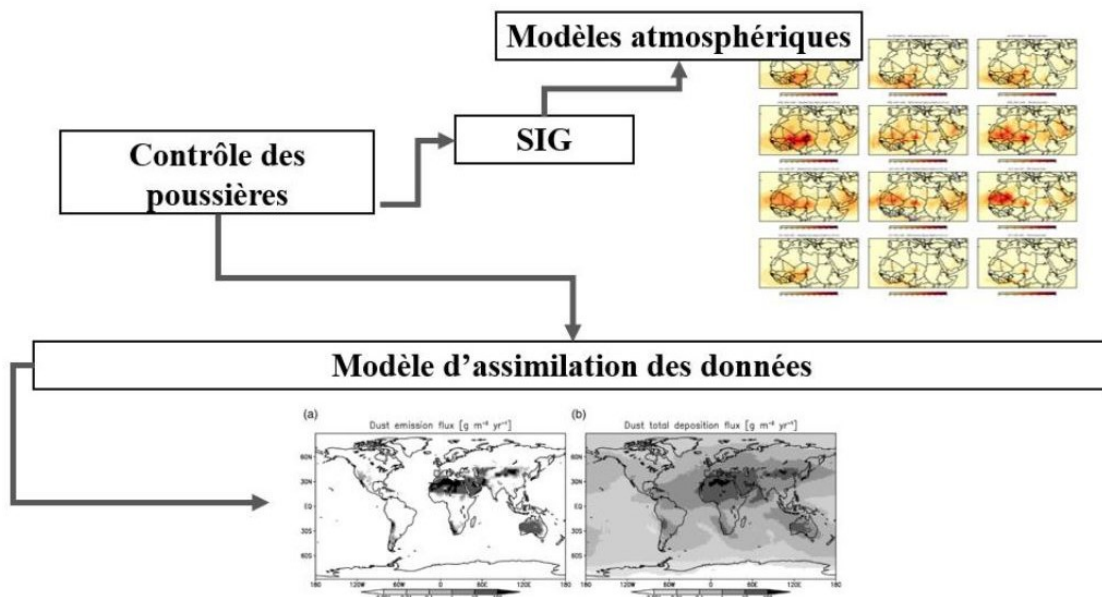
Figure 2 : Diagramme à bandes pour la période entre 1750-1002, basé sur les composantes (gazes, aérosols, et précurseurs d'aérosols) ou autres changements. Le forçage positif est indiqué en rouge, alors que le forçage négatif en bleu, utilisé pour les composantes émises qui affectent les agents de forçage. Plusieurs couleurs sont utilisées pour les éléments qui affectent les diverses composantes, ceux-ci sont indiqués au haut à droite du diagramme. La barre verticale indique l'incertitude relative du forçage radiatif induit pour chacun des composants. Leur longueur varie proportionnellement selon l'épaisseur de la bande, c'est-à-dire que la longueur totale égale l'épaisseur de la bande pour une incertitude de +/- 50%. L'impact net des éléments est indiqué par un symbole de diamant avec son incertitude (intervalle de confiance de 5 à 95 %), indiqué par la barre d'erreur horizontale. ERFaci est en raison de l'interaction nuage-aérosol. BC et CO sont coémis, particulièrement pour l'émission de la combustion de biomasse et pour une grande partie des émissions fossiles et du biocarburant. (Myhre et al., 2013)

L'atmosphère est un système ouvert, donc grandement impacté par des facteurs endogènes. Puisque la poussière est majoritairement transportée dans l'atmosphère, il est difficile d'évaluer l'importance de cet apport lorsque déposé dans les environnements terrestres et/ou les environnements aquatiques. L'amélioration des connaissances des potentielles sources d'émission peut ainsi accroître la compréhension du cycle de poussières, donc l'apport en nutriments. Constituées de rivières éphémères, certaines vallées de la Namibie fournissent un apport potentiellement riche en fer, phosphore et azote au courant froid océanique de Benguela (Dansie et al., 2017). Le Huab, le Omaruru et le Kuiseb fournissent une fonction essentielle aux écosystèmes marins pour la production de phytoplancton (Martin and Fitzwater, 1988), tel qu'observé lors de la déposition de fer ferreux (sous forme soluble) dans les plans d'eau (Bhattachan et al., 2016). La côte de la Namibie est sujette à différentes sources et directions de vents, dont trois types

influencent la côte : le premier provenant de l'ouest du continent, le deuxième de l'océan Atlantique, puis le dernier provenant du sud (Tyson et al., 1996). Puisque ceux-ci engendrent un effet sur le long de la côte d'Angola, d'Afrique du Sud et de la Namibie, ils modifient l'apport en nutriments le long du courant de Benguela. La variation du climat en zone désertique produit une mobilisation et une redistribution des nutriments de sédiments fins dans l'atmosphère (Prospero et al., 2002). En considérant l'importance des dépôts aux ressources halieutiques et terrestres (Jickells et al., 2005), les connaissances quant aux mécanismes et la caractérisation des zones d'émissions qui entraînent la redistribution des nutriments doivent être améliorées.

À l'échelle globale et lorsque retrouvé dans la basse atmosphère, l'érosion par le vent est le principal émetteur de poussières et peut se transporter sur de grandes distances (Figure 3). La modélisation de ce phénomène peut s'avérer complexe, en raison de nombreux paramètres qui doivent être bien analysés et interprétés (conditions météorologiques, sources d'émissions, etc.) sur une échelle spatiale et temporelle. Cette méthode permet toutefois une combinaison de plusieurs composantes environnementales impactant le transport des poussières. Il est ainsi possible de visualiser les grands patrons de transport, selon des paramètres et hypothèses prédéterminés. Pour ce faire, il est nécessaire d'obtenir une compréhension adéquate des concepts fondamentaux et une surveillance du déplacement des poussières. Cette analyse est rendue possible au travers l'utilisation de divers instruments (Figure 3).

Figure 3 : Schéma des étapes de modélisation du transport de poussière. L'image à droite du titre « Modèles atmosphériques » présente la modélisation de poussières selon différents indices. Les panneaux de gauche présentent le modèle AOD (profondeur optique des aérosols), celui du milieu l'instrument MISR (spectroradiomètre d'Imagerie à multiangle) AOD et celui de droite l'indice d'aérosols pour Janvier à Mars (JFM), d'avril à juin (AMI), de juillet à septembre (JAS) et d'octobre à décembre (OND) en 2006. (Pérez et al., 2011; Shao, 2008; Tanaka and Chiba, 2006). L'image au-dessous du titre « Modèle d'assimilation des données » présente une simulation moyenne annuelle des émissions de poussières (a) et de la déposition totale (b).



L'étude du transport des poussières combine plusieurs types de données (Shao, 2008), par exemple : la télédétection par satellite (p. ex. Modis, MISR, Landsat), les réseaux synoptiques (p. ex. patrons de vents), les réseaux Lidar¹, le contrôle des poussières (p. ex. trappes à sédiments et les stations météorologiques).

La télédétection et les réseaux synoptiques offrent l'avantage d'obtenir une compréhension globale des grands déplacements et réseaux de transport, mais s'avèrent moins précis pour étudier le comportement des vents et déplacements de poussières à l'échelle régionale. En effet, le Lidar et le contrôle des poussières permettent une meilleure compréhension des phénomènes locaux. D'un autre côté, ces derniers requièrent une plus grande gestion et il n'est pas toujours possible d'obtenir ce type de données, puisqu'il doit y avoir des instruments connectés sur le site d'étude lors des événements de transport (Shao, 2008). Ainsi, si les données ne représentent pas les points d'émissions du site d'étude, ou qu'il y a une quantité de données insuffisantes, de grandes incertitudes peuvent se retrouver au sein du modèle.

¹ Télédétection par émission de lumière d'un laser.

Chapitre 1: Cadre théorique

1.1: Problématique et hypothèses

L'étude du déplacement des particules en Namibie transportées sur le long terme a déjà été abordée par certains chercheurs à l'aide d'images satellitaires (Geological Survey of Namibia, 2002; Von-Holdt et al., 2017). Lors de grands événements météorologiques, tels que la formation de panaches de poussières, les particules sont mobilisées et mises en suspension, puis déplacées par un vent sec continental (Vickery et al., 2013). Combiné aux données météorologiques, il est donc possible d'étudier la relation entre celles-ci et les émissions globales (Gassó and Stein, 2007). Interprétés au travers d'images Landsat² (Von-Holdt et al., 2017), ces résultats démontrent, à l'échelle du paysage, l'intérêt d'étudier les vallées. Les principaux émetteurs sont le Kuiseb, le Omaruru et le Huab (Figure 4 -Figure 5) (Von-Holdt et al., 2017).

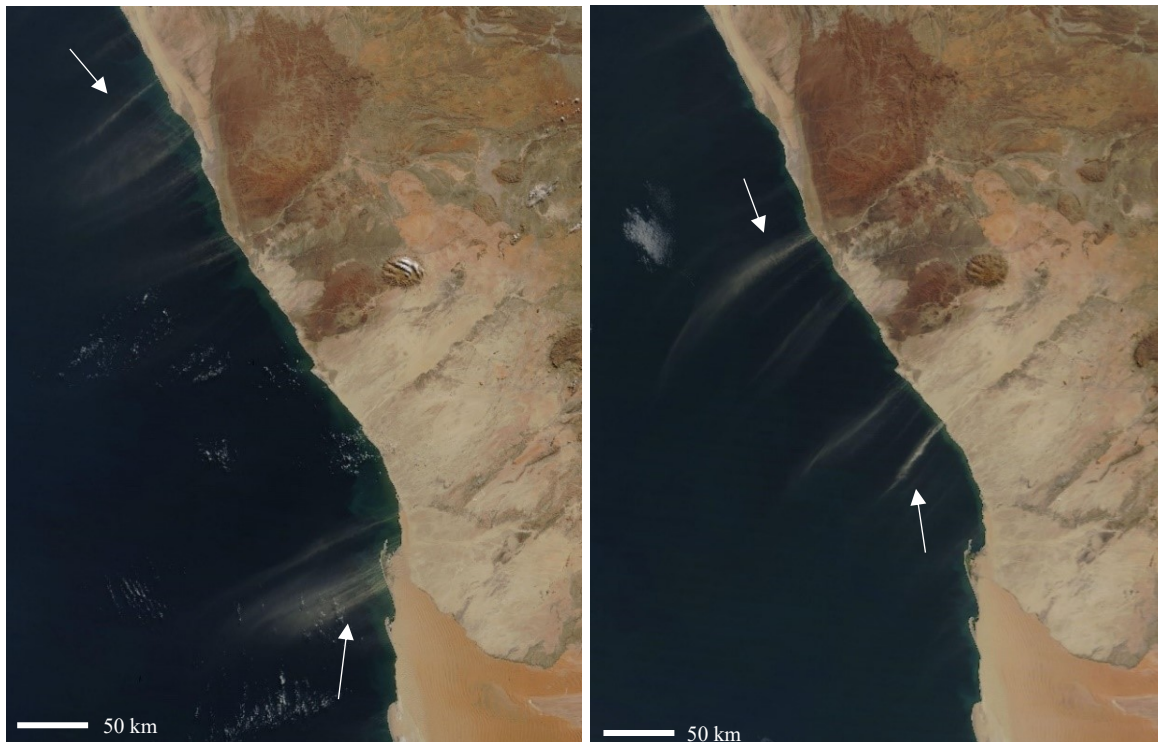


Figure 4 : Exemple d'images où il y a une grande mobilisation de sédiments dans l'atmosphère. Les flèches indiquent certains panaches de poussières.

A. Image Worldview NASA 06/07/2018

B. Image Worldview NASA 29/07/2017

² Satellites servant à capturer des images multispectrales de la Terre.

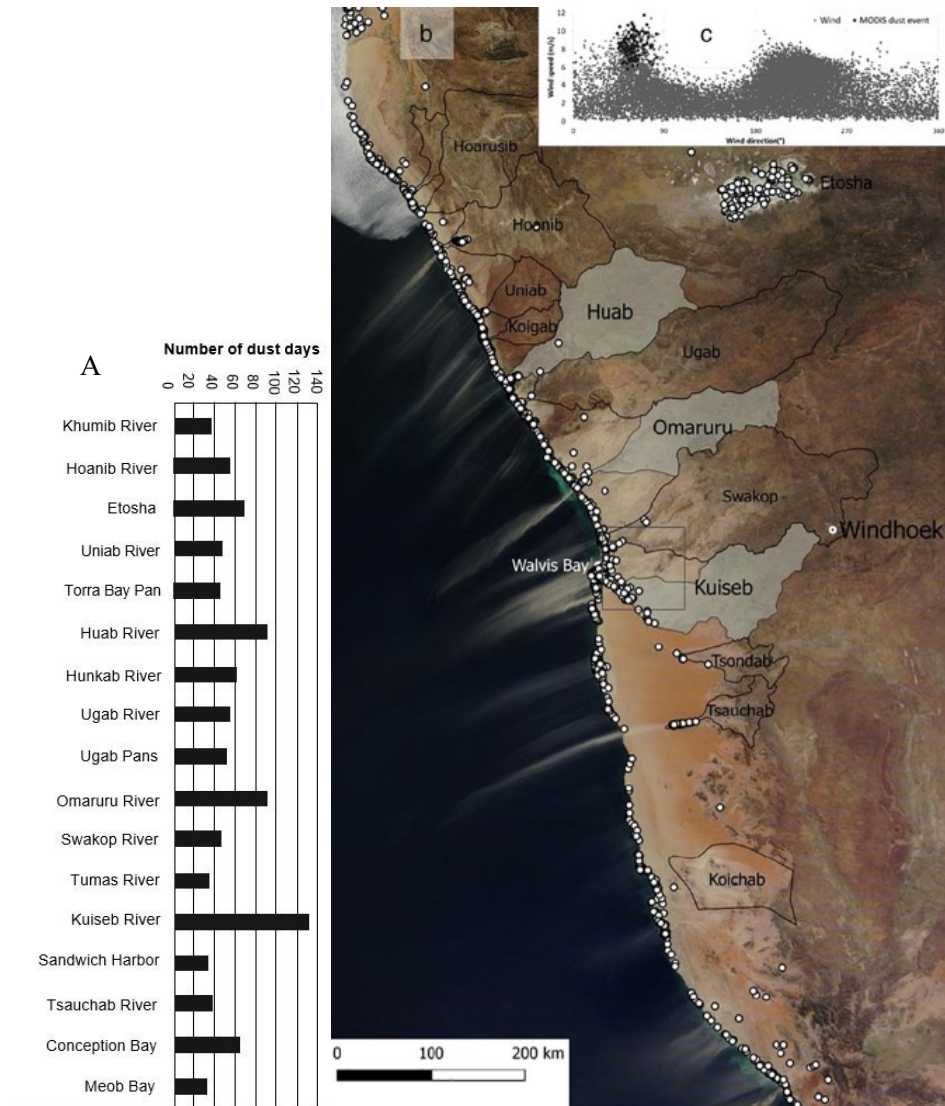


Figure 5 : a. Identification des bassins émetteurs (Image Landsat), selon le nombre de jours où il y a un évènement d'émission. b. Représentation des émissions des bassins. c. Identification des évènements de transport selon les mesures pris par MODIS (Von-Holdt et al., 2017).

Couplée à cette analyse, une station AERONET (Figure 6) se localise à l'exutoire de la vallée de Omaruru. Les stations AERONET sont rattachées à une fédération, dont l'objectif vise à mesurer les propriétés optiques à l'aide de stations de télédétection présente sur l'ensemble du globe. Cette station *in situ* sert donc à évaluer les modèles d'émissions globales (Figure 6), au travers diverses mesures des conditions atmosphériques, afin de comparer les données satellitaires situées à une échelle plus globale. À noter toutefois qu'il n'y a qu'une station présente en région côtière, située à l'exutoire de la vallée du Omaruru.

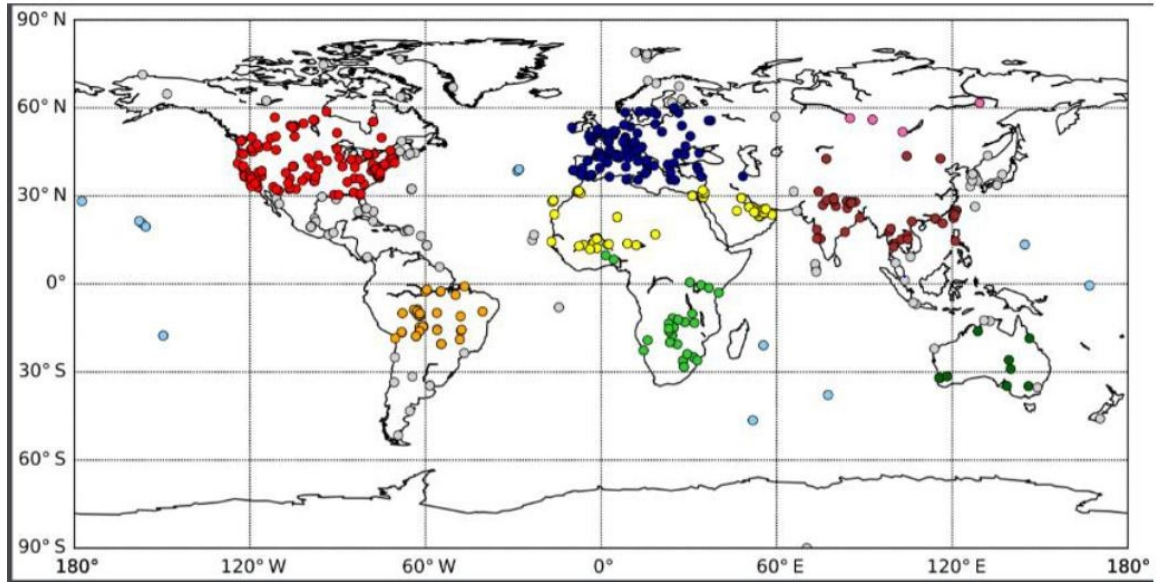


Figure 6 : Localisation des stations AERONET (Tegen et al., 2019). Toutes les stations sont regroupées selon un code de couleur dans lequel ils se situent : Rouge : Amérique du Nord ; Bleu : Europe ; Brun : Asie de l'est ; Rose : Sibérie ; Jaune : Nord de l'Afrique ; Vert : Afrique du Sud ; Orange : Sud de l'Amérique ; Vert foncé : Australie ; Bleu pâle : Régions océaniques ; Gris : Autres (Environnement côtier et mixte).

Les Figure 4 et Figure 5 permettent d'observer quelques événements de transports de poussière allant principalement d'est en ouest vers l'Océan. À l'échelle plus fine, les données de stations météorologiques installées en 2013-2017 et 2018 illustrent l'importance potentielle des vents provenant du sud (Figure 5), les particules de poussières provenant des vents frais du sud se retrouvent absentes des imageries s (Figure 7). Rattaché à l'influence des trois différentes sources de vents et les données de terrain, cela mène à une remise en question de l'interaction et la distribution des nutriments en milieux côtiers.

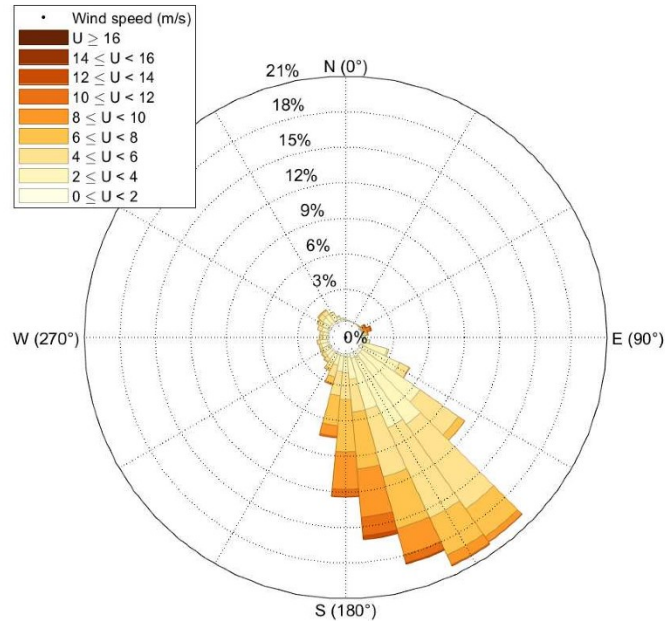


Figure 7 : Rose des vents (hiver 2013) présentant la distribution de la vitesse des vents (U - m/s) selon la direction, pour une station météorologique de haut de vallée, le long de la vallée du Huab (créé par : Philippe Gauvin-Bourdon).

Il est donc possible que les vents provenant de l'Est ne permettent pas d'expliquer intégralement la distribution des nutriments en milieu côtier de la Namibie. Les trois rivières émettant d'importants panaches de poussières sont les suivants : Huab, Omaruru et le Kuiseb (Figure 5 -Figure 7). Dans cette optique, il est nécessaire d'obtenir des données sur les sources d'émissions à long terme qui se déposent dans les rivières éphémères, mais aussi les sédiments potentiels qui pourraient être mis en suspension. Cela a pour but d'améliorer les connaissances du site afin d'améliorer la compréhension du déplacement des particules et de l'environnement des sources d'émissions. Ainsi l'objectif du mémoire vise à étudier ces interactions entre les caractéristiques atmosphériques et compositions du sol qui influencent les processus d'érosion éolienne, donc la perte et redistribution des nutriments des aérosols émis. Basées sur cet objectif, quatre hypothèses sont formulées :

1. La distribution en taille des particules des sols et aérosols varie significativement selon les trois sites ;
2. La composition élémentaire et minéralogique des sols et aérosols ne varie pas significativement entre les sites ;
3. Les émetteurs importants des données de terrain, c'est-à-dire ceux dont la quantité de particules potentiellement émises dans l'atmosphère ($< 20 \mu\text{m}$) diffèrent des sources d'émissions détectées par imagerie Landsat (Von-Holdt et al., 2017).

4. La composition élémentaire et minéralogie varient significativement des données globales enregistrées pour la surface terrestre ;

Localisé en Namibie, le projet présenté cherche à répondre aux hypothèses ci-dessus, à l'aide de questionnements reliés aux processus éoliens étudiés : quelle est la distribution en taille et composition élémentaire des poussières émises en région côtière ? Quels sont les processus potentiels d'érosion responsables du déplacement des poussières minérales ? Y a-t-il une homogénéité des poussières minérales entre les vallées de la Namibie ? Y a-t-il une variation entre le sol, le matériel parental et les poussières potentiellement émises par ce dernier ? Pour répondre à ces hypothèses et questionnements, il est nécessaire de posséder une compréhension adéquate du milieu : identification des sources d'émission, quantification du transport et qualification des minéraux et de leur composition élémentaire, etc. Divisé en 4 sections, ce chapitre tentera d'éclaircir ces concepts, basés sur les sujets suivants : 1.2:Géologie et géomorphologie côtière, 1.3:Circulation atmosphérique, 1.4: Patrons d'émission, 1.5: Dynamique des particules, 1.6: Chimie et minéralogie des poussières.

Si les connaissances scientifiques actuelles permettent de répondre à certains questionnements émis au-dessus, quelques lacunes seront identifiées et présentées au long de ce mémoire. Ainsi le deuxième chapitre se veut un cadre théorique sur les connaissances scientifiques actuelles et le troisième chapitre résumera la méthodologie de toutes les analyses effectuées. Le quatrième constitue l'analyse et la discussion sur ces résultats, en rapport avec les connaissances actuelles.

Une des particularités de la Namibie se constitue de nombreux bassins versants, constitués de rivières éphémères, dont certaines se déversent dans l'océan Atlantique. La topographie peut impacter les sources d'émissions et le trajet que peuvent parcourir les tempêtes de poussières. La diversité géologique, géomorphologique et les patrons de circulation atmosphérique peuvent influencer la taille et le type de particules qui seront déplacées (Gutiérrez and Gutiérrez, 2014). Ainsi, la fréquence, l'intensité et la durée des événements varient spatialement le long de la côte (Von-Holdt et al., 2017). Pour la saison d'été, la Namibie est sujette à des conditions plus chaudes et des précipitations plus élevées, fournissant un apport en sédiments le long des rivières éphémères. À l'hiver, les précipitations et températures diminuent dont la variation des patrons de circulations atmosphériques entraîne un transport plus important des particules de fine taille (Eckardt et al., 2002). Il est donc important d'approfondir en premier les connaissances reliées à la géologie et géomorphologie côtière, ainsi que la circulation atmosphérique et la dynamique des particules, puisqu'ils sont les acteurs principaux reliés au transport de particules (Shao, 2008).

1.2: Géologie et géomorphologie côtière

La région côtière a subi d'importantes modifications géomorphologiques au cours des derniers millions d'années, créant une mosaïque particulière le long de la côte (Figure 9). Considérée comme le plus vieux désert au monde (Migoñ, 2010), la présence plus importante du courant froid océanique Benguela (entre 7 Ma et 10 Ma) à l'époque du Miocène (Goudie and Eckardt, 1999; Siesser, 1980) a grandement favorisé l'implantation de conditions semi-arides. En effet, s'étendant au sud du continent africain jusqu'aux abords de la Namibie, ce courant froid a pour conséquence une réduction des événements de précipitations en zone côtière et un apport riche en nutriments (Gutiérrez and Gutiérrez, 2014). Si les données paléologiques du quaternaire restent encore parcellaires, il est évident que la tectonique des plaques est un facteur majeur quant à la formation géologique et les conditions climatiques actuelles (Gutiérrez and Gutiérrez, 2014). Plusieurs événements (Figure 8) engendrent des différences géologiques observées à la Figure 9, où les plus vieilles roches sont principalement composées de roches méta sédiments, métas volcaniques et génisse granitique (Jacob et al., 1978).

Après la création des premières roches ainsi que la formation d'un complexe métamorphique, des événements tectoniques, entrecoupés par la déposition de sédimentaire, ont perturbé le paysage nord-ouest de la Namibie (Goudie and Eckardt, 1999). Vers 145 AP il y a eu séparation du continent Gondwana-Land Est. Cette région fut remodelée par l'étalement du fond marin, ainsi que la formation de points chauds et panaches de poussières, en raison des conditions plus arides. Cela engendre une modification de la section nord-ouest de la Namibie, dont la formation du complexe igné de Damara, principalement composé de granites, génisses, schistes, marbre, migmatites et amphibolites (Goudie and Viles, 2015). Ce sera le « Kalahari group », dont la datation reste encore incertaine (entre l'holocène et le pléistocène), qui fournira un grand apport en sable engendré par des conditions semi-arides dans un environnement plat (Eitel et al., 2001). Lors de la période du quaternaire les bassins versants seront constitués de rivières éphémères, en raison des périodes interglaciaires provoquant des conditions plus arides en Afrique (Rogers and Rau, 2006). La topographie et la répartition des divers types de roches de la Namibie sont donc modelées par l'évolution des divers complexes géologiques. La topographie influence la direction des vents, alors que le type de minéraux influence la distance parcourue des sédiments. Une connaissance historique des complexes géologiques améliore ainsi la compréhension de l'environnement qui influence les processus d'érosion, transport et déposition des sédiments. La comparaison entre la Figure 8 et la Figure 9 ne permettent toutefois pas d'expliquer à elles seules la source des événements de transport.

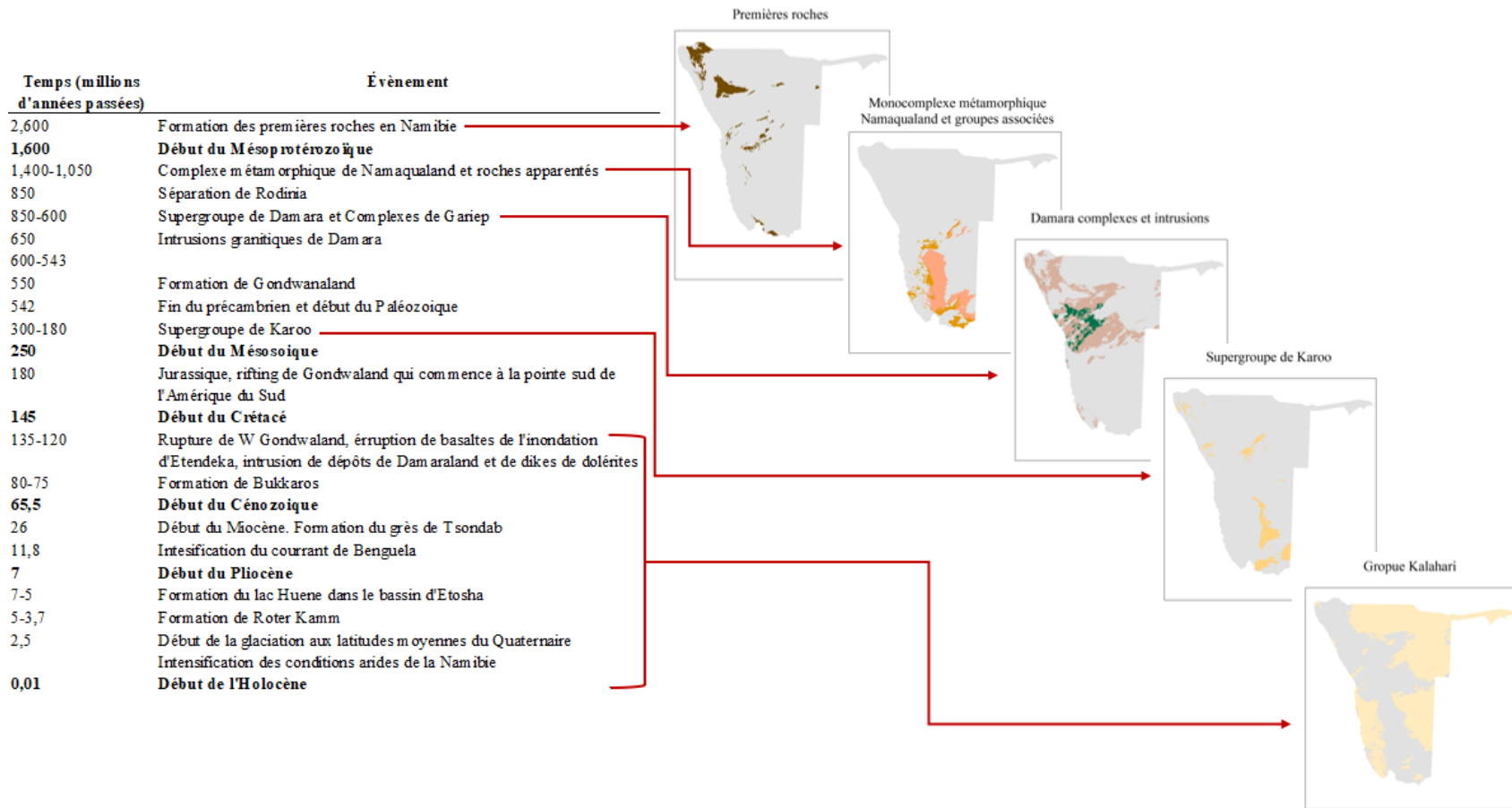


Figure 8 : Histoire géologique de la Namibie (Goudie and Viles, 2015) selon une échelle de temps de millions d'années passées. Les divisions géologiques majeures sont associées à leur temps respectif (ACACIA Projet E1, 2002).

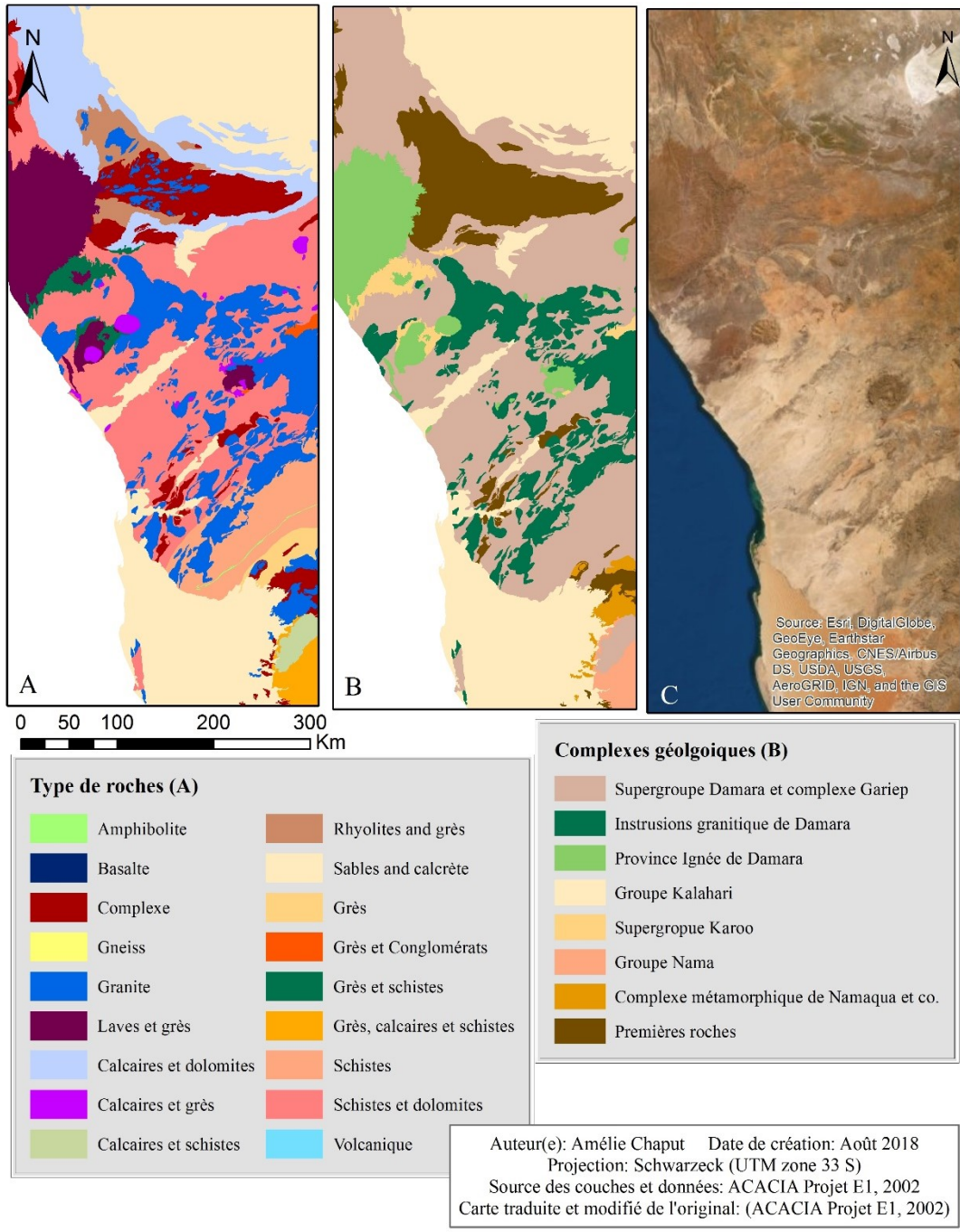


Figure 9 : a. Carte géologique des types de roches de la Namibie. b. Carte géologique des complexes de la Namibie. c. Représentation d'imagerie satellitaire de la région de la Namibie.

1.3: Circulation atmosphérique

Ce chapitre vise à évaluer l'influence des vents sur le processus de déplacement des particules, il se divise en quatre sections : 1.3.1: Patrons de circulation, 1.3.2: Systèmes anticyclones, 1.3.3: Dépression hivernale, 1.3.4: Zone de convergence tempérée tropicale .

1.3.1: Patrons de circulation

Les patrons de circulations sont un élément clé à l'initiation du déplacement puisqu'ils contrôlent plusieurs variables déclencheurs : intensité, direction et fréquence de grands vents (Carslaw et al., 2010). L'été est caractérisé par des températures et précipitations plus élevées, alors qu'à l'hiver, les conditions sont plus froides et sèches (Figure 10). Relatif aux patrons de circulation globaux, la Namibie se retrouve principalement influencée par une zone de haute pression subtropicale, ainsi qu'une zone de convergence intertropicale (Figure 5 - Figure 11) (Mendelsohn et al., 2002). Les vents d'alizé, situés en zone de haute pression, se dirigent du sud-est jusqu'au sud-ouest et s'étendent de l'équateur vers la Namibie (Ahrens, 2003).

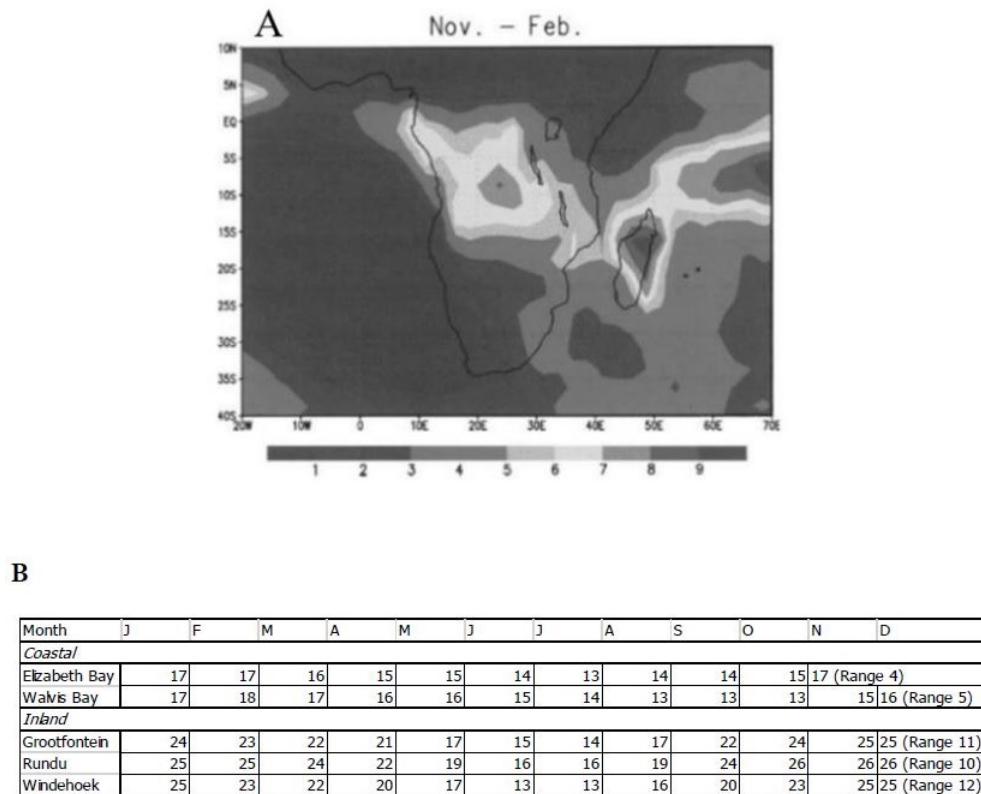


Figure 10 : A. Ratio moyen des précipitations (mm day-1) pour les mois de novembre à février (1979-1995) (Todd and Washington, 1999). B. Moyenne des températures (°C) selon certaines stations météorologiques (Goudie and Viles, 2015).

Trois patrons de circulation des vents sont toutefois observés à l'échelle régionale (Goudie and Viles, 2015) :

- 1) Deux systèmes anticyclones : au sud de l'Atlantique (courant d'air froid sur le continent) particulièrement en hiver, puis dans la région centre du continent (air sec) (Figure 11) ;
- 2) Dépression hivernale provenant du sud en hiver, menant à une pénétration des vents frais du sud vers le nord (Figure 11) ;
- 3) Zone de convergence tempérée tropicale (TTT) vers le nord en été (novembre à février) (Figure 10). Cette zone est caractérisée par une large bande de nuages couvrant le continent (Harrison, 1984), causant une augmentation des précipitations à l'intérieur du continent. La variation saisonnière de cette zone de convergence affecte ainsi le continent africain : au début de l'été, il y a une forte présence d'un couvert nuageux entre le sud-ouest de l'océan Indien jusqu'au sud-ouest de l'Océan Atlantique. Vers la fin de l'été, il y a un déplacement vers le sud-ouest de l'océan indien (Washington and Todd, 1999), laissant place à des conditions plus sèches sur l'ensemble du continent par l'influence permanente du système anticyclone allant du sud-est au nord-ouest ;

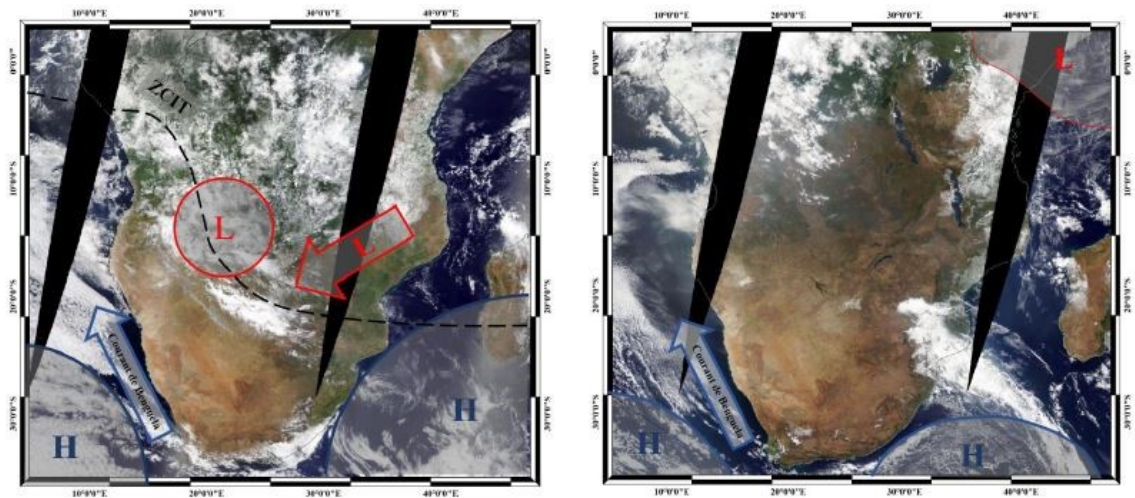


Figure 11 : Images MODIS modifiées (NASA, 2018). a. Patrons de circulations (3 décembre 2017). b. Patrons de circulation (3 juillet 2018). Basse pression (L) et haute pression (H), et zone de convergence intertropicale (ZCIT) indiquées.

1.3.2: Systèmes anticyclones

Tel qu'observé à la Figure 11, la Namibie se localise entre une masse d'air sec situé en zone continentale à l'Est du pays, se dirigeant d'est en ouest et de l'air froid provenant de l'océan Atlantique, dont l'effet influence la zone côtière. L'interaction entre ces deux systèmes varie selon les conditions météorologiques, ce qui a pour conséquence d'influencer le caractère des vents locaux de la zone d'étude (Eckardt et al., 2002).

1.3.3: Dépression hivernale

Puisque les températures diminuent en région sud-africaine, une dépression située en Afrique du Sud mène à l'apport d'un air plus froid du sud vers le nord. Ce courant affecte particulièrement la région côtière et très peu à l'intérieur du continent, en raison de la topographie du site dont l'élévation peut empêcher ces vents de pénétrer dans les vallées (Tyson et al., 1996).

1.3.4: Zone de convergence tempérée tropicale

Une variation inter annuel est présente, modifiant ainsi les patrons de précipitations en zone sud-africaine. Les mois de novembre à février reçoivent une quantité plus importante de précipitations, en raison de la bande de nuages qui traversent le continent, alors qu'à l'hiver, très peu de précipitations sont observées (Todd and Washington, 1999). La Namibie est sujette à cette variation inter annuelle en raison de la modification des patrons climatiques entre les mois de novembre à février (Figure 10). Ces masses d'air résultent d'une combinaison entre un courant d'air froid appelé zone de convergence intertropicale (ZCIT) et l'influence de la traverse tempérée tropicale (TTT). La ZCIT est située à 20 S durant l'été de l'hémisphère sud, alors que la TTT est située au sud-ouest du continent africain (Todd and Washington, 1999). Par ailleurs, la topographie du site qui est plus plane que ses environs et les conditions de pression océanique se stabilisent. Cela a pour effet d'augmenter les précipitations et réduire les températures (Figure 10 et Figure 11) au centre de la Namibie, ainsi que les pays avoisinants.

1.4: Patrons d'émission

Les émissions de poussières en zone côtière se génèrent principalement entre le mois de mai à septembre, dont deux pics plus importants au mois de juin et au mois d'août. Diverses sources provenant des lacs salés et rivières de la Namibie favorisent actuellement la mise en suspension des particules (Eckardt et al., 2002), telle qu'observée à la Figure 12.

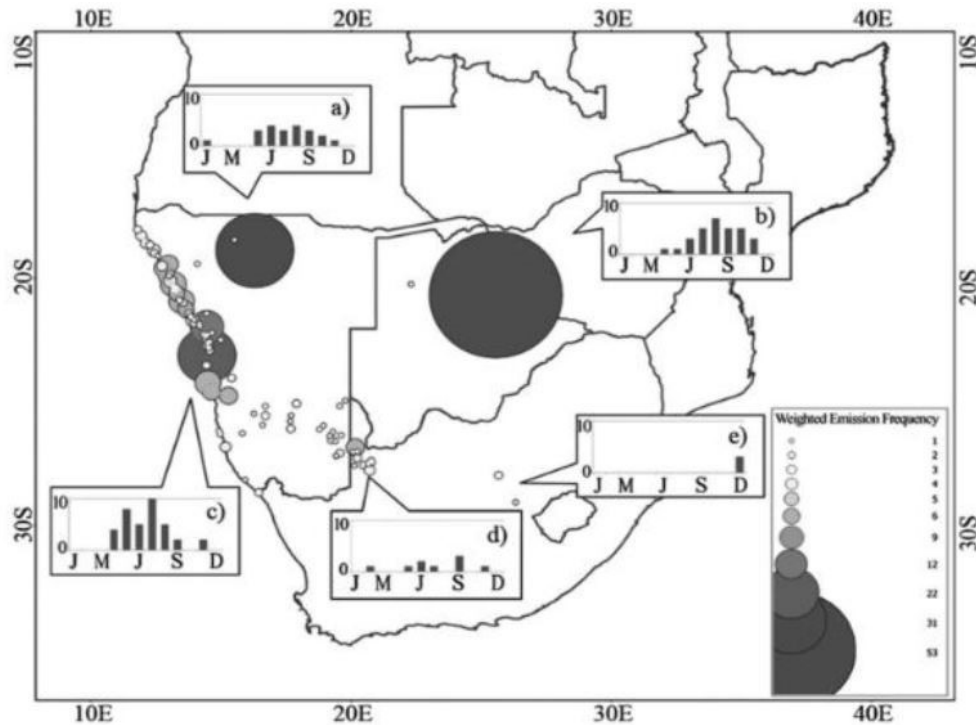


Figure 12 : Zone d'émissions de panaches de poussière au sud d'Afrique. (a) Bassin d'Etosha (b) bassin de Makgadikgadi (c) Sources de la côte de la Namibie (d) Sources du sud de l'ouest Kahlari (e) Sources d'États libres. Les cercles indiquent la fréquence pondérée du nombre panaches de poussière. Les diagrammes à bande indiquent le nombre de jours où il y a eu détection de panaches de poussières. La région côtière de la Namibie émet de manière plus importante entre les mois de juin et août (Vickery et al., 2013).

En région côtière, le potentiel de mise en suspension est fortement relié aux grands évènements d'inondations à l'été, puisqu'ils fournissent une importante source de sédiments aux abords des rivières (Dansie et al., 2017). Ces rivières éphémères représentent des sources majeures de poussières, en raison de la configuration des chenaux et une élévation plus décroissante du centre vers la côte. En effet, l'élévation de l'exutoire de ces bassins diminue contrairement au centre du pays, lesquels permettent une accumulation et redistribution efficace des sédiments par le vent (Gutiérrez and Gutiérrez, 2014). La dynamique entre déposition et remise en suspension des particules est donc fortement dictée par les bassins bordant la région côtière, alors que la quantification et l'émission réelle des sédiments varient en fonction des évènements de vents importants (Figure 12 et Figure 13).

Bassins versants en zone côtière de la Namibie

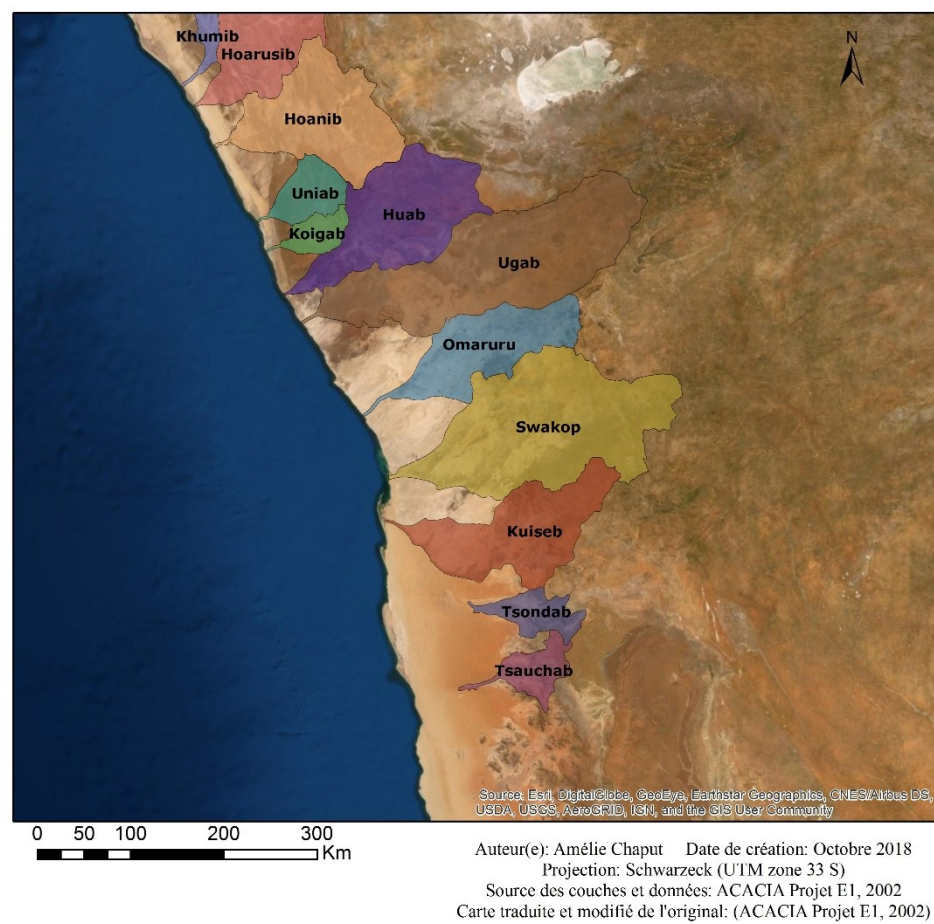


Figure 13 Carte des bassins versants en région côtière de la Namibie.

1.5: Dynamique des particules

Cette section permet de mettre en relation les données et caractéristiques du site avec les informations théoriques des variables et mécanismes responsables du transport des particules. L'analyse du seuil de transport des particules reste un concept essentiel, puisqu'elle définit les paramètres de mise en saltation ou suspension des particules. Cela mène à une meilleure compréhension des variables influençant l'initiation du mouvement et la distance parcourue par les particules (Shao, 2008). Ce chapitre sera donc divisé en trois sections : 1.5.1:Initiation du mouvement, 1.5.2:Déplacement des particules, 1.5.3:Facteurs d'émissions et de déposition des sédiments.

1.5.1: Initiation du mouvement

Le déplacement des particules se produit lorsque la contrainte de cisaillement critique (U_{*t}) dépasse les forces résistantes (U_t) (Bagnold, 1941). La Figure 14 représente les différentes forces applicables sur la particule de sédiment, c'est-à-dire la force de gravité, le coefficient de traînée, la force de soulèvement et la force d'entraînement du fluide, ces derniers constituent les principaux facteurs agissant sur le déplacement.

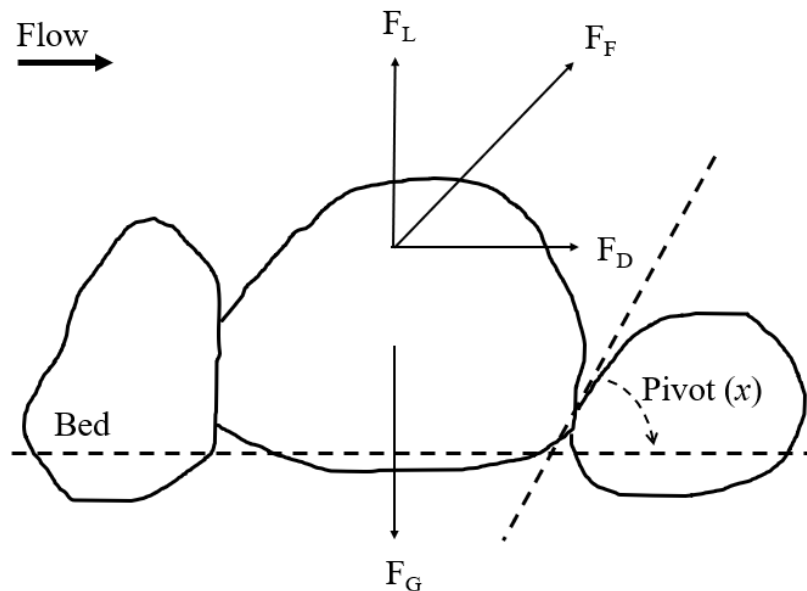


Figure 14 : Forces exercées sur une particule : F_L , F_F , F_D , F_G . Correspondant respectivement à la force de soulèvement, la force de traînée, la force d'entraînement puis la force de gravité (Ellis and Sherman, 2013).

Considéré comme un pionnier dans l'étude du mouvement des particules, en 1941 Bagnold proposa un rapport entre la contrainte de cisaillement (U_{*t}) et la taille des particules, permettant de décrire l'initiation du mouvement de particules par le vent, selon son environnement (Bagnold, 1941). Ces composantes sont traduites sous forme d'une équation, puis modifiées par plusieurs

chercheurs (Barchyn and Hugenholtz, 2011; Kok et al., 2012; Lu and Shao, 2001). L'équation fut modifiée en raison de facteurs qui ne sont pas considérés par Bagnold, mais qui influencent le déplacement des particules. L'équation de Bagnold est décrite ci-dessous, où v = volume, P_a = densité de l'air, P_p = Densité de la particule, g = gravité, d = diamètre de la particule.

$$u_{*c} = \gamma \sqrt{\frac{\rho_p - \rho_a}{\rho_a} g d} \quad (1)$$

Théoriquement, l'équation de Prandtl-von Kármán permet de calculer la vitesse du vent en ayant connaissance du profil de vent (eq.2), où k = constante de von Kármán (généralement 0.4), U = Vitesse du vent mesuré à hauteur z , au-dessus du sol (m/s), z_0 = La hauteur à laquelle la vitesse = 0 (m), u_* = Vitesse de cisaillement (m/s).

$$u_* = \frac{kU}{\log_n(z/z_0)} \quad (2)$$

En pratique il est donc possible d'obtenir le z_0 en appliquant une courbe aux vitesses de vent à différentes hauteurs logarithmiques, selon les données récoltées sur le terrain (Figure 15).

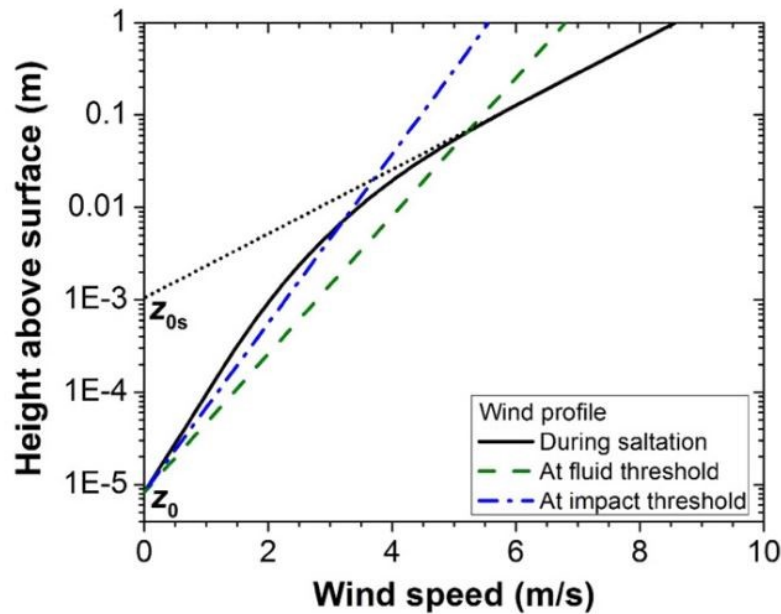


Figure 15 : Profil de vitesse du vent au seuil du fluide (ligne verte), impact du seuil (ligne bleue) et lors de la saltation (ligne noire). Simulation par COMSALT (Kok et al., 2012; Kok and Renno, 2009). La longueur de rugosité aérodynamique (Z_0) lors de la saltation est aussi observée.

Afin de mettre en relation la notion avec les caractéristiques du fluide à l'étude, l'équation suivante s'avère efficace pour des mesures théoriques ou en laboratoire dans un environnement

contrôlé où F = Force appliquée (N), A = Aire de surface projetée (m^2), ρ = Densité du fluide (kg/m^3), τ = contrainte de cisaillement (Pa).

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad \text{où} \quad \tau = \frac{F}{A} \quad (3)$$

Associé à la force de déplacement, la contrainte de cisaillement critique (U_{*t}) intègre les forces résistantes et entraînant, déterminant ainsi la limite de mise en transport d'une particule dans le fluide μ_{*t} = Vitesse limite du fluide) (Pye, 1987). Où : σ =densité du grain ($kg m^3$), g = Accélération ($9,80655 m/s^2$), ρ = densité de l'air ($1,22 kg/m^3$), D = diamètre de la particule (m), A = Nombre de Reynolds ($Re= u_*D/v$, où v = viscosité cinématique).

$$\mu_{*t} = A \left(\frac{\sigma - \rho}{\rho} * g * D \right)^{1/2} \quad (4)$$

Dans cette étude, la taille des particules fournit une partie de l'information sur les variables théoriques afin d'analyser le déplacement des particules. Ceux-ci peuvent éventuellement être comparés et/ou couplés aux variables obtenues sur les sites d'étude. Les variables telles que la vitesse du vent et la pression sont calculées à l'aide de stations météorologiques installées sur les sites à l'étude en temps réel.

1.5.2: Déplacement des particules

Une fois le déplacement des particules initié, il est possible d'associer la taille des particules selon un type de déplacement de particules :

- 1) Glissement de surface ;
- 2) Saltation ;
- 3) Suspension ;

Le temps de transport varie donc premièrement en fonction de la taille, puis en fonction de facteurs environnementaux autres (composition, caractère des vents, etc.). Lorsque situé entre 20 et ~70 μm , il sera question de poussières qui se transportent sur une courte distance (quelques mètres à quelques kilomètres). Lorsqu'il est question de particules $< 20 \mu m$, il sera question d'aérosols, puisqu'elles peuvent parcourir de longues distances et se retrouver dans l'atmosphère (Figure 16). Plusieurs chercheurs (Kok et al., 2012 ; Shao, 2008) ont toutefois adopté certains changements pour les variables de l'équation (4), en partie du fait que l'effet de cohésion entre les sédiments (humidité, forces de Van der Waals et charges électrostatiques, non-sphéricité des particules, etc.) doivent être considérés, particulièrement pour les sédiments inférieurs à 80 μm

(Pye, 1987). Il est donc possible d'observer une sous-estimation théorique de l'émission de poussières au-dessus de 10 μm (Ginoux, 2003), puisque les effets non considérés auront tendance à accentuer le potentiel de déplacement des particules.

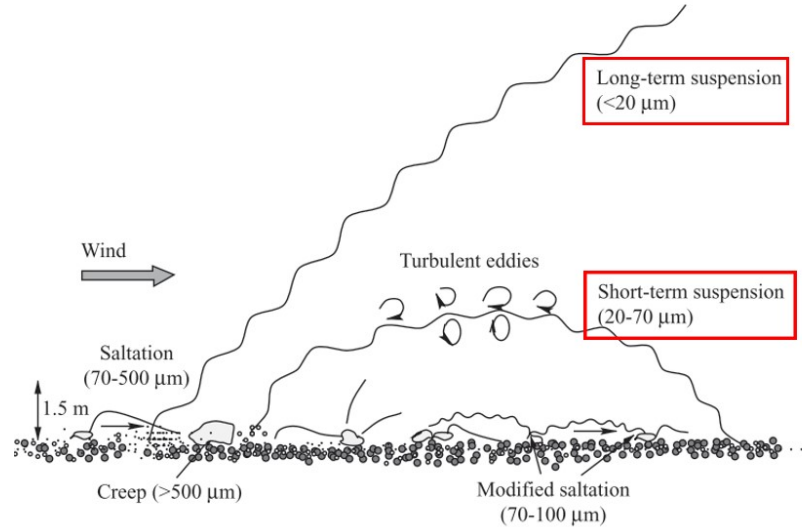


Figure 16 : Illustration du glissement, de la saltation et suspension des particules de sol durant un évènement d'érosion. Saltation est classifié entre saltation pure et modifiée est divisé entre la suspension à court et long terme. Transport des particules en fonction de leur taille. (Shao, 2008). En rouge sont les tailles/processus étudiées pour ce projet.

En qui concerne les particules de poussières, le déplacement s'effectue par la mise en suspension (Figure 16) permettant ainsi un transport sur de grandes distances. Le comportement des particules varie selon le processus de mise en suspension, c'est-à-dire entre le bombardement des particules, la mise en suspension directe ou la désagrégation des particules (Shao, 2008), telle qu'observée à la Figure 17. Dans la première situation, seul un vent assez important est requis pour que les forces entraînant dépassent celles des forces résistantes. Pour la deuxième méthode, la mise en suspension des particules s'effectue en raison d'une particule plus imposante qui frappe la surface du sol menant un transfert d'énergie aux particules plus fines, donc la mise en suspension des particules. Finalement, la dernière méthode se produit en raison d'un agrégat de particules qui, après avoir été mis en suspension, retourne au sol puis se désagrège. L'énergie résultante est donc transmise aux particules désagrégées dont les fines seront transportées par le vent. La matrice du matériel parental et des aérosols peuvent éclaircir les questionnements reliés aux processus responsables du transport.

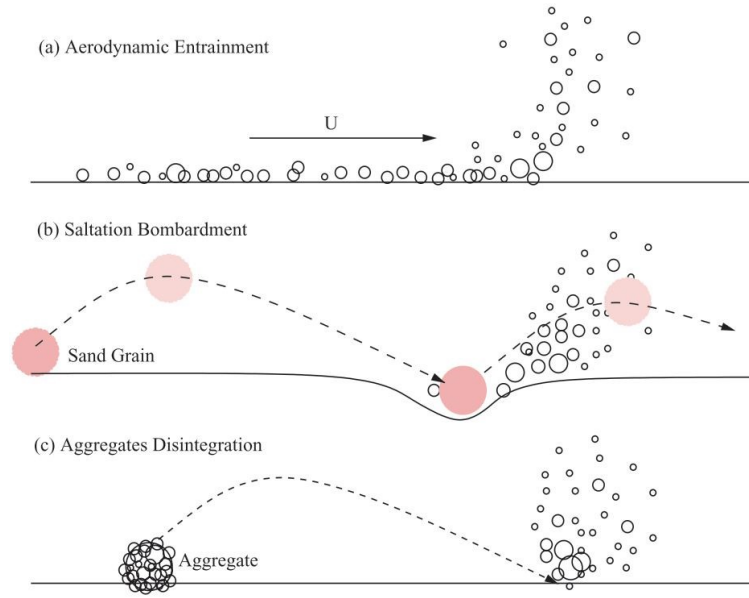


Figure 17 : Trois processus mécaniques du déplacement des particules par mise en suspension. (a) Entrainement aérodynamique (b) Saltation et bombardement (c) désagrégation (Shao, 2008).

1.5.3: Facteurs d'émissions et de déposition des sédiments

Malgré que ces trois processus mécaniques (Figure 17) peuvent être testés avec diverses variables et divers types de sols en laboratoires, il est difficile d'identifier quels sont les facteurs responsables en temps réel. Cela nécessite d'être en mesure d'identifier la taille et le type de particules et la cause du transport résultant lorsque la particule atteint les instruments sur le site (p. ex. un compteur de particules) (Raffaele et al., 2018). Si ces variables étaient connues, les données de terrains suivraient une courbe similaire à celle en fonction du nombre de Reynolds, ce qui n'est pas observé (White, 1979). Les données théoriques représentent difficilement la complexité du processus de saltation (Raffaele et al., 2018) qui engendre la mise en suspension de particules fines. La différence entre le seuil du transport par le vent, versus un déplacement relié à l'impact de la déposition d'une particule voisine rend la détermination du seuil de transport des particules difficile, puisque l'écart entre les deux éléments varie selon la taille des particules (Pye, 1987).

La combinaison des analyses du comportement des particules en laboratoire et sur le terrain permet ainsi d'étudier et démontrer l'importance des autres facteurs influençant le mouvement des particules. Comme mentionné plus haut, il est impossible de déterminer par des instruments de mesure sur le terrain, si l'initiation du mouvement d'une particule est fonction d'un soulèvement de la particule ou plutôt la force d'impact de particules déposées (Shao et al., 1993 b). En effet, les instruments d'analyses tels que les « saltiphones » et compteurs de particules optiques comptent les

particules soit par fréquence ou laser, il n'est pas possible d'identifier la source de l'initiation des particules. Il fut toutefois démontré par des tests de souffleries aérodynamiques que l'entraînement de particules de poussière est principalement démarré par le bombardement de particules en saltation. Cette variable est donc indirectement intégrée dans ce rapport par une analyse de la distribution en taille des particules, ainsi que d'autres facteurs tels que la composition des particules associées aux résultats théoriques (Shao et al., 1993b).ⁱ

En effet, la distribution granulométrique n'explique que la composante mécanique du déplacement des particules (Shao, 2008). Il faut donc intégrer les facteurs environnementaux (Figure 18) lors d'études sur les particules de poussières : végétation, dynamique des vents, précipitations, rugosité, etc. (Lu, 2000). Les régions arides avec de faibles précipitations sont de grandes sources de sédiments propices au transport, en raison de la disponibilité des sédiments et de la topographie du site (Prospero et al., 2002). Ainsi des facteurs comme de grands obstacles et une grande quantité de précipitations diminuent le potentiel de transport éolien, alors qu'un environnement plat et sec (p. ex. désert) cause un plus grand potentiel d'émission.

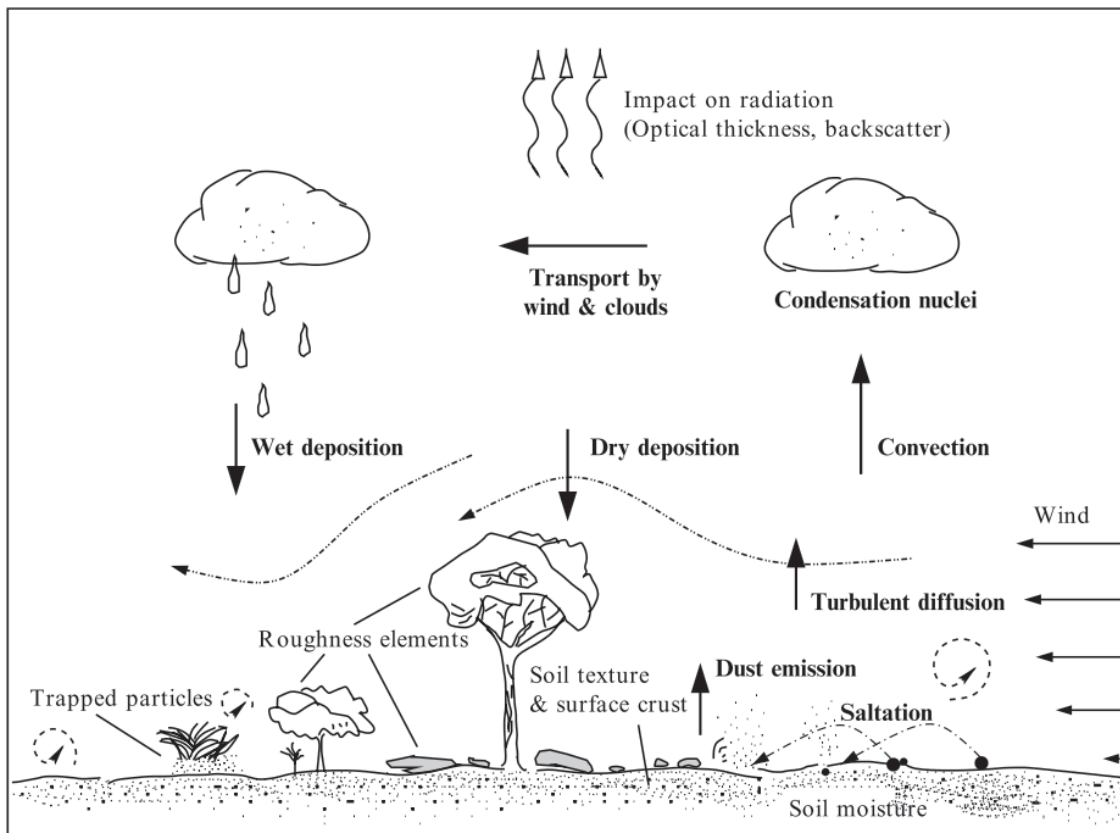


Figure 18 : Illustration des trois phases d'érosion du vent, du transport et de la déposition. Les conditions atmosphériques, la propriété des sols, les caractéristiques de surfaces et du contrôle de l'érosion de surface contrôlent les processus d'érosion (modifié de Lu, 1999) (Shao, 2008).

1.6: Chimie et minéralogie des poussières

La connaissance de la composition minéralogique des sources d'émissions, notamment les particules d'argile (p. ex. kaolinite, smectite, illite et chlorite) peut aider à identifier la distance parcourue par les poussières. En effet, malgré la modification des particules lors du transport, certains minéraux comportent des propriétés uniques à leur source d'émission (p. ex. la kaolinite se trouve principalement en zone de basses latitudes en raison de sa composition initiale (Kohfeld and Tegen, 2007)). Considérant le sujet à l'étude, la minéralogie est considérée comme tant un élément de second plan comparé à la composition élémentaire puisque, selon la méthodologie utilisée et les instruments d'analyses disponibles, seule la composition élémentaire fournit une information supplémentaire et plus précise sur les différences entre les sites.

Les poussières minérales sont reconnues comme facteurs d'enrichissement, pour les océans, dont les principaux nutriments se composent du phosphore (Mahowald et al., 2008) et du fer (Kurusu et al., 2016 ; Mahowald et al., 2009). En effet, les poussières minérales peuvent par exemple fournir un apport essentiel à la croissance du phytoplancton, dont les effets de rétroactions peuvent être nombreux puisqu'il y a d'autres micronutriments (fer, zinc, cadmium) et macronutriments (Phosphate, Silice) présents dans les poussières permettant le développement terrestre et marin (Kohfeld and Tegen, 2007).

Le rôle des poussières minérales est de plus en plus documenté, mais les estimations quantitatives restent encore incertaines, puisque la modélisation du transport de poussière dépend de contraintes très variables (saisonnalité, spatialité, précipitations, vents extrêmes, etc.). Seuls certains composants élémentaires pertinents pour l'étude seront analysés, dont la quantité à l'échelle globale présentée dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Quantification globale de la présence d'éléments à l'étude dans la couche supérieure de la croûte terrestre. En gris représente les unités en ppm (Taylor and McLennan, 1995).

Éléments	Unites	Croûte continentale supérieure
Na	wt. %	2,89
Mg	wt. %	1,33
Al	wt. %	8,04
Si	wt. %	30,8
P	ppm	700
K	wt. %	2,8
Ca	wt. %	3
Ti	wt. %	0,3
V	ppm	60
Mn	ppm	600
Fe	wt. %	3,5
Ni	ppm	20

Ces données permettent d'étudier et comparer le potentiel d'enrichissement des divers sites étudiés selon les résultats obtenus pour les échantillons. Pour adéquatement modéliser ces concentrations sur une échelle temporelle et spatiale, il faut être en mesure d'identifier le pourcentage d'apport en nutriments enrichissants ainsi que les sources d'émissions potentielles passées et estimer le trajet parcouru et (Kohfeld and Tegen, 2007). La combinaison de diverses techniques (datation des sédiments lacustres et glaciaires, analyses isotopiques de pièges à sédiments, modélisation des vents, photo-interprétation des émissions, etc.) permet une estimation des principales sources contribuant à la déposition d'éléments solubles (Figure 19).

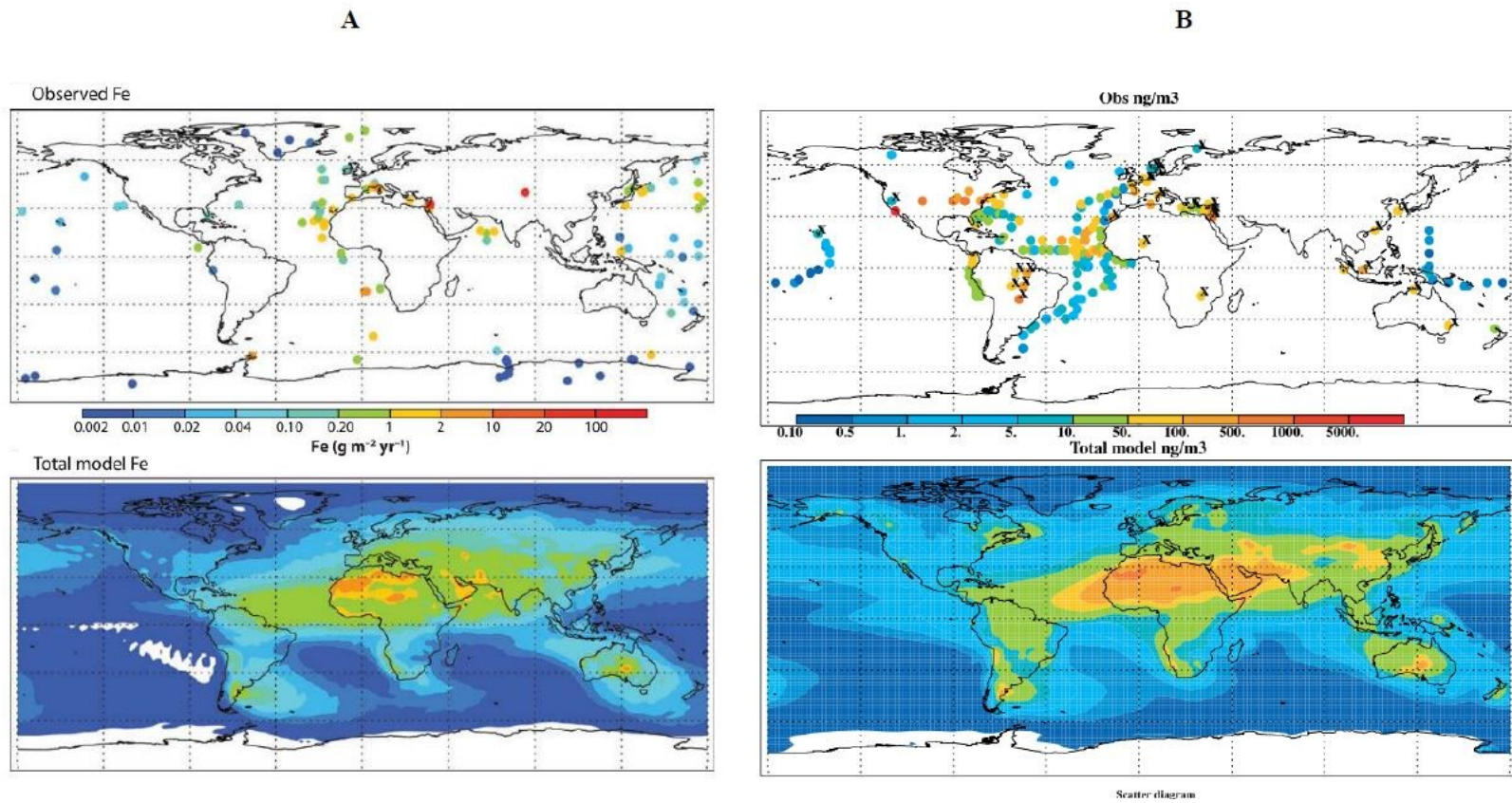


Figure 19 : A. Distribution globale du Fe ($\text{g m}^{-2} \text{year}^{-1}$). (a) Observations (b) un modèle, en fonction des données de Ginoux et al. (2001) contenant des concentrations en aérosols $< 10 \mu\text{m}$. (Mahowald et al., 2009). B. Distribution globale du PT (Phosphore total) basé sur des observations directes (ng m^{-3}) (Mahowald et al., 2008).

Le cycle des poussières crée un effet de rétroaction sur le cycle du carbone (Figure 1), puisque certains sédiments vont se déposer en zone de croissance des végétaux. Le transport se fait à la fois localement (p. ex. transport le long d'un bassin versant) et globalement (p. ex. du Sahara en Amazonie), en fonction de la distance parcourue des sédiments et des conditions d'émissions (taille de particule et intensité des vents) (Shao et al., 2011). Seul un certain pourcentage des éléments émis dans l'atmosphère se trouve sous forme soluble, donc assimilables par les organismes. Il est estimé que 10 % du phosphate émis est soluble (Mahowald et al., 2008), alors que les données s'avèrent encore incertaines pour le fer en raison de la faible concentration (Mahowald et al., 2009). À noter qu'une petite portion insoluble peut aussi être assimilée par les végétaux (Mahowald et al., 2008). Plusieurs modélisations à l'échelle moyennes (p. ex. «Lagrangian box model» de la chimie des phases liquides et gazeuses») et à divers endroits (Meskhidze et al., 2005) ont été générés, selon des observations dérivées d'une base de données extrapolée d'analyses d'échantillons des eaux riches en nutriments. L'étude des trajectoires à l'échelle régionale demande une analyse plus détaillée puisqu'il est nécessaire d'obtenir un suivi continu de la trajectoire des particules de poussières vers l'atmosphère puis dans l'Océan. Pour aider à l'étude de la dynamique des aérosols minérale, des modèles de trajectoires tels que le NOAA HYPSPLIT sont générés pour étudier les sources d'émissions (Trapp et al., 2010). En échantillonnant des sources de déposition puis étudiées les concentrations en Fe solubles, il est possible de relier les événements de transport à ces concentrations (Tableau 2). Ce type d'analyse n'est pas possible pour ce projet de recherche puisque les données de Fe ne sont pas analysées sous forme soluble. Il est tout de même intéressant de noter les différences entre les régions et l'apport potentiel en Fe par les poussières minérales.

Tableau 2 : Données de Fe soluble selon les trajectoires d'origines (Trapp et al., 2010).

Iron Solubility and Speciation as Related to Back Trajectory Origin					
	Mineral Dust ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	% Fe (II) _{sol}	% Fe (III) _{sol}	% Fe _{sol}	% Of Fe _{sol} In Fe(II) Form
<i>East Atlantic Ocean</i>					
Mean	18.2	0.7	1.1	1.9	38.1
SD	14.9	0.6	0.6	1.1	14.8
Maximum	50.7	2.1	2.3	3.8	58.2
Minimum	3.5	0.4	0.4	0.8	18.4
<i>South Atlantic Ocean</i>					
Mean	9.2	1.1	3.3	3.3	61.9
SD	11.8	0.5	1.7	1.7	23.5
Maximum	30.1	1.6	5.8	5.8	87.0
Minimum	2.5	0.4	1.5	1.5	27.6
<i>West Africa</i>					
Mean	19.7	0.7	1.3	2.0	33.2
SD	17.3	0.4	0.7	0.9	11.5
Maximum	50.7	1.7	4.7	4.7	52.3
Minimum	2.4	0.3	0.5	0.9	15.9

Chapitre 2: Site d'étude et méthodologie

Divisé en deux parties, ce chapitre cherche à caractériser les sites selon la littérature scientifique actuelle, ainsi que décrire la méthodologie utilisée à la fois sur le terrain et en laboratoire :

2.1:Description individuelle des sites

2.2:Méthodologie et traitements des résultats

Comme mentionné dans le Chapitre 1: la région côtière de la Namibie est composée de plusieurs rivières éphémères. Ces rivières sont sujettes à plusieurs évènements de tempêtes de poussières, particulièrement en saison sèche. Puisque c'est le plus vieux désert au monde, il est possible d'observer de nombreuses structures géologiques qui ont été remodelées au cours du temps (Goudie and Viles, 2015). Ces structures sont parfois d'origine hydraulique (accumulation de sédiments d'anciennes rivières) et parfois éolienne (dunes). La roche mère est parfois d'origine volcanique (*dykes* de dolérite), parfois sédimentaire (Goudie and Viles, 2015). Le centre de la Namibie est généralement plus chaud, élevé et avec plus de végétation que la région côtière. Cela favorise donc le déplacement des sédiments par le vent à l'exutoire des bassins. En zone côtière, la végétation s'avère généralement rare, puisque l'environnement est plus hostile qu'au centre.

2.1: Description individuelle des sites

2.1.1: Huab

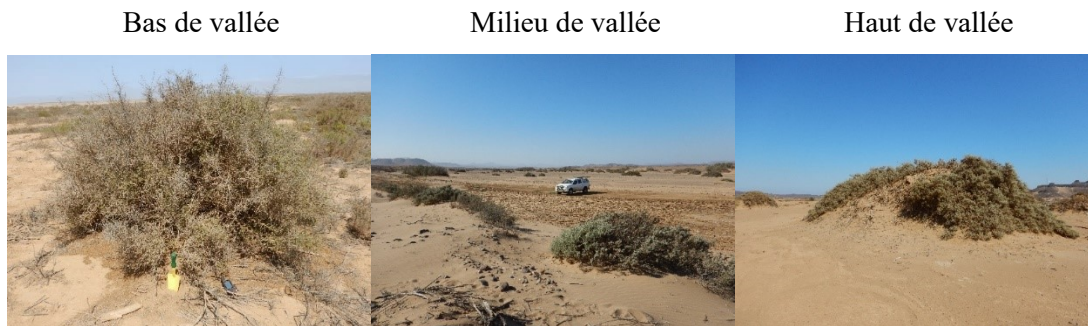


Image 1 : Photos de terrain 2017. Prise par Amélie Chaput

La roche mère du haut de vallée de Huab est formée principalement de schiste (Duncan et al., 1989), alors que l'exutoire se compose de dolérite et basalte (Figure 9 et Fig_A 1) : « Damaraland Igneous Group » (Goscombe et al., 2003). Les couches supérieures sont constituées de roches volcaniques, sédimentaires et métamorphiques (Fig_A 1) (Duncan et al., 1989). S'écoulant dans la section continentale de Kaoko, ce site fournit d'importants éléments tels que le phosphore et l'azote aux environnements marins de la zone côtière (Dansie et al., 2017). Situé dans la zone continentale du « Kaoko Belt », le sable est principalement composé à 59 % de quartz, 28 % de feldspath et des traces d'aphanite volcanique, sédimentaire et métamorphique, de mica (6 %) et de métaux lourds (Garzanti et al., 2014 ; Goscombe et al., 2003). À l'exutoire du bassin, les précipitations annuelles se situent en moyenne entre 0 et 50 mm et la température moyenne est d'environ 16 C (ACACIA Projet E1, 2002). L'apport en sédiments fins provient en amont du bassin et de certains chenaux actifs, alors que les surfaces d'émissions sont composées de dunes de végétations et croûtes de limon érodables (Von-Holdt et al., 2017).

2.1.2: Omaruru



Image 2 : Photos de terrain 2017. Prise par Amélie Chaput

Situé en tant qu'intermédiaire entre la rivière du Huab et de Kuiseb, le site se localise en amont de « Hentiesbaai » dans la zone intérieure de la branche de Damara (Fig_A 2 -Fig_A 3). La roche mère est formée de roches sédimentaires (Fig_A 2). Le sable est principalement composé à 64 % de quartz et 30 % de feldspath, avec des traces d'aphanite volcanique, de mica et de métaux lourds (Garzanti et al., 2014 ; Goscombe et al., 2003). Le désert de la Namibie s'étend le long de la côte (Gutiérrez and Gutiérrez, 2014) : les températures et les précipitations du Omaruru varient similairement à celles de la vallée du Huab. Comme observée dans le Huab, des zones de Gravel érodables, entrecoupées par des dunes de végétations en aval, constituent les principales sources d'émissions (Von-Holdt et al., 2017).

Afin de fournir une réserve d'eau pour les populations situées à proximité de la vallée (Henties Bay, Swakopmund, Arandis et la mine de Rössing) un barrage fût érigé en 1993 appelé le Omdel (Geyh and Ploethner, 1995). La construction du barrage n'impacte pas directement le site à l'étude³, mais il est important de le mentionner puisqu'il est situé en amont du site (Fig_A 4). Cela eut pour effet une modification de l'écoulement en surface et sous terrain dans cette région, transformant le potentiel d'émission des sédiments (soit positif ou négatif selon la zone) et la relocalisation des sources d'émissions vers l'exutoire du bassin (Von-Holdt et al., 2017).

2.1.3: Kuiseb



Image 3 : Photos de terrain 2017. Prise par Amélie Chaput

Comme affirmé ci-dessus, les températures et précipitations sont similaires (entre 0 et 50 mm) à celles de la vallée du Huab. Occupant une superficie de 15 500 km² (Grodek et al., 2013), la rivière du bassin versant du Kuiseb se localise aussi dans la zone intérieure de la branche de Damara (« Inland Branch » Fig_A 2), le site est donc principalement composé de quartz (64 %) et de feldspath (30 %), tel qu'observé pour l'Omaruru. En amont, certaines zones d'émissions se

³ Tous les échantillons et études qui découlent de ce projet furent effectués après la création du barrage. L'objectif du projet est de caractériser le site en acceptant cette influence anthropique, il n'est pas question de modéliser le transport en relation avec ces environnements (il faudrait quantifier l'impact du barrage à ce moment-là). À noter que celui-ci doit tout de même être considérée au travers l'interprétation des résultats.

localisent sur des plaques salines appelées « playa », entrecoupées par des plans d'eau riches en biodiversité appelée des « wadis » (Von-Holdt et al., 2017). En raison de la complexité géologique de la Namibie, la roche mère du bassin versant varie entre différentes formations, dont le type de roche dépend de son époque géologique (Figure 9). À l'exutoire du bassin, la roche mère est formée de roches sédimentaires, mais à proximité de roches volcaniques et magmatiques (Figure 9 : « Damara Supergroup and Gariep complexe » et « Damara granite intrusions »). La surface d'émissions de poussières à l'exutoire est plane et à proximité de la mer de sable, dont l'origine des panaches de poussières varie entre une surface de Gravel et des roches et sédiments fins (Von-Holdt et al., 2017).

2.2: Méthodologie et traitements des résultats

Les analyses se divisent en trois grandes catégories : données de terrain, données en laboratoire à Montréal et données de laboratoire en France. Les échantillons furent récoltés en Namibie à l'été 2017 (Figure 20). Les analyses dans le laboratoire LÉÉ furent effectuées entre 2017-2018, alors que les analyses du laboratoire LISA furent effectuées en 2018. À noter que plusieurs analyses non présentes dans la section résultats ont tout de même été effectuées et décrites (voir Tableau 3 pour le nombre d'échantillons traité par analyse).

Figure 20 : Planification générale des analyses. Les acronymes sont indiqués en gris pâle, alors que l'astérisque signifie que ces analyses seront manquantes dans le travail présenté.

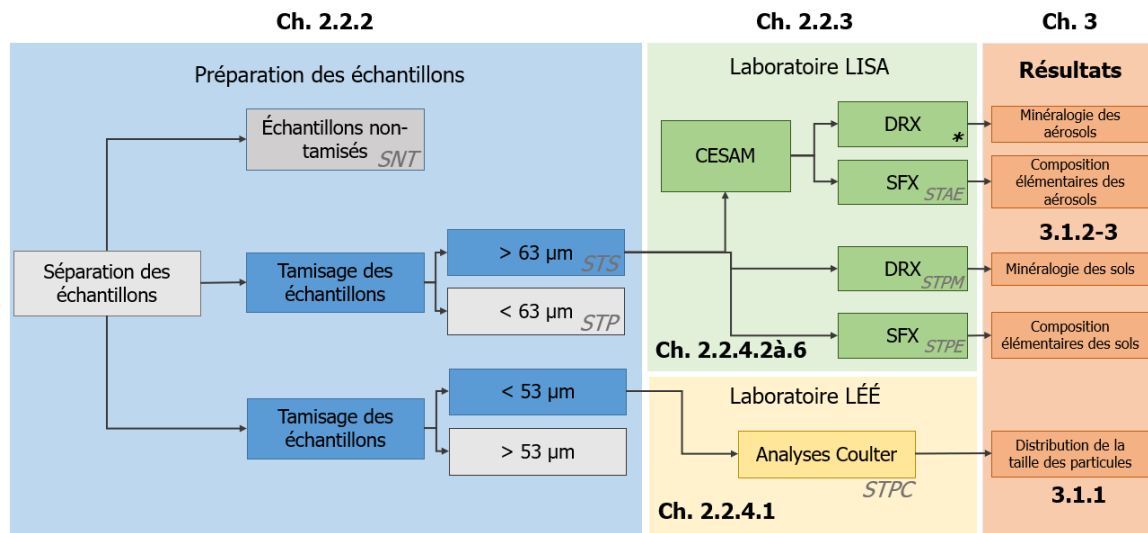


Tableau 3 : Représentation du nombre d'échantillons analysés et utilisés pour générer les résultats de ce projet. Pour plus de détails sur l'ordre de sélection, voir Figure 20. Les échantillons non traités correspondent aux échantillons qui n'ont pas été sélectionnés faute de temps où inférieur à la limite de détection.

Sites	Nombre d'échantillons analysés				Échantillons non-traités (combiné)
	Huab	Kuiseb	Omaruru	Combiné	
Séparation des échantillons	23	25	14	62	46
Coulter: STPC	12	9	22	43	13
CESAM: DRX Aérosols	0	6	1	7	13
CESAM: STAE	11	8	10	29	6
CESAM: STPM	12	7	3	22	13
CESAM: STPE	12	9	11	32	3

2.2.1: Site d'étude :

La sélection des bassins versants s'est majoritairement basée sur des données prélevées de stations météorologiques installées en 2013 et les grandes sources d'émissions enregistrées par imagerie satellitaire (Figure 21) (Von-Holdt et al., 2017). L'installation des outils de prise de données sur le terrain s'est reposée sur les mêmes critères, tout en intégrant les notions physiques de zones potentielles de déposition des particules. En effet, transportées sur de grandes distances, les poussières ont tendance à se déposer à l'exutoire du bassin versant sur des dunes, dont celles avec de la végétation agissant en tant qu'obstacle (Shao, 2008). À noter que tous les instruments installés/testés seront discutés au chapitre 3, mais seulement quelques-uns ont été traités pour ce projet.

Sites d'échantillonnage de sols (sub-surface). Données récoltées à l'été 2017

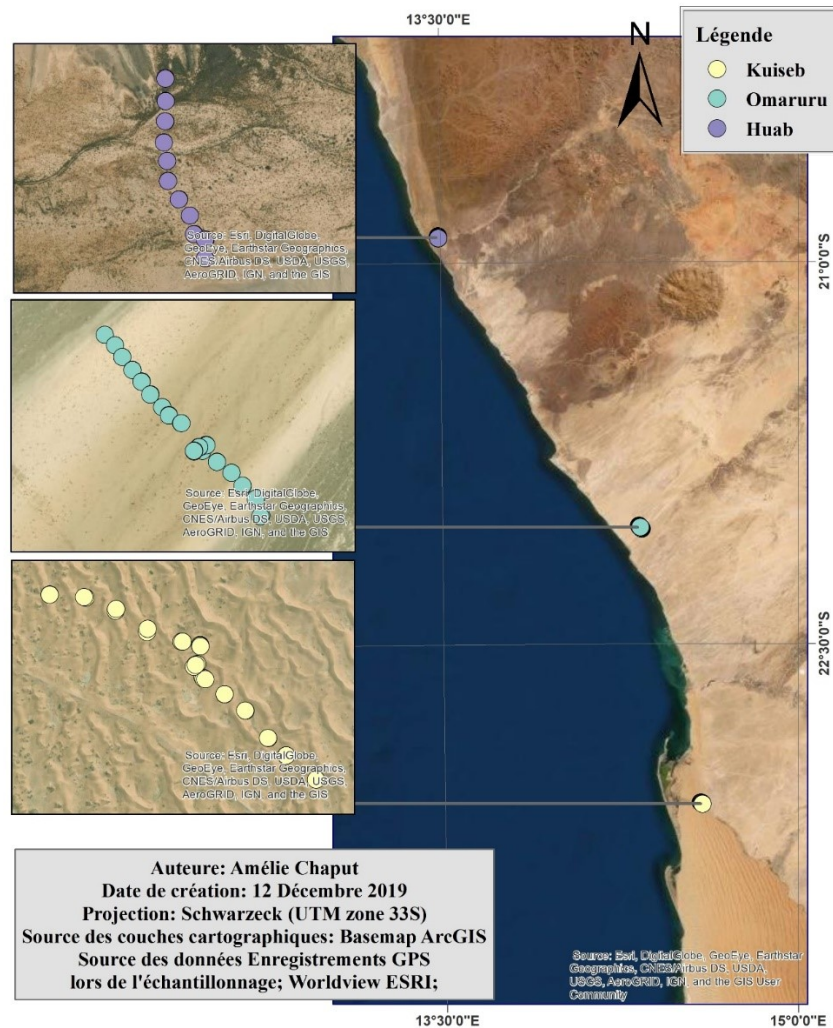


Figure 21 : Représentation cartographique des sites d'études de la vallée Huab, Omaruru et Kuiseb.

Afin d'intégrer les notions présentées dans la section de revue de littérature, il est nécessaire d'identifier les méthodes permettant de comparer les notions théoriques aux données de terrains. Certaines variables seront donc prises *in situ*, alors que d'autres résultats seront indirectement liés par des analyses en laboratoires (Figure 22). Deux grandes catégories sont présentes : les données de terrain qui sont mesurées à l'aide d'instruments sur le site, puis les données en laboratoire qui reprennent les échantillons récoltés sur le terrain. Le projet vise à étudier ces facteurs, afin d'améliorer les connaissances sur les processus d'érosion éolienne menant à l'émission des poussières. Pour ce faire, il est nécessaire d'identifier les composantes environnementales et identifier le type d'analyse adéquat. Plusieurs effets s'avèrent notables, mais ce sera la perte et redistribution des nutriments qui sera d'intérêt pour cette étude⁴. À noter que les astérisques signifient que ces données seront manquantes dans la section des résultats.

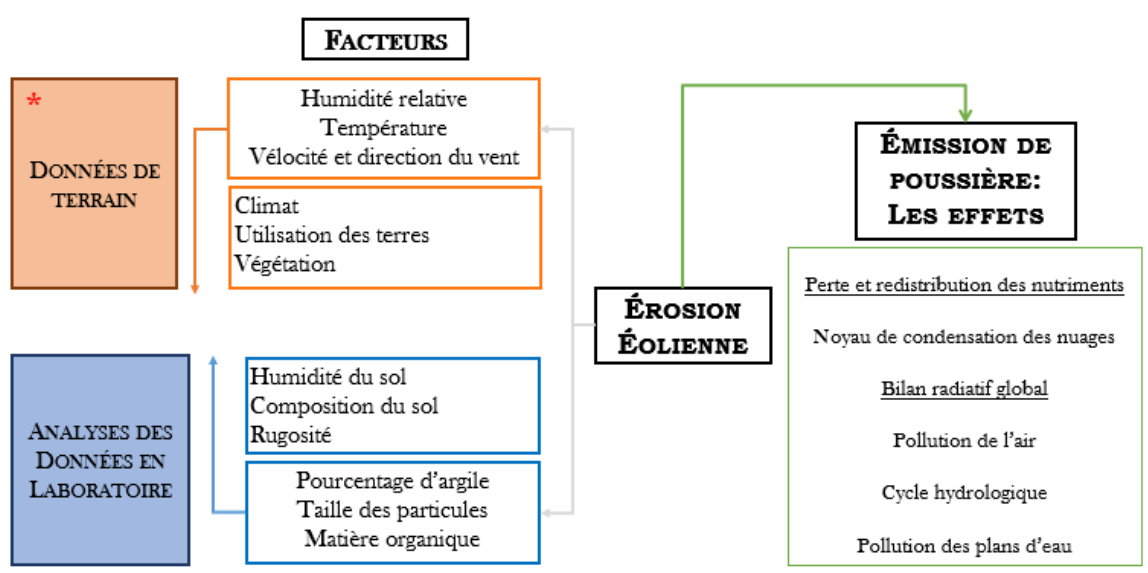


Figure 22 : Structure des interactions des facteurs affectant l'érosion et les effets résultant de l'érosion, selon les objectifs du proposé. (modifié de Ravi et al., 2011). Les éléments soulignés sont d'intérêt pour les études du laboratoire. L'astérisque signifie que les données de terrains rattachés aux facteurs *in situ* ne seront pas traitées dans le mémoire.

⁴ Dans le cadre des analyses, le laboratoire LISA s'intéressait aux propriétés optiques et l'effet sur le bilan radiatif, les résultats ne sont toutefois pas présents dans ce rapport et sont en cours d'analyse.

2.2.2: Données de terrain

Diverses données doivent être collectées afin d'identifier la relation avec la distribution des nutriments et son environnement. Pour chaque site, une station météorologique et des pièges à sédiments sont installés, puis des échantillons de sols sont récoltés. Dans un premier temps ils sont collectés sur une distance de 1 kilomètre et dans un deuxième temps à 50 mètres de la station (Figure 23).

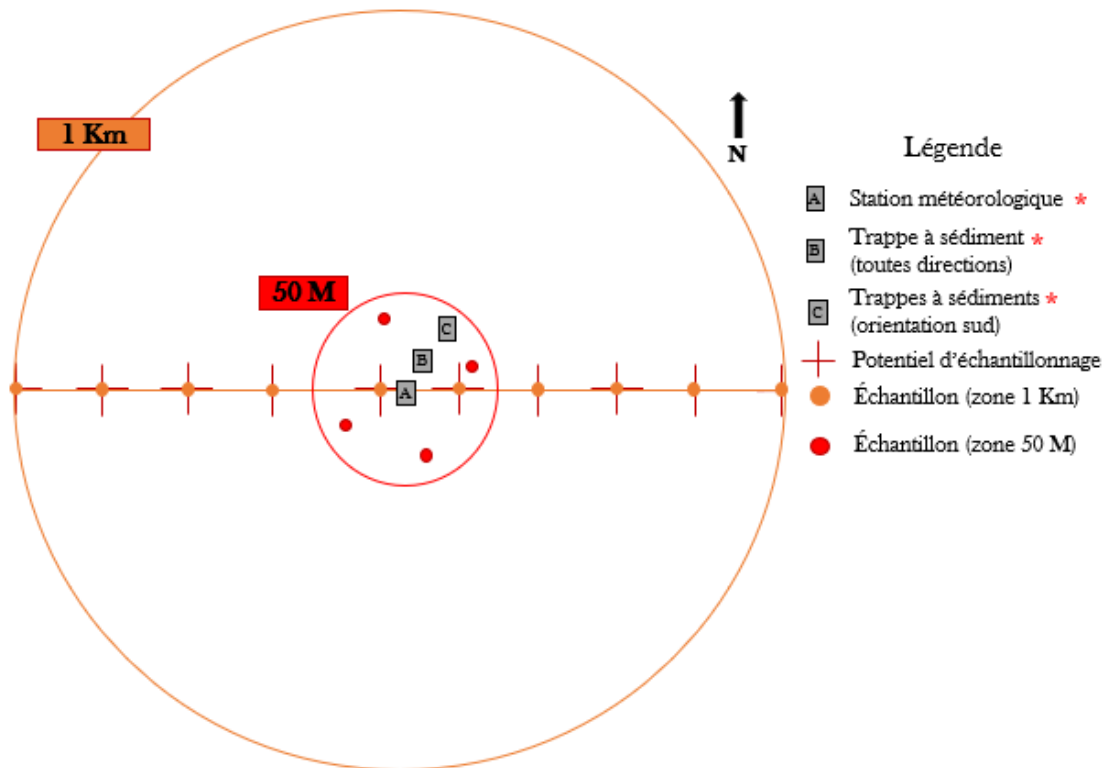


Figure 23 : Plan descriptif des installations d'équipement pour le terrain 2017.

Les échantillons seront donc divisés en trois grandes catégories : 1) les données de stations météorologiques ; 2) Les pièges à sédiments ; 3) Les échantillons de sols. À noter que certains échantillons ne seront pas discutés ici, mais les objectifs de récolte sont tout de même identifiés (Annexe B & Tableau 4).

Données de terrain		
Instrument/Méthode	Description	Objectif
*Station météorologique	Installation d'un 'ARA N-FRM Sampler' : 1) Mesure des conditions météorologiques; 2) Compteur de particules en fonction de la diffusion de lumière; 3) Installation d'un filtre (PM 2.5) pouvant capter les aérosols; 4) Installation d'un anémomètre au sommet;	Vitesse du vent; direction du vent ; quantification des particules mise en suspension selon la hauteur de l'outil; récolte d'aérosols sur filtres;
Trappes à sédiments	Installation de deux colonnes. Chaque colonne contient 3 trappes situées à environ 10 cm, 35 cm et 60 cm. Sur une colonne, les trappes à sédiments se déplacent librement, alors que l'autre est limité aux vents du sud.	Comparer l'apport en sédiments selon l'orientation sud versus le total;
Échantillons de sols	Les sols furent récoltés à chaque 100 mètres, et ce pour une distance de 1 kilomètre. La prise d'échantillons s'est fait en surface, sur deux côtés de la dune de végétation: côté nord et est (afin d'avoir la déposition des vents du sud et de l'Ouest). À 50 mètres de la station, quatre échantillons selon les points cardinaux) furent récoltés sur 4 dunes de végétation.	Comparer l'apport en nutriments au sol versus ce qui est transporté. *Observer s'il y a des similarités et différences potentielles entre le type de nutriment selon les deux directions de vents (Sud et Ouest).

Tableau 4 : Description et justification des objectifs pour l'utilisation des instruments de mesure lors du terrain en Namibie 2017. Voir Figure 23 pour la correspondance avec l'installation des instruments. Les Astérisques en rouge signifient qu'ils seront manquants dans le mémoire.

2.2.2.1: Échantillons de sol

La précision des données d'échantillons de sols varie selon plusieurs facteurs : taille de l'échantillon, choix d'échantillonnage, quantité de l'échantillonnage, etc. (Southwood and Henderson, 2015). Afin d'obtenir un échantillonnage représentatif, il est idéalement nécessaire de posséder un nombre suffisant d'échantillons, ainsi qu'une récolte aléatoire sur l'ensemble du site à l'étude (Carter and Gregorich, 2006). En statistique afin d'effectuer un test puissant, il est idéal d'obtenir un échantillonnage normal et indépendant, dont l'égalité des variances entre les groupements (Legendre and Legendre, 2012). Cela est rarement réalisé en raison de nombreux facteurs tels que les ressources en temps, financement et main d'œuvre nécessaires (Southwood and Henderson, 2015). Il est tout de même possible d'obtenir une précision nécessaire afin de répondre aux objectifs du projet en question, ainsi que des analyses statistiques non paramétriques au besoin. Pour ce cas, l'échantillonnage se veut systématique puisqu'il s'effectue selon une certaine distance déjà établie et sur une ligne droite et sur une zone similaire pour toutes les dunes de végétation. Cette méthode est grandement utilisée dans la recherche nécessitant des profils topographiques dans l'étude de la variabilité spatiale d'une espèce ou un élément physique (Bellehumeur & Legendre, 1998 ; Levin et al., 2006). D'un autre côté, un transect assume l'indépendance des variables, ce qui peut mener à une mauvaise représentation du site lorsque les

résultats servent à généraliser un phénomène (p. ex. différence d'échelle spatiale, donc de résolution spatiale (Drummer and Mcdonald, 2016)). Il est tout de même possible d'observer s'il y a une dépendance entre les données par des tests de corrélations des variables. Dans le cas de cette étude, les sites ont été présélectionnés en fonction de leur potentiel d'émission, il est nécessaire de prendre en considération ce critère lors de l'interprétation des résultats. En effet, ils pourraient surreprésenter le potentiel d'émission des vallées dans cette région ou encore sous-représenter le potentiel d'émission si certains sites émetteurs n'ont pas été étudiés. Malgré les désavantages, en termes de temps, coûts et objectifs, cette méthode s'avère efficace puisqu'elle permet d'étudier la variabilité des sites.

2.2.3: Analyses de données en laboratoire :

Les analyses d'échantillons effectuées en laboratoire se basent sur les échantillons de sol récoltés sur la surface des dunes de végétation (SNT), selon deux directions Tableau 5. Ce tableau représente les objectifs ainsi que la méthode et l'outil d'analyse utilisés pour répondre aux hypothèses de départ.

Tableau 5 : Analyse en laboratoire des échantillons récoltés en Namibie à l'été 2017. L'astérisque rouge signifie que les analyses seront manquantes dans ce mémoire.

Analyses en laboratoire				
No.	Objectif	Description	Outils d'analyse	Échantillon résultant
* I	Comparaison de la méthode de simulation avec le CESAM versus les échantillons de sols tamisés à 20 µm	Comparer les résultats de la distribution en taille des particules des échantillons tamisés à 20 µm versus les particules mises en suspension dans le CESAM	Multisizer 4e, CESAM/Manifold, SFX, DRX	NA
II	Évaluation de la distribution en taille des particules; 2 µm - 1000 µm	a. Étude de la distribution de la taille des particules en fonction des différents sites selon le tamisage; Résultats entre 2 µm et 1000 µm; b. Étude de la distribution de la taille des particules en fonction des différents sites selon la méthode coulter (Coulter counter multisizer 4e); Résultats < 60 µm	Multisizer 4e (Méthode Coulter); Tamisage	STPC-STP-STP STPC-STP
III	Évaluer le type de minéraux présent dans les échantillons de sols	a. Étude de la minéralogie en fonction des différents sites; Résultats < 60 µm	DRX	STPM
IV	Comparaison de la composition élémentaire entre les échantillons de sols et poussières	a. Étude de la composition élémentaire des échantillons de sols <60 µm * b. Étude de la composition élémentaire des échantillons mise en suspension <20 µm	SFX CESAM/Manifold; SFX;	STPE NA

2.2.4: Description des outils d'analyses en laboratoire

2.2.4.1: Méthode Coulter : Multisizer 4^e

Les propriétés géométriques peuvent être analysées par différentes méthodes comme le tamisage, par imagerie (p. ex. la microscopie optique et électrique), ou par résistance à un courant électrique. Le tamisage peut prendre un temps considérable si le nombre d'échantillons est important et que l'analyse se veut précise (plusieurs tamis). La distribution de particules par imagerie est obtenue par l'analyse des formes de celles-ci. Seule une analyse partielle est effectuée, puisque la troisième dimension est généralement mesurée indirectement, menant ainsi à une représentation incomplète de la distribution (Mahowald et al., 2014). La méthode Coulter (Figure 24) se démarque de ceux-ci puisque le temps d'analyse est court et l'analyse dépend de la force de résistance selon un courant électrique, donc de l'ensemble de la particule.

L'échantillon est dilué dans une solution isotonique (« Isoton II diluent »), dont un tube est inséré au milieu du bécher pour mesurer la résistance passant au travers celui-ci par les électrodes insérées à l'intérieur et à l'extérieur du tube (Figure 25). Le Multisizer 4^e offre la possibilité de comparer les échantillons de sols et d'aérosols sur un même instrument puisqu'il mesure de 0,2 μm à 1600 μm . Toutefois, afin d'assurer une précision optimale de la distribution des particules (Tab_A 2), les échantillons doivent être analysés en plusieurs étapes et avec différents tubes (McTainsh et al., 1997). Il est impossible d'analyser un même échantillon sur différentes tailles de tubes (un conteneur différent est utilisé selon le tube); un nouvel échantillon doit être dilué, augmentant donc les erreurs de comparaisons entre les résultats de distribution entre les particules < 60 μm versus 60 μm à 1000 μm .

Figure 24 : Représentation du Coulter Counter. a. Multisizer 4e (Photo prise par : Amélie Chaput), b. Multisizer 4^e (Petkov, 2011)



À noter que seule la taille < 60 μm sera analysée en raison des complications et certaines difficultés rencontrées lors des analyses pour des particules plus grossières. En effet les particules >75 μm sont susceptibles à des erreurs de manipulations, puisque celles-ci ont tendance à se déposer plus rapidement que les particules fines (McTainsh et al., 1997) et générer un sifflement

lors des analyses, menant à une augmentation du bruit de fond sur les résultats (Petkov, 2011). Des solutions telles que la dilution par Glycérol s'avèrent envisageables, mais cela engendre une diminution de la précision du liquide isotonique, puisque l'on diminue la charge de la solution, donc la capacité des électrodes à détecter une différence dans le courant (Petkov, 2011).

Selon ces informations, des tests préliminaires ont été effectués. L'échantillon a été tamisé en deux catégories : $< 53 \mu\text{m}$ avec un tube de $100 \mu\text{m}$ et puis $> 53 \mu\text{m}$ avec un tube de $2000 \mu\text{m}$. Cela permettant de réduire l'erreur pour les particules entre $40 \mu\text{m}$ et $80 \mu\text{m}$, puisqu'ils se situent à l'extrémité des distributions de particules des différentes tailles de tubes où l'incertitude croît. Cependant, aucune analyse de qualité $>53 \mu\text{m}$ n'a pu être effectuée, même avec un taux de Glycérol au maximum possible et une haute vitesse de l'agitateur. Ainsi cette méthode pourrait s'appliquer pour des particules situées entre $50 \mu\text{m}$ et $150 \mu\text{m}$, mais semblait inefficace pour les particules plus grossières.

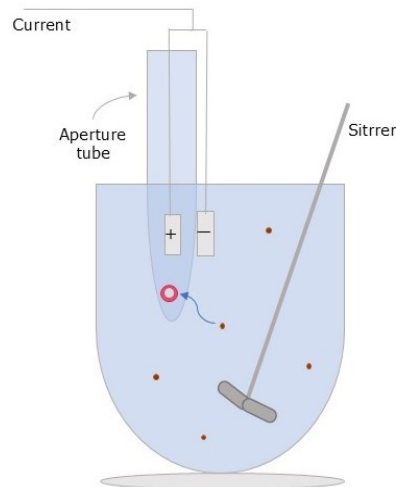


Figure 25 : Schéma de fonctionnement du Multisizer 4^e modifié (McTainsh et al., 1997). Les sédiments sont déposés dans une solution isotonique, puis agités afin de mettre les sédiments en suspension.

2.2.4.2: CESAM

L'utilisation des tunnels aérodynamiques permet de contrôler les variables de mise en suspension en laboratoire, dont la taille des particules, l'intensité du vent, le temps de déplacement (Bagnold, 1941). Il est possible de construire des tunnels aérodynamiques horizontaux pour observer des changements sur une certaine distance, dont le modèle et les paramètres des circuits dépendent du sujet de recherche (Shao, 2008). En raison d'accessibilité et des questions de recherche visées sur le déplacement des poussières, une chambre de simulation à la verticale fut utilisée. Celle-ci répond à la problématique de sorte qu'elle permet d'étudier la mise en suspension atmosphérique (profil vertical) des particules, avec un petit échantillon (Figure 26) (Di-Biagio et al., 2017). Certaines restrictions sont observables et seront discutées, puisque cette chambre est généralement dédiée aux expériences sur des particules fines, c'est dire les aérosols.

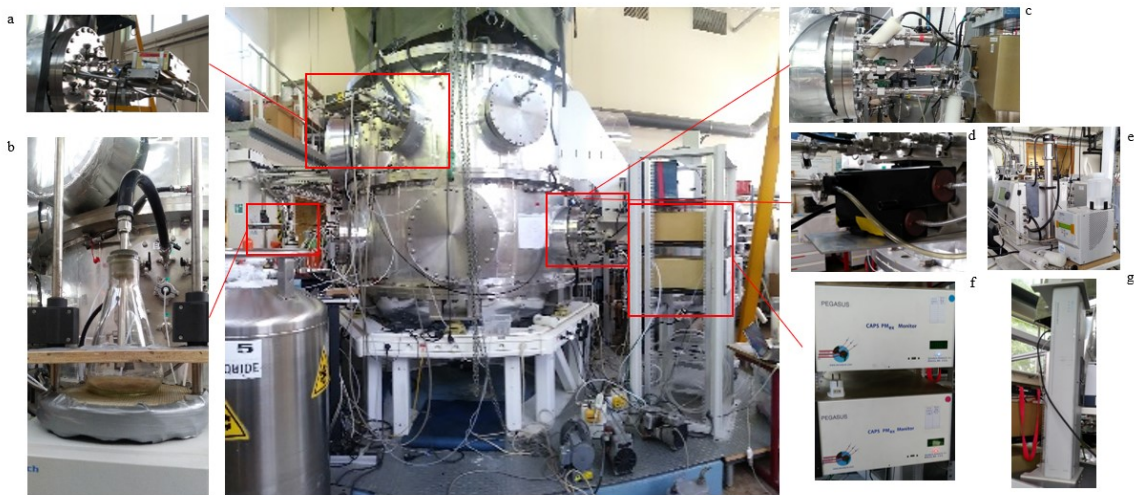


Figure 26 : Schéma des instruments et connexions au CESAM (Chambre expérimentale de simulation atmosphérique). a) GRIMM ; b) Processus de mise en suspension (Échantillon contenu dans un erlenmeyer posé sur une plaque vibrante) ; c) Porte-filtre (seuls deux filtres sont connectés pour les analyses du projet) ; d) CAPS. Photos ; Amélie Chaput. Voir Tableau 6 pour la description des instruments.

Le CESAM est une chambre de simulation en inox permettant de simuler les conditions atmosphériques pour observer le comportement et déplacement des particules de poussières dans l'atmosphère (Wang et al., 2011). Un échantillon de 10 g non tamisé et non broyé est déposé dans une fiole, puis vibré et injecté dans la chambre (jusqu'à l'atteinte d'une masse de particules suffisantes pour la récolte sur filtre). Le CESAM offre la possibilité de connecter plusieurs instruments, ainsi une gamme d'analyses peut s'effectuer afin d'étudier la distribution des particules (Tableau 6) :

Tableau 6 : Description des instruments d'analyses pour l'étude de la distribution des particules, sur de courtes longueurs d'onde (Di-Biagio et al., 2017 ; Wang et al., 2011).

CESAM		
Instrument	Identification (figure schéma CESAM)	Description et paramètres
Sky Grimm Model 1.129	a	Distribution les aerosols submicronique d'une taille entre 1 µm et 20 µm par spectrométrie. Longueur d'onde 0,655 µm; Débit 1,2Lmin-1: 6s (résolution).
Palas Welas digital 2000 TM	d	Mesure par spectrométrie. La concentration des particules 1cm^{-3} et la taille des particules entre 200 nm à 105 µm.
SMPS TSI model 3080: TSI CPC model 3010	e	Mesure de la distribution des aérosols entre 10 à 1000 nm (DMA) et 10^2 à 10^7 (CPC)
NEPH TSI Inc. Model 3563	g	Mesure d'un coefficient des propriétés optiques des particules selon l'extinction suite à l'émission d'une source de lumière.
CAPS PMeX. Aerodyne (2)	f	Détecte la masse des particules par le temps d'extinction (alors que la concentration de particules augmente) par l'émission de lumière (LED).
*Filtres en polycarbonate 0,4 µm	c	Pompage à 9L/min pour le filtre DRX et 3L/min pour le filtre SFX. Les poussières sont récoltées sur des filtres en polycarbonate Nuclepore (0,4 µm).

Cette méthode permet d'analyser à la fois les particules de poussières jusqu'à la taille de micromètres et nanomètres, selon des analyses basées sur les propriétés optiques des particules. Le CESAM agit en tant qu'analyse complémentaire à la méthode Coulter, tout en permettant la mise sur filtres des aérosols qui seront analysés par diffraction des rayons X (DRX) et spectrométrie de fluorescence des rayons X (SFX). En raison du coût et temps nécessaire aux analyses, seuls 11 échantillons par transect seront analysés par cette méthode : les autres échantillons seront mis sur filtres par manifold (Figure 27).

2.2.4.3: Manifold

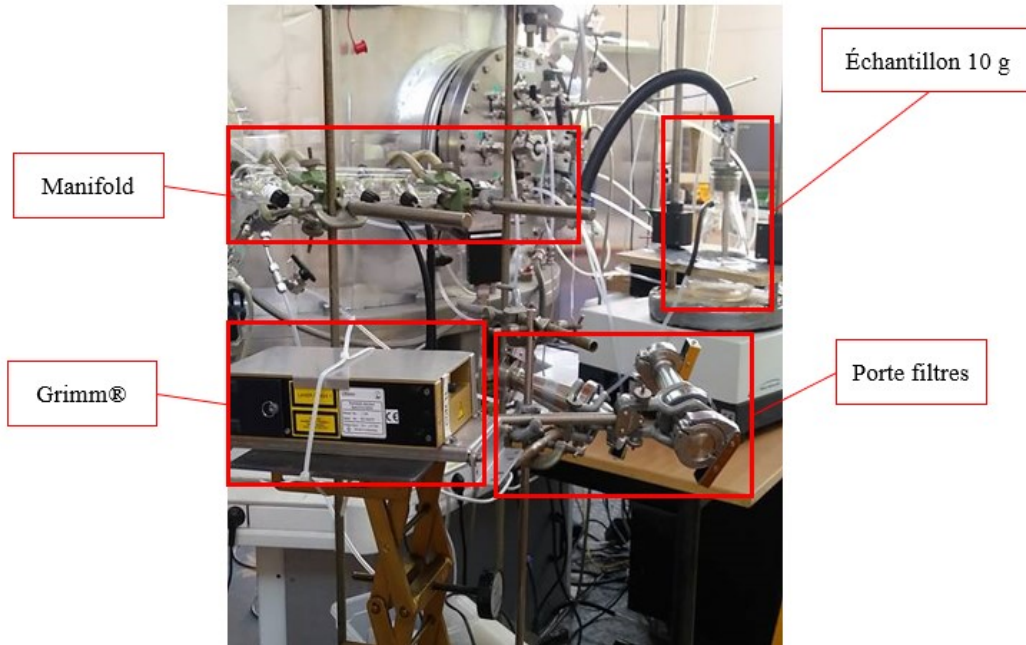


Figure 27 : Installation du manifold avec erlenmeyer sur plaque vibrante et connexion au Grimm® et deux portes filtrent. Photo : Amélie Chaput. Voir Tableau 6 pour description des instruments.

Le manifold permet de mettre sur filtre les poussières en suspension. Contrairement au CESAM, cette méthode dure seulement quelques minutes et l'injection de particules s'effectue de manière constante. Cette méthode vise à mettre sur filtres les sols qui ne seront pas traités par le CESAM, puisque c'est une méthode rapide et moins coûteuse. Il n'y a toutefois que le Grimm®, les porte-filtres et l'erlenmeyer étant connectés au manifold : l'analyse s'avère donc moins complète au niveau de l'interprétation du comportement, puisqu'il y a un manque d'instruments et une durée d'échantillon plus rapide.

2.2.4.4: DRX

La mesure de diffraction par rayons X permet d'étudier la composition minéralogique des sols et aérosols par diffraction des rayons X. L'analyse est effectuée avec le « Panalytical Empyrean diffractometer », selon les échantillons de sol < 63 µm. Contrairement à d'autres méthodes d'analyses des éléments inorganiques (Tableau 7), la diffraction par rayons X détermine la cristallographie des éléments, ce qui permet d'identifier la structure des éléments d'échantillons de sols, selon la position des pics relevée lors de l'analyse (Figure 29) pour comparer l'évolution de phase selon différents paramètres environnementaux (Dean, 2014).

Tableau 7 : Exemples de techniques d'analyse et leur application : analyses inorganiques (Dean, 2014).

Technique	Particularly useful for	Comments
Atomic absorption spectroscopy	Most metals /metalloids	Normally a sequential metal/metalloid technique for samples in solution. The flame configuration is the least sensitive method; for additional sensitivity the use of a graphite furnace or hydride generation (metalloids)/cold vapour (Hg only) is useful.
Atomic emission spectroscopy	Most metals /metalloids	ICP-AES: Normally a simultaneous technique for samples in solution. Additional sensitivity can be achieved by use of, for example, hydride generation (metalloids). Flame AES: a robust technique for the determination of easily ionisable elements in solution.
Atomic fluorescence spectroscopy	Metalloids	AFS: particularly useful when used for hydride forming elements (metalloids) or Hg.
X-ray fluorescence	Metals/metalloids	ED-XRF and WD-XRF: a simultaneous technique for samples in solid (or liquid) form.
Inorganic mass spectrometry	Metals/metalloids	ICP-MS: A simultaneous technique with high inherent sensitivity for samples in solution. Interferences can be alleviated by the use of reaction/collision cells.
Ion chromatography	Anions	IC: Particularly effective for the determination of common anions: fluoride, chloride, bromide, nitrate, nitrite, sulfate in solution. Can be used for cations.
X-ray diffraction	Element structures	XRD: a distinctive approach to determine the crystallography of the elements present, that is mineralogy.

Connaître la cristallographie permet d'obtenir des informations supplémentaires quant aux facteurs influençant les éléments lors du transport (Giacovazzo et al., 2013). La méthode consiste à analyser les poussières dans un cylindre de verre, puis interpréter les résultats au travers la méthode Rietveld, c'est-à-dire une comparaison entre les résultats d'analyses et la simulation d'un diffractogramme à partir d'un modèle prédéfini des minéraux à identifier. Les résultats d'analyses sont interprétés et ajustés selon la méthode de Rietveld, puisque cela réduit les erreurs d'interprétation en combinant les mesures théoriques de texture aux observations en laboratoires (Lutterotti et al., 2007). Cette combinaison de techniques fut choisie en raison de son application sur d'autres poussières désertiques, dont les résultats permettent une très grande précision sur les composantes minéralogiques du sol (Di Biagio et al., 2017 ; Nowak et al., 2018). Les manipulations suivent les mêmes directives qu'utilisées par le laboratoire LISA : pour les échantillons de sols, une portion de l'échantillon tamisé à 63 μm sera inséré dans un tube de verre, afin d'en ressortir la quantité et la structure cristalline des minéraux sous tous les angles (Figure 28) (Nowak et al., 2018).

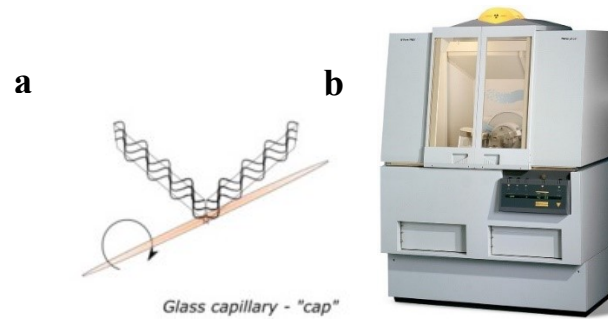


Figure 28 : a. Analyse effectuée avec une analyse par DRX. (Nowak et al., 2018). Instrument d'analyse. b. Panalytical Empyrean diffractomètre avec le détecteur PIXcel (225 canaux) et une anode tube en Cu ($K\alpha_1 = 1,5406 \text{ \AA}$) à 45 kV et 40 mA (Nowak et al., 2018 ; Paris Diderot UFR de Chimie, 2018).

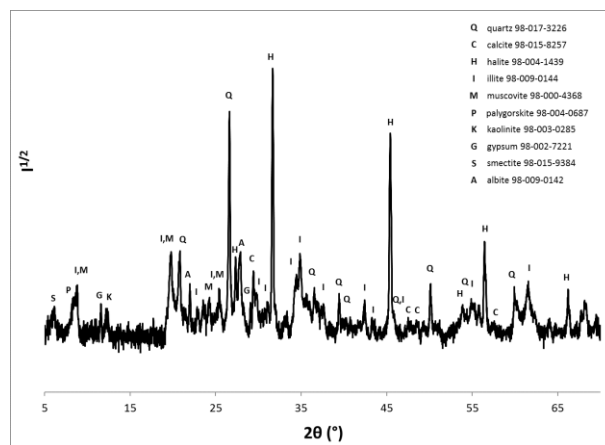


Figure 29 : Identification des pics (p. ex. échantillon H131 de la vallée du Huab). Axe des x : Angle. Axe des y : Intensité. Créée par : Sophie Nowak.

2.2.4.5: SFX

La mesure SFX (Spectromètre de Fluorescence X Panalytical 2404, 4 kW) permet d'étudier la composition élémentaire des sols et aérosols en fractionnant les rayons X par spectrométrie. Au minimum, 11 échantillons par transect des filtres du CESAM et les échantillons de sols tamisés $< 63 \mu\text{m}$ sont analysés. Les éléments analysés sont les suivants : Cl, Ca, Fe, Na, Mg, Al, Si, P, K, Ti, Mn, V, Ni, S. Ceux-ci ont été sélectionnés pour différentes raisons : les éléments traces (11 premiers) nous informe sur les éléments minéralogiques ou marins, les deux suivants sont reliés aux activités anthropiques potentielles, puis le dernier sert à comparer l'apport en soufre selon les sources continentales ou océaniques.

Les filtres peuvent être directement analysés par SFX, puisque cette méthode analyse les poussières sur un filtre en polycarbonate Nuclepore $0,43 \mu\text{m}$, aucune manipulation supplémentaire n'est effectuée. En ce qui concerne les échantillons de sol, $12 \mu\text{g}$ est dilué dans 30 ml d'éthanol, puis déposé sur un filtre en polycarbonate Nuclepore Whatman™ $0,4 \mu\text{m}$, pour obtenir une concentration totale de $200 \mu\text{m cm}^{-2}$ sur le filtre (masse acceptable à la représentation d'éléments lourds versus les éléments plus légers) (Saad et al., 2018). Afin d'assurer une homogénéité des particules sur le filtre, le sol est broyé, déposé dans l'éthanol puis placé dans un bain ultrasonique (environ 1 minute). 1 ml du liquide est finalement déposé au centre du filtre (Figure 30). La Figure 32 présente un exemple théorique du principe appliqué aux éléments sur les échantillons (Figure 31) : le rayon émis bombarde l'échantillon, qui est par la suite transféré au détecteur. Les résultats seront ensuite interprétés sur un graphique à l'ordinateur (Dean, 2014).



Figure 30 : Station de traitement. Déposition de 1 ml de $12 \mu\text{g}$ de sol $< 63 \mu\text{m}$, dilués dans 30 ml d'éthanol. Photo : Amélie Chaput



Figure 31 : Instrument d'analyse : Spectromètre de Fluorescence X Panalytical 2404, 4 kW, dispersif en longueur d'onde photo : Amélie Chaput.

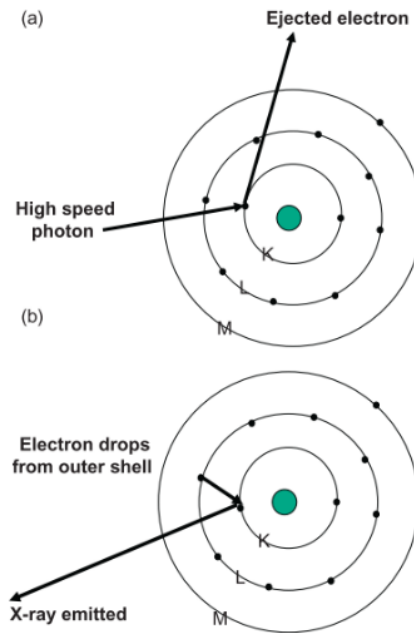


Figure 32 : Principe de Spectromètre de Fluorescence X : a) Perte d'un électron de la couche interne de l'atome après radiation par rayons X. b) Transfert d'un électron à un autre état, afin de remplir le vide créé par l'émission du rayon X (état d'énergie inférieur) résultant de l'émission d'un rayon X (Dean, 2014).

L'avantage de cette méthode se trouve au niveau de la grande gamme d'éléments qui peuvent être analysés pour un traitement. Il faut toutefois considérer certaines sources d'erreurs telles qu'un manque d'homogénéité si les échantillons ne sont pas convenablement broyés (Klotz et al., 2015). Ce problème peut être ajusté, mais elle reste moins précise que d'autres techniques telles que l'analyse par perle à l'aide du « Panalytical Empyrean diffractometer », comme par exemple, la mise sur perle assure une homogénéité des particules puisque celles-ci sont fondues sous forme de pastille. Cette méthode n'offre toutefois pas la possibilité d'analyser avec une précision suffisante des éléments tels que le soufre, puisque cet élément s'évapore lors de la fonte de sol (Klotz et al., 2015). D'autres méthodes telles que l'identification d'éléments singuliers (« Scanning électron microscope ») offrent une résolution spatiale supérieure, mais n'offrent pas d'informations moléculaires ni de concentration comparative entre les différents éléments d'un échantillon complet (Signorell and Reid, 2010). L'analyse de fluorescence de rayons X avec le Spectromètre de Fluorescence X Panalytical 2404 par mise sur filtre reste ainsi la meilleure option en fonction des éléments à analyser.

2.2.4.6: *Composition élémentaire*

Puisque l'objectif vise à évaluer la concentration des éléments émis sous forme de poussière des trois sols échantillonnés, il est nécessaire d'apporter une correction aux aérosols. Afin d'évaluer la concentration en poussière minérale, l'aluminium fut sélectionné en tant qu'élément trace, puisque la seule source d'émission provient des poussières minérales (Acta & Ireland, 1964 ; Saad et al., 2018) :

$$MD = Al/0.08 \quad (5)$$

En ce qui a trait aux sols, comme mentionné plus haut, 1 ml de solution composée de 0,12 µg de sol (< 63 µm) dans 30 ml d'éthanol fut déposé sur des filtres de polycarbonates nuclépore Whatman™ (0,4 µm). Puisqu'il est question de comparer les aérosols et les sols entre eux, il faudrait aussi appliquer la transformation pour étudier les éléments enrichissants.

2.2.5: Analyses statistiques

Dans un premier temps, l'utilisation des statistiques pour ce projet permet l'identification des associations entre les nutriments, minéraux et distribution granulométrique des échantillons de sols. Les premières analyses visent à observer la distribution des données et vérifier s'ils répondent aux critères des analyses statistiques paramétriques (Tableau 8 - Tableau 9).

En deuxième partie il sera question d'explorer puis interpréter la relation entre les variables au travers de tests statistiques paramétriques et/ou non paramétriques. Les analyses cherchent à observer la relation entre les variables de composition minéralogique et élémentaire versus la taille des particules. L'utilisation des tests paramétriques et non paramétriques pour ce projet permet l'identification de groupements similaires et relations entre les différentes composantes environnementales. Cela permet ainsi de caractériser les sites afin d'étudier les différences entre elles (Figure 33).

Tableau 8 : Analyses statistiques des trois sites, selon les données récoltées : 1) Distribution en taille des particules ; 2) Composition minéralogique du sol (< 60 µm) ; 3) Composition élémentaire (a. <20 µm; b. < 60 µm) (Legendre and Legendre, 2012; Paliy and Shankar, 2016).

Analyses statistiques

Pour répondre aux hypothèses de départ suivantes: 1. La distribution en taille des particules des sols et aérosols varient significativement selon les trois sites; 2. La composition élémentaire et minéralogique des sols et aérosols ne varie pas significativement entre les sites;

Question de recherche	Analyses
Est-ce que mes données pour les trois sites combinées peuvent répondre aux contraintes d'un test paramétrique?	Statistiques descriptives; mesures de kurtosis et skewness; tests normalité et analyses de régressions;
Est-ce que chacun des sites individuels peut répondre aux contraintes d'un test paramétrique?	
Est-il possible d'observer des patrons similaires entre les variables, c'est-à-dire entre la taille des particules, la composition minéralogique, ainsi que la composition élémentaire?	Si test paramétrique possible: ANOVA/ANCOVA; Si test paramétrique non possible: ACoP et analyses de groupements sur la variable 'y';

Tableau 9 : Description des analyses statistiques effectuées sur les résultats du mémoire avant les tests statistiques.

Tests statistiques-R	Description
Skewness	0 = distribution symétrique; négatif = distribution droite; positif = distribution gauche;
Kruskall.test	<0,05: ne suit pas une loi normale. Test non-paramétrique basé sur les médianes;
Shapiro.test	>0,05: suit une loi normale. Test de comparaison de variance de la moyenne;
Kurtosis	Coefficient d'aplatissement. Si la distribution est mésokurtique donc normale, le coefficient = 0; > 1 = distribution avec pic important; < -1 = distribution trop plane;
Skewness	Coefficient d'assymétrie. Si la distribution est symétrique, le coefficient = 0;
Bartlett.test	Homogénéité des variances: <0.05 = différence significatives;
post.hoc.kruskal	<0,05: échantillons significativement différents;

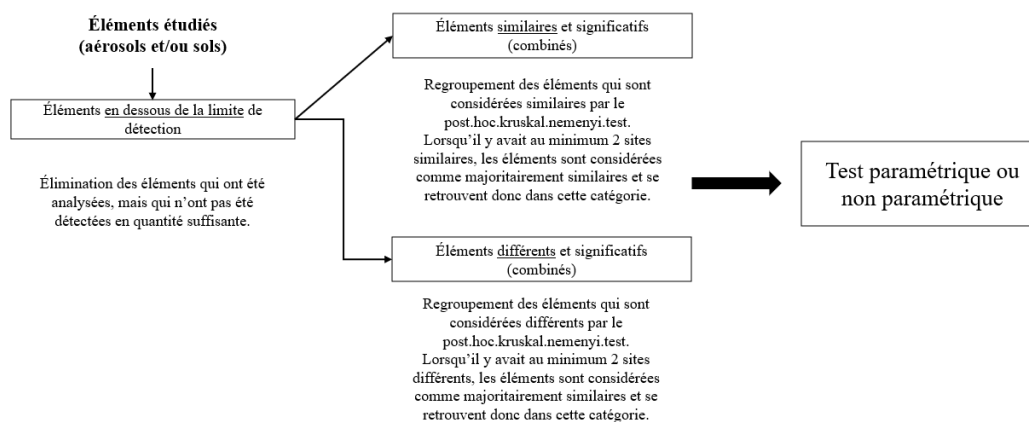


Figure 33 : Arbre de décision pour le regroupement des éléments (similaires ou différents), selon la limite de détection et le test de similarité de post- hoc. Kruskal. Nemenyi. Les éléments inférieurs à la limite de détection ont été éliminés pour l'analyse alors que les éléments similaires et différents seront traités.

Chapitre 3: Résultats

Cette section a pour but de présenter et décrire les résultats ainsi que les analyses statistiques appliquées sur les données traitées en laboratoire. La prochaine section se divise en quatre parties : 3.1: Résultats généraux ; 3.2: Distribution en taille des particules ; 3.3: Minéralogie ; 3.4: Composition élémentaire ; 3.5: Analyses statistiques. La distribution en taille des particules fut déterminée en fonction du tamisage (STP) et l'utilisation du compteur de particules Coulter (STPC). La composition minéralogique des sols furent analysés par DRX (STPM), alors que la composition élémentaire des sols et aérosols par SFX (STPE-STAE). Finalement, après avoir effectué des tests statistiques préliminaires pour observer les similarités entre les sites, il fut déterminé que l'analyse en correspondance principale (ACOP) convient à la méthode de comparaison et groupement la plus adéquate.

3.1: Résultats généraux

Pour les données d'échantillons à l'étude, l'écart-type de la taille des particules le plus important se retrouve au site du Huab (18,98 %), signifiant une grande variation de l'importante des particules de poussières dans les échantillons (Tableau 10). Il semble d'ailleurs que le Huab présente la plus grande quantité de sédiments fins (26,44 %) en relation notamment avec la grande quantité d'argile dans le sol à 26,96 % (Figure 34). Le Kuiseb et le Omaruru possèdent un intervalle plus restreint (Kuisseb à 0,80 % et Omaruru 0,52 %) et une quantité de particules fines moins importante (Kuisseb a 8,10 % et Omaruru à 38,54 %). Leur minéralogique s'avère similaire au niveau de la composition (forte présence en quartz et en minéraux ferreux). Toutefois, le ratio de la composition ainsi que la composition élémentaire comportent certaines différences (Figure 35 - Figure 37) et leur distribution en taille de particules varie aussi (Figure 34). Il est donc nécessaire d'aller voir les résultats plus en détail afin de vérifier si l'écart des différences est significatif entre les sites.

Tableau 10 : Résumé des résultats d'analyses sur les échantillons de la campagne en Namibie à l'été 2017 pour les sites du Huab, du Kuiseb et du Omaruru. Les éléments étudiés sont la taille des particules (μm), le pourcentage de masse des échantillons tamisés, la minéralogie du sol (analyse DRX) et la composition élémentaire (analyse SFX).

Sites	Coulter: Taille des particules (μm)	STP (% masse)	Minéralogie du sol	Composition élémentaire
Huab	3,7 μm	Moyenne: 26,44%	Haute présence d'argile;	Moyennes généralement supérieur aux autres pour les STAE. Moyennes similaires aux autres pour les STPE. <i>Plus grande importance en Fe, Ca et Mg</i> <i>Plus grande importance en S, Fe et Mg;</i>
	26,2 μm	Écart-type: 18,98%		
Kuiseb	3,4 μm	Moyenne: 1,44%	Haute présence de Feldspath	Moyennes généralement plus basses que les autres sites pour les STAE. Moyennes similaires aux autres sites pour les STPE; <i>Faible importance des éléments enrichissants (importance du Fe);</i> <i>Grande importance en Fe, Ca Ti;</i>
	31,2 μm	Écart-type: 0,80	Petite présence de particules d'argile	
Omaruru	7 μm	Moyenne: 1,42%	Haute présence de feldspath et autre minéraux (e.g. muscovite)	Moyennes généralement petites mais supérieures au Kuiseb. <i>Grand pic pour le Ca, Improtance en Fe et K;</i> <i>Importance du Fe, K et Ca;</i>
	44,5 μm	Écart-type: 0,52%	Petite présence de particules d'argile	

Légende: *Aérosols* : transport long terme (STAE); *Sols*: transport court terme (STPE)

3.2: Distribution en taille des particules

Pour chaque site, au minimum 20 échantillons ont été traités (Huab 20, Kuiseb 30, Omaruru 22), dont l'analyse d'un même échantillon fut répliquée trois fois. Selon les résultats de la Figure 34 et du Tableau 11, il est possible d'observer que les trois grandes séparations suivent la tendance globale (Tableau 10). Le Huab comporte le ratio le plus important au niveau des particules <63 μm (différence d'environ 25 %), le Kuiseb possède la quantité la plus importante de particules autour des 200 μm (différence d'environ 26-30 %), alors que pour le Omaruru, le pourcentage est le plus élevé autour des 300 μm (différence entre 30 et 33 %). À noter que les trois présentent une moyenne élevée autour du 200 μm et que les différences s'observent lors de la comparaison des autres intervalles de taille de particules. En ce qui a trait aux écarts-types moyens, il semble que les variations les plus importantes se trouvent aux mêmes intervalles que les ratios les plus élevés.

Tableau 11 : Résumé de la distribution en taille des particules (% masse) selon les échantillons tamisés. Données collectées lors de la campagne en Namibie à l'été 2017.

	> 300 µm	200 µm	80 µm	<63 µm
Huab				
Moyenne (%)	5,04	54,25	14,27	26,44
Moyenne écart-type (%)	4,74	21,06	11,38	18,98
Kuiseb				
Moyenne	8,10	83,76	6,70	1,44
Moyenne écart-type (%)	9,32	11,97	6,74	0,80
Omaruru				
Moyenne	38,54	57,48	2,55	1,42
Moyenne écart-type (%)	15,71	15,41	1,11	0,52

Afin de voir si cette variation importante avait un impact sur les résultats pour les résultats du Coulter (Figure 34), il a été nécessaire d'appliquer un test de similarité (Analyse de pente Test de Student) pour les échantillons qui ont été traités (STPC). De manière générale il y a une différence observable entre les sites ($p < 0,05$), à l'exception du Kuiseb et du Omaruru pour les particules $< 20 \mu\text{m}$ ($p > 0,05$). Il n'est donc pas possible de conclure que les trois sites possèdent dans l'ensemble une distribution similaire.

En regardant les résultats $< 63 \mu\text{m}$ du Coulter (STPC), il est en effet possible d'observer une variation assez importante à partir d'environ $5 \mu\text{m}$ et plus : le Huab possède une différence entre 1,25 % et 2,75 % de $5 \mu\text{m}$ à $10 \mu\text{m}$ avec les autres sites. La pente du Huab est considérablement plus élevée entre $5 \mu\text{m}$ et $30 \mu\text{m}$, alors que la pente pour le Omaruru et le Kuiseb croît autour du $30 \mu\text{m}$. Il est possible de constater que les différences entre les sites sont observées à la fois pour les particules fines ($< 63 \mu\text{m}$) du Coulter (Figure 34) et les données de tamisage (Tableau 11).

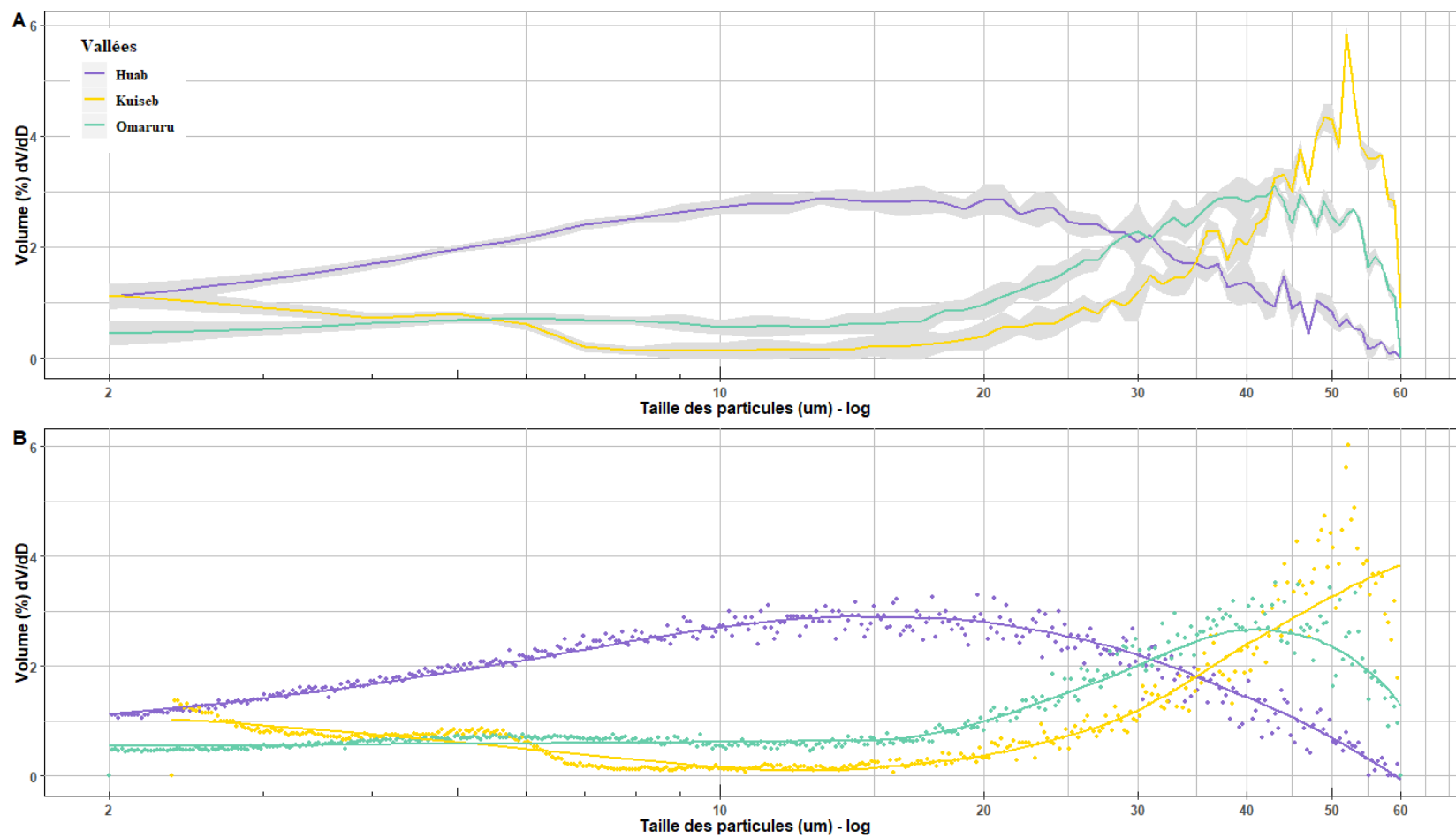


Figure 34 : Résultats d'analyses du Multisizer 4e par la méthode Coulter pour les trois vallées (Huab, Kuiseb, Omaruru) selon les données collectées : 2017. A. Différences en volume (Moyenne %) ; B. Régression locale des différences en volume (Moyenne %) en \log^{10} . L'axe des x représente la taille des particules (μm) - log, l'axe des y représente le volume (%) dV/dD

3.3: Minéralogie du sol

Selon les résultats du Tableau 12, la plus grande différence en composition minéralogique se retrouve au niveau des argiles (~ 26 %). En effet le possède a une haute teneur en argile (~ 27 %) alors que le Kuiseb possède le plus haut pourcentage de SiO₂ (~ 55 %). Le Omaruru dépasse faiblement les autres sites dans la catégorie des feldspaths à 43 % et autres à 18 % (p. ex. microcline).

Tableau 12 : Groupement résumé des minéraux d'échantillons de sol, selon les trois sites à l'étude (Huab, Kuiseb, Omaruru). Les résultats sont séparés en groupes minéralogiques (%).

Groupes/sites	Huab	Kuiseb	Omaruru
Groupe SiO₂	34,6	54,8	38,05
Groupe des Feldspaths	25,81	38,42	42,56
Argiles	26,96	1,79	1,31
Autres	12,62	5,31	18,11

La Figure 35 permet une représentation plus détaillée de la distribution de composition minéralogique des échantillons STPM. Ainsi il est possible d'observer que certaines différences majeures. Un pic au niveau du quartz (~ 55 %), et de l'albite (~ 35 %) pour le Kuiseb, un pic au niveau de la muscovite (~ 12 %) et microcline (~ 16 %) pour le Omaruru, puis un pic important de l'illite (~ 22 %) au niveau du Huab.

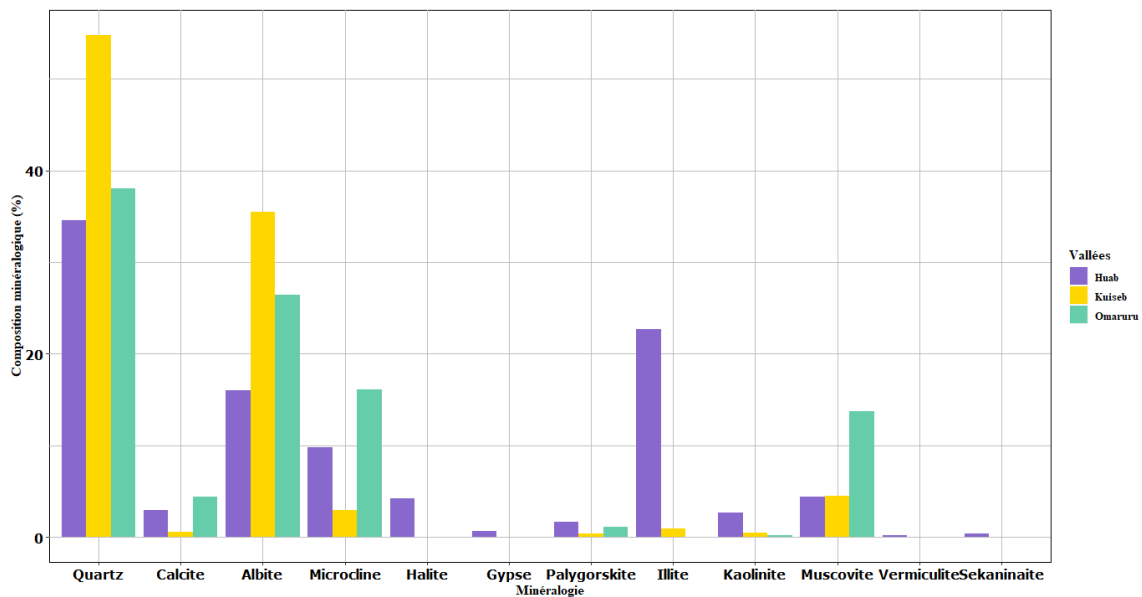


Figure 35 : Composition minéralogique des sols selon les trois sites à l'étude. L'axe des x représente le type de minéralogie et l'axe des y représente la composition minéralogique (%).

Afin d'aider à la visualisation des résultats statistiques, il est nécessaire d'éliminer les éléments considérés comme inférieurs à la détection limite (Figure 36). Le test post-hoc de Kruskal

et Nemenyi permet ensuite de faire ressortir les éléments plus importants à comparer entre les sites (Tableau 13), pour effectuer un test statistique de similarité en intégrant toutes les variables à l'étude (STPM). Les variables se trouvent éliminées lorsque la moyenne de la limite de détection était retrouvée dans 2 sites sur 3 : halite, gypse, vermiculite, sekaninaite.

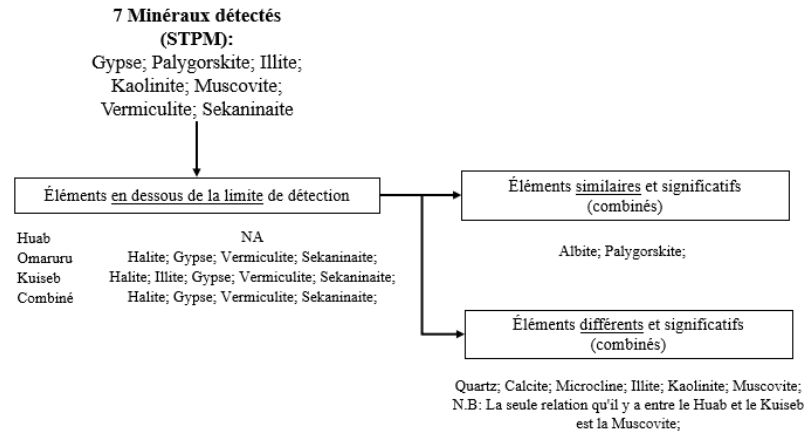


Figure 36 : Arbre de décision pour le regroupement de minéralogie (similaires ou différents), selon la limite de détection et le test de similarité de post-hoc. Kruskal. Nemenyi. Les éléments inférieurs à la limite de détection ont été éliminés pour l'analyse alors que les éléments similaires et différents seront traités.

Le Tableau 13 permet d'étudier les similarités et les différences des éléments en relation avec les sites. Lorsque la valeur était $< 0,05$, la variable des sites est considérée statistiquement différente. Ces données permettent d'effectuer un tri entre les variables à éliminer et celles à intégrer dans l'analyse statistique à la section 3.5.:

Tableau 13 : Test de post-hoc. Kruskal. Nemenyi sur l'ensemble des sites à l'étude selon la composition minéralogique. En gras constitue les sites statistiquement similaires (lorsque plus de deux sites sont considérés comme significatifs), alors que le contraire signifie que les sites sont statistiquement différents.

	Test post-hoc Kruskal, Nemenyi							
	Quartz	Calcite	Albite	Microcline	Palygorskite	Illite	Kaolinite	Muscovite
Huab-Kuiseb	<0,05	<0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<u>>0,05</u>
Huab-Omaruru	<u>>0,05</u>	<u>>0,05</u>	<u>>0,05</u>	<u>>0,05</u>	<u>>0,05</u>	0,00	<0,05	<0,05
Omaruru-Kuiseb	<0,05	<0,05	<u>>0,05</u>	0,00	<u>>0,05</u>	<u>>0,05</u>	<u>>0,05</u>	<0,05

3.4: Composition élémentaire

La Figure 37 permet de comparer les éléments entre les STAE et les STPE. Le Si correspond à l'élément dominant, à la fois dans les STAE et les STPE. En ce qui a trait à la tendance générale des STAE, le Fe correspond à l'élément principal enrichissant, suivi du Mg, K et Ca (leur concentration varie selon les sites). Il est possible d'observer que le Huab possède toujours le pic le plus élevé en concentration. Pour les STPE, il y a une forte concentration en Fe, Ca et Ti, mais seulement pour la vallée du Kuiseb. Contrairement aux STAE, le Huab ne possède pas toujours le pic le plus important en concentration. À noter aussi que les sites sont visuellement similaires en termes de concentrations, pour une majorité des éléments.

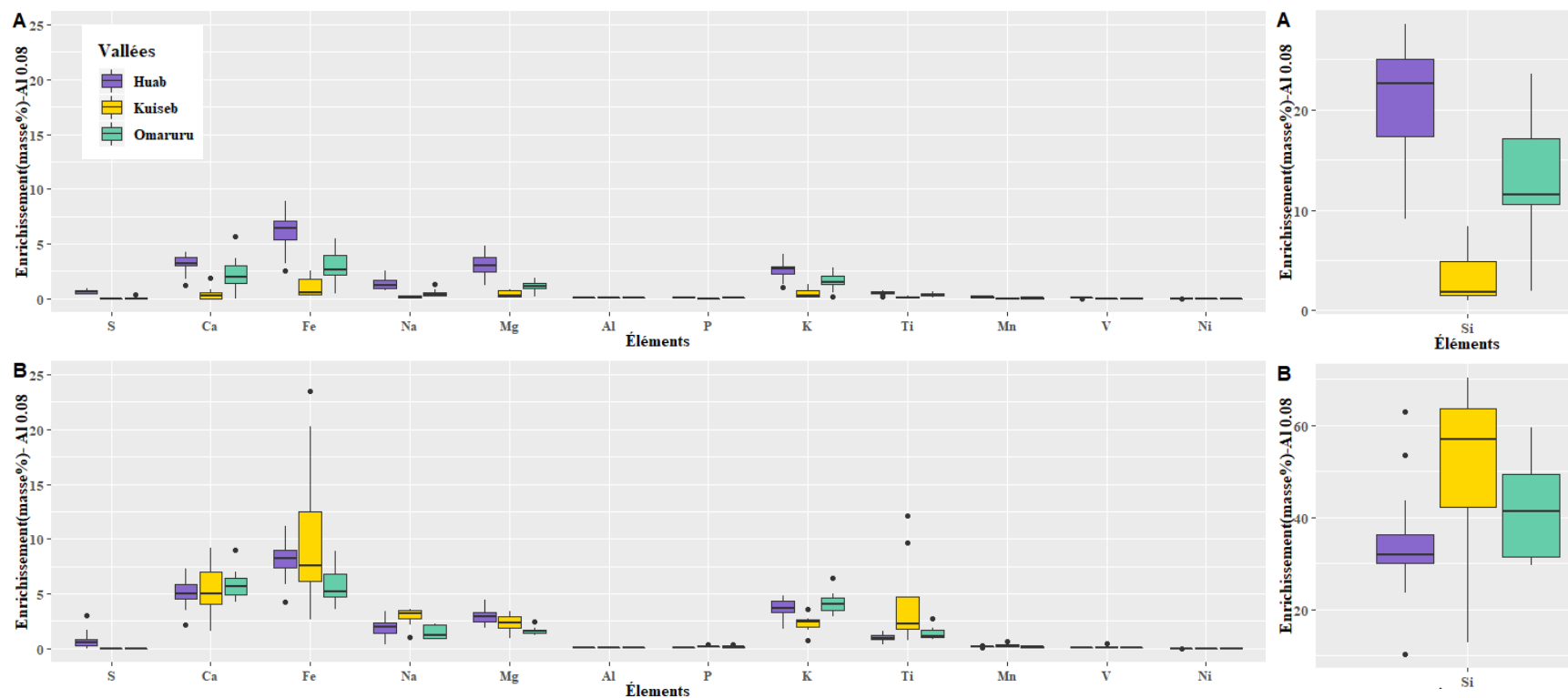


Figure 37 : A. Ratio d'enrichissement des échantillons de STAE. B. Ratio d'enrichissement des échantillons de STPE. Les échantillons de STPE furent récoltés en 2017, alors que les STAE furent générés dans le CESAM à l'été 2017 (vallées du Huab, Kuiseb et Omaruru). L'unité des valeurs originales se trouvait sous forme de masse, puis a été transformée sur un ratio commun (Al – 0,08).

Pour assurer une homogénéité dans les analyses, la même série de tests utilisée pour éliminer des variables non détectées de la minéralogie sera appliquée à la composition élémentaire (malgré que certaines variables suivent une loi normale). Cette fois-ci, le test sera effectué pour les STPE et les STAE (Figure 38). Les variables éliminées sont celles dont la moyenne de la limite de détection était retrouvée dans 2 sites sur 3 : le Cl, S, Mn, V et Ni pour les aérosols et le Cl, S et Ni pour les sols.

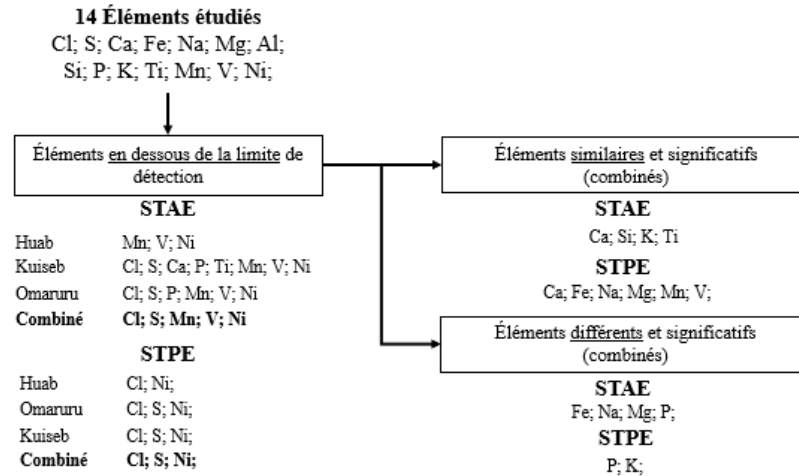


Figure 38 : Arbre de décision pour le regroupement de la composition élémentaire (similaires ou différents), selon la limite de détection et le test de similarité de post-hoc. Kruskal. Nemenyi. Les éléments inférieurs à la limite de détection ont été éliminés pour l'analyse alors que les éléments similaires et différents seront traités.

Tel qu'effectué pour la minéralogie, le Tableau 14 permet d'étudier les similarités et les différences des éléments en relation avec les sites. Lorsque la valeur était $< 0,05$, la variable des sites est considérée statistiquement différente. Ces données permettent d'effectuer un tri entre les variables à éliminer et celles à intégrer dans l'analyse statistique à la section 3.5.:

Tableau 14 : Test de post-hoc. Kruskal. Nemenyi sur l'ensemble des sites à l'étude selon la composition élémentaire. En gras constituent les sites statistiquement similaires (lorsque plus de deux sites sont considérés comme significatifs), alors que le contraire signifie que les sites sont statistiquement différents.

Tests / Composition élémentaire	Test post-hoc Kruskal, Nemenyi pour l'ensemble des sites pour les aérosols - STAE									
	Ca	Fe	Na	Mg	Si	P	K	Ti	Mn	V
HUAB-KUISEB	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
HUAB-OMARURU	>0,05	<0,05	<0,05	<0,05	>0,05	<0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05
OMARURU-KUISEB	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05
Tests / Composition élémentaire	Test post-hoc Kruskal Nemenyi pour l'ensemble des sites pour les sols - STPE									
	Ca	Fe	Na	Mg	Si	P	K	Ti	Mn	V
HUAB-KUISEB	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	>0,05	>0,05
HUAB-OMARURU	>0,05	<0,05	>0,05	<0,05	>0,05	<0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05
OMARURU-KUISEB	>0,05	>0,05	<0,05	>0,05	>0,05	>0,05	<0,05	>0,05	>0,05	>0,05

Selon les résultats, il semble que les éléments présentent de fortes similarités entre les sites pour les STPE alors qu'il y a une différence au niveau des STAE. Les relations qui deviennent non significatives au niveau des STAE sont les suivantes : entre le Huab et le Kuiseb il y a le Ca ; Fe ; Na, Mg et entre le Huab et le Omaruru il y a le Na. À noter toutefois que le Omaruru et le Kuiseb présentent des résultats similaires dans l'ensemble des éléments de STAE, alors que deux diffèrent au niveau des STPE (Na, K) (Figure 37 -Tableau 15).

Tableau 15 : Différence des moyennes élémentaires entre les aérosols générés par le CESAM (STAE) ainsi que les échantillons de sol tamisé à 63 µm (STPE). En gras constituent les sites statistiquement similaires (lorsque plus de deux sites sont considérés significatifs), alors que le contraire signifie que les sites sont statistiquement différents. Données récoltées à l'été 2017, puis traitées en 2018 pour la vallée du Huab, Kuiseb et du Omaruru.

Différence entre les résultats de STPE et STAE								
Groupe	Ca	Fe	Na	Mg	Si	P	K	Ti
Huab	1,89	1,99	0,44	-0,08	14,15	-0,01	1,15	0,44
Kuiseb	5,03	9,35	2,72	1,95	47,63	0,18	1,80	4,09
Omaruru	3,66	2,86	0,98	0,52	29,70	0,12	2,65	1,08

Selon les résultats d'analyse (Figure 37), il y a une forte contribution des STAE en Si (entre 3 et 20 %), Fe, (entre ~ 1 et 6 %) et Ca (entre ~ 0,5 et 3 %), ainsi qu'un faible enrichissement et Na (entre ~0,2 et 1,4 %), K (entre (~ 0,5 et 2,5 %). Malgré que certains éléments restent similaires, le pourcentage de contribution varie selon les éléments de STPE : forte contribution du Si (~ 42,6 %), le Fe (entre ~ 5,7 et 10,4 %), le Ca (~ 5,5 %) et le K (entre ~ 2,3 et 4,2 %). En ce qui a trait aux différences entre les échantillons STAE et STPE (Tableau 15), la différence au niveau du Si est remarquable (entre ~ 14,2 et 47,6), puis du Fe au niveau du Kuiseb, ainsi que le Ca et le Ti. Dans l'ensemble les différences les plus importantes sont observées pour le site du Kuiseb, alors que les différences les moins importantes sont notées au niveau du Huab.

3.5: Analyses statistiques

3.5.1: Tests préliminaires

Les analyses de pentes de Kurtosis et d'asymétrie furent effectuées pour vérifier si les données suivent une loi normale (Tab_B 4 -Tab_B 5). Couplé au test de Shapiro et le test de Kruskal-Wallis (Tab_B 2), il est possible de conclure que les données ne suivent pas une loi normale (aucune valeur du test n'était $< 0,05$) et que les données ne sont pas réparties de façon homogène (aucune variable n'était considérée homogène, donc $< 0,05$, selon le test de Bartlett). Dans ce cas, si le nombre d'échantillons s'avère insuffisant pour assurer une bonne représentativité ou que les données ne suivent pas une courbe gaussienne, les analyses de correspondances et d'ordinations (p. ex. ACP, ACoP, RDA, etc.) sont préférables aux tests paramétriques telles que la MANOVA (Legendre and Legendre, 2012).

Tel que pour la minéralogie, les tests de préanalyses furent effectués afin de vérifier si les données suivent une loi normale (Tab_B 4). Si quelques variables suivent une loi gaussienne, appuyés par les résultats d'asymétrie et Kurtosis (Tab_B 3), ils ne respectent tout de même pas le critère de loi normale ainsi que d'homogénéité des variances pour effectuer un test paramétrique. Selon le test post hoc de Kruskal et Nemenyi, la majorité des éléments sont significativement similaires entre les sites au niveau des STPE. Il y a une différence entre termes d'intervalles, donc minimum et maximum des valeurs observables (Tableau 14). Cela pourrait accentuer la moyenne en raison de valeurs abstraites : un exemple serait la concentration en Fe dans les échantillons de STPE, il serait nécessaire de porter attention à une valeur élevée au niveau du Kuiseb pour ce cas, considérant qu'il semble y avoir un échantillon avec une concentration particulièrement plus élevée, alors que la médiane reste plus basse que l'échantillon du Huab. Pour donner suite à l'observation des tendances et de la distribution des résultats, l'analyse d'ordination en coordonnées principales a été déterminée comme la meilleure méthode d'analyse. Cette analyse permet de faire ressortir les similarités entre les variables selon leur importance et ainsi observer si certaines variables abstraites sont retrouvées dans les échantillons afin de les considérer dans l'interprétation des résultats.

3.5.2: Analyse de similarité

L'analyse qui a été effectuée se voulait une analyse globale des échantillons selon la taille des particules (STPC), la composition élémentaire (STPE, STAE) ainsi que la composition minéralogique (STPM) (Figure 39). Considérant que les données ne suivent pas une loi normale et considérant la quantité des échantillons analysés, la quantité totale des échantillons possédant toutes les variables reste insuffisante pour procéder à une analyse paramétrique. Il est donc question d'effectuer une première analyse non paramétrique, c'est-à-dire l'analyse en correspondance principale avec toutes les variables à l'étude. Cette méthode s'avère la plus adéquate considérant que le nombre d'échantillonnages est différent pour tous les sites et le peu d'échantillons disponibles. L'objectif vise donc l'étude des similarités ainsi que visualiser les données abstraites (Figure 39).

Premier axe :

- L'illite, la Kaolinite et les particules de 5 μm et 15 μm semblent être regroupés dans le même quadrant que le Huab.
- Le Ti, V, et particules 55 μm sont regroupés ensembles dans le même quadrant que le Kuiseb.
- Les particules 35 μm et 45 μm sont situés dans le quadrant situé en haut à gauche, mais ont une influence moins importante que les autres quadrants. À noter que malgré que la catégorie de 45 μm se retrouve dans le quadrant près du Omaruru, il semble y a avoir une relation plus importante avec le Kuiseb que le Huab.

Deuxième axe :

- L'illite et la Kaolinite causent aussi un effet important dans le deuxième axe, rattaché au Huab. Cela indique que l'influence des argiles est observée globalement au travers ces échantillons.
- Le Ti semble être rattaché particulièrement au Kuiseb, même si cette influence reste moins importante qu'entre l'illite et le Huab.
- La muscovite semble avoir une importance au niveau du deuxième axe, rattaché au Omaruru. Son influence reste importante seulement dans l'axe 2.
- Il y a une plus grande importance de l'influence de la Microcline et la Calcite vers le Omaruru que pour les autres sites. Il semble d'ailleurs avoir une forte relation entre ces deux minéraux.

Dans l'ensemble il est possible de conclure que la différence la plus importante notée se situe au niveau de l'axe 1, qui permet d'observer la relation entre les argiles et le Huab. Dans le deuxième axe il est possible d'observer des relations secondaires : une importance de la Muscovite pour le Omaruru avec des particules fines, mais considérées comme des poussières se déplaçant sur de courtes distances, puis une relation entre les particules plus grossières (45 μm et 55 μm) et des éléments lourds (Ti, V) avec le Kuiseb. À noter aussi que les éléments d'aérosols sont fortement associés au Huab, contrairement aux autres sites.

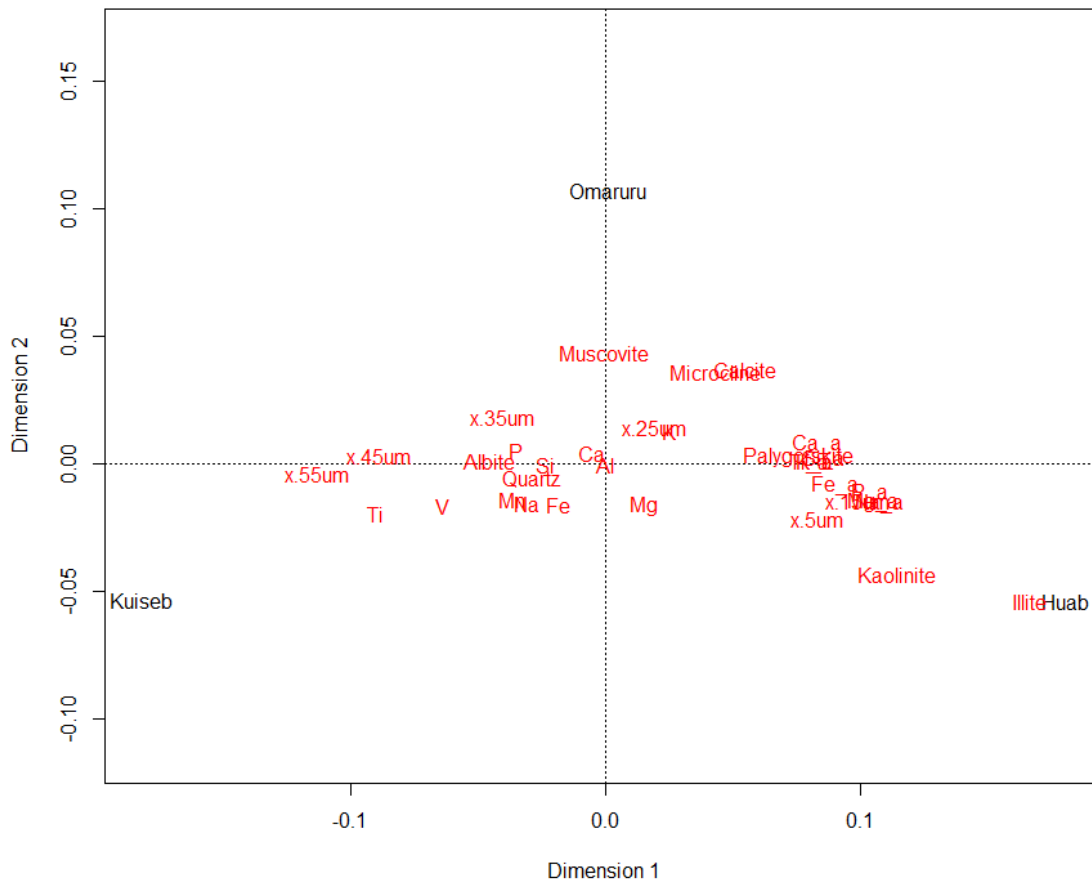


Figure 39 : Résultats d'une PCoA regroupant les informations sur les échantillons de STPE, STAE, STPM et STPC. Les éléments suivis d'un « _a » (p. ex. Ca_a) représentent les échantillons de STAE.

Chapitre 4: Discussion et conclusion des résultats

D'après les caractéristiques des vents, la géomorphologie des sites et des connaissances scientifiques, il est attendu que les sites possèdent des caractéristiques différentes au niveau de la STPE, STPM et des STPC, mais une plus grande similarité au niveau des STAE (Tableau 10). Conformément à la littérature, même si la taille des particules varie selon les sites, les STAE sont considérés comme similaires entre les sites. Les aérosols sont généralement plus homogènes, il était donc attendu que seule une faible variation soit présente. Cependant les vents du sud jouent un rôle important et les sites comportent des différences environnementales (Section 1.3: Circulation atmosphérique), ce qui pourrait avoir un impact sur le potentiel d'émission. Ainsi, malgré une certaine similarité dans les éléments, l'hypothèse reste tout de même que la distribution en taille des particules des sols (STPC) et aérosols (STPC) varie significativement selon les trois sites. Il est considéré que le type d'environnement duquel sont constituées les vallées varie grandement en termes de superficie, végétation, précipitation reçue, type de matériel parental, etc. Afin d'étudier les résultats de manière adéquate, le chapitre sera divisé en deux grandes sections :4.1:Interprétation des résultats, 4.2:Relation entre les variables à l'étude.

4.1: Interprétation des résultats

4.1.1: Quelle est la distribution en taille des poussières émises en région côtière ?

Selon la première hypothèse, la distribution en taille des particules des sols (STPC) et aérosols (STPC) varie significativement selon les trois sites. Considérant la grande variabilité des processus géologiques et géomorphologiques, des sources d'émissions et aux divers processus d'érosion, une variation de la composition du sol à l'échelle régionale est prévue. Conséquemment, les interactions entre dunes, rivières éphémères et la végétation modifient la dynamique de transport des sédiments. Une même région peut donc posséder une distribution en taille des particules variable selon la localisation des échantillons au sein de la vallée. En ce qui a trait à la distribution en taille de particules (Figure 40), puisque les échantillons ont été récoltés dans cette même vallée, il est attendu que les résultats de STPC pour la vallée du Huab correspondent à la tendance de la section « Channel Fine » présentée à la Figure 40. Par conséquent, il est attendu que les résultats de STPC s'avèrent différents pour la vallée du Omaruru et du Kuiseb.

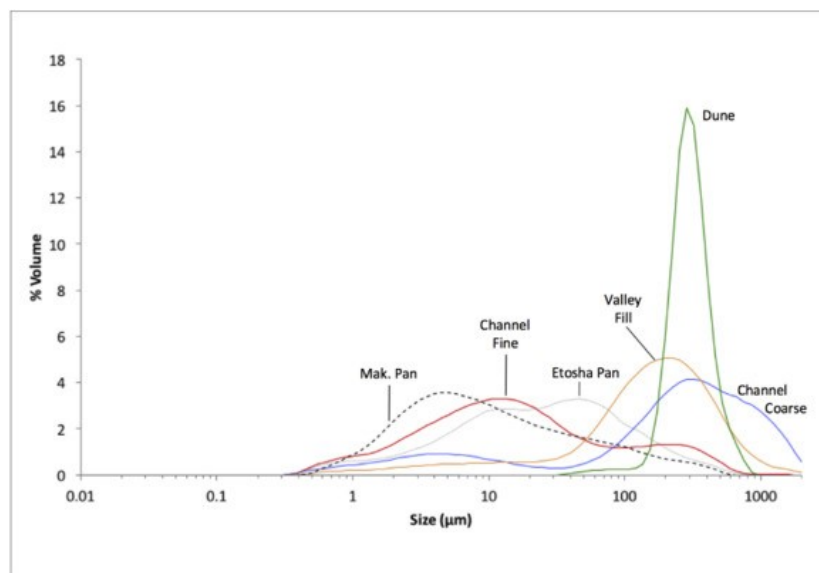


Figure 40 : Variation des formations géomorphologiques, selon la quantité et la taille des particules (échantillons de croûtes et sous-croûtes du « Etosha Pan », « Makgadikgadi Pan »). (Dansie et al., 2017)

En comparant les résultats de distribution en taille de particules de la Figure 40, il est possible de constater que la variation du « Channel Fine » ressemble à la distribution de la vallée du Huab (Figure 34). Cette observation ne s'applique pas aux deux autres vallées. En effet celles-ci semblent se rattacher à une distribution entre le « Channel Coarse » et « Valley Fill », ce qui concorde aussi avec les données de tamisages (Tableau 11). Cela s'explique en partie du fait que la géomorphologie des trois sites diffère. Le site du Huab se retrouve en zone où les rivières éphémères sont actives durant l'été, alors que le Omaruru se situe dans une zone plus plane et plus sèche. Le Kuiseb quant à lui se localise à proximité d'un champ de dunes et le désert de sable ce qui pourrait expliquer la grande quantité de particules de sable (d'ailleurs observé dans la composition minéralogique par l'importance plus grande en quartz).

Considérant la fréquence des émissions observées par image satellitaire dans les vallées du Omaruru et du Kuiseb, il est donc exact de présumer qu'il y a potentiellement plusieurs mécanismes responsables de l'émission des particules < 20 µm en région côtière. En effet, c'est au niveau des particules < 20 µm, que la vallée du Kuiseb et du Omaruru sont statistiquement similaires, mais leur distribution en taille > 20 µm se trouvent significativement différents, laissant croire que le potentiel d'émission sera différent. La vallée du Huab semble principalement déplacer des particules fines émises par mise en entrainement aérodynamique et désintégration des agrégats. Les vallées du Kuiseb et du Omaruru semblent de leur côté gouverné particulièrement par le processus de saltation par bombardement et possiblement la désintégration des particules par l'agrégation

d'argiles et la mise en suspension, rattachées à la surface de grains plus grossiers présents dans le sol. Cette idée sera davantage discutée dans la section 4.2.1.:

4.1.2: Quelle est la composition élémentaire et minéralogique ? Y a-t-il une homogénéité des poussières minérales entre les vallées de la Namibie ?

Selon la deuxième hypothèse de départ, la composition élémentaire et minéralogique des sols (STPE-STPM) et aérosols (STAE) ne varie pas significativement entre les sites. Dans un même ordre d'idée, la troisième hypothèse considèrerait que les émetteurs importants des données de terrain, c'est-à-dire ceux dont la quantité de particules potentiellement émises dans l'atmosphère ($< 20 \mu\text{m}$), diffèrent des sources d'émissions détectées par imagerie Landsat (Von-Holdt et al., 2017).

Selon la Figure 9 et les informations géologiques de la revue de littérature, il est possible de supposer que le transect du Huab possèdera une forte composition en sédiments argileux puisque la rivière est partiellement active. Cela entraîne la mobilisation d'une plus grande quantité en sédiments de rivière, en plus de quelques traces de minéraux lourds en raison de la variété géologique à proximité du site. Pour la vallée de Omaruru, il est attendu d'y observer la plus grande concentration en minéraux lourds en raison de l'influence de diverses sources à proximité du transect (Figure 9). Finalement, pour le site du Kuiseb, il est attendu d'observer une grande composition de quartz, quoiqu'il y ait possibilité d'une trace plus élevée en fer (couleur rouge) provenant de la mer de sable. À remarquer qu'il y a une concentration plus élevée en fer à l'est de la mer de sable, diminuant vers l'ouest (Lancaster et al., 2013).

Pour cette étude, la minéralogie permettait d'évaluer les grandes catégories pouvant différencier les types de sols dans cette région. Pour les régions échantillonnées à proximité, il était attendu de retrouver pour l'ensemble des vallées une majorité de quartz ($\sim 60\%$), une forte concentration en feldspath ($\sim 30\%$), ainsi que des traces de micas et d'aphanite volcaniques, sédimentaires et métamorphiques (Garzanti et al., 2014 ; Goscombe et al., 2003).

De manière globale, la composition minéralogique globale de la portion des poussières (limons) regroupe tout d'abord les micas et le gypse (Journet et al., 2014). Il y a aussi une majorité de quartz, feldspath, avec présence de chlorite, calcite et goethite et il est aussi possible d'observer des traces d'Illite, Kaolinite, smectite, vermiculite et hématite (Journet et al., 2014). Pour les résultats du Tableau 12 ceux-ci diffèrent : malgré le quartz soit en forte concentration, il ne domine pas et le feldspath a beaucoup plus d'importance qu'observé dans la littérature scientifique. Bien que la localisation d'échantillonnage varie entre la littérature et les résultats du projet, cette

comparaison permet d'observer qu'il y a aussi une différence entre les sites potentiels d'émissions, versus d'autres sites à proximité. En effet, la vallée du Huab est fortement constituée d'argiles, alors que les autres sites possèdent une minéralogie plus variable et constituée de minéraux tels que le quartz et le feldspath.

La composition élémentaire permettait d'étudier le potentiel de transport des nutriments disponibles dans les sols à l'étude, ainsi que de différencier les sols et appuyer les explications rattachées à la variation en taille de particules. En raison de leur localisation et de la géologie des sols (Section 1.2: Géologie et géomorphologie côtière), il était attendu d'y retrouver une différence élémentaire entre les différents sites à l'étude. Les principaux éléments attendus pour les poussières minérales sont le Fe (~3,5 % masse), Al, Ca, Si (Jickells & Moore, 2015 ; Mahowald et al., 2008). En observant les résultats de la comparaison de moyenne (test post-hoc Kruskal, nemenyi), il est possible de conclure que les échantillons sont généralement significativement similaires au niveau des sols, alors qu'il y a une plus grande différence au niveau des aérosols (Tableau 13). Toutefois, bien que ces éléments soient considérés comme différents, la moyenne et la médiane des échantillons restent assez similaires entre les sites. Cela laisse supposer que les intervalles varient grandement pour certains éléments, ce qui est observé à la Figure 37. Encore une fois, les sols permettent de refléter la différence potentielle de l'environnement des sites d'émission. Alors que l'enrichissement potentiel des sites reste assez similaire au niveau des STPE, les STAE possèdent des différences notables. Alors que le Ca, le Fe, le Na et le Mg sont significativement similaires au niveau des STPE entre le Huab et le Kuiseb, le contraire s'observe pour les STAE. La même relation est observée pour le Na entre le Omaruru et le Huab.

Certaines données de composition minéralogique et élémentaire sont présentes à l'échelle globale. Toutefois, il est difficile de comparer les résultats à ceux présentés, puisque les méthodes de collectes de données diffèrent (p. ex. (Journet et al., 2014, 2008 ; Mahowald et al., 2014)). Seules des interprétations indirectes sont possibles, puisque les objectifs de recherche diffèrent fondamentalement. En effet, plusieurs études observent les composantes et conditions atmosphériques (p. ex. (Di-Biagio et al., 2017)), ou encore la minéralogie des sites, mais peu d'études se concentrent sur la relation entre le matériel parental et les poussières émises. Il serait donc intéressant de développer cet aspect de recherche, afin d'obtenir une comparaison directe entre les différents sites à l'aide de même type d'analyses.

4.2: Relation entre les variables à l'étude

4.2.1: Quels sont les potentiels processus d'érosion responsables de l'entraînant des poussières minérales ?

Selon la quatrième hypothèse, la composition élémentaire (STPE-STPE) et minéralogique (STPM) varie significativement des données globales enregistrées pour la surface terrestre. Comme discuté plus haut, selon les résultats d'analyse et en considérant seulement la taille des particules, le transect du Huab possède le plus grand potentiel d'émission selon la quantité de particules < 60 μm et <20 μm . Toutefois lorsque l'on regarde les données de fréquences annuelles des images Landsat et des données récoltées par le PI-SWERL (un tunnel aérodynamique portatif pour mesurer l'érosion causée par le vent) (Von-Holdt et al., 2017), le Kuiseb possède la plus grande fréquence d'émissions. Ainsi cela laisse supposer que les contraintes environnementales (p. ex. fréquence et intensité des vents, rugosité du sol, largeur des bassins, etc.) sont des facteurs déterminants au transport des particules, puisque l'ordre d'importance d'émission des sites diffère entre les résultats du projet et les données de littérature. Pour comprendre cette dichotomie, il est nécessaire d'intégrer les variables de composition élémentaire et minéralogique afin de mieux comprendre le type d'environnement et pourquoi le Kuiseb est un important émetteur au niveau des aérosols.

En premier, il faut posséder une bonne estimation du potentiel réel. En deuxième lieu il faut tenir compte des différences d'analyses : les imageries déduisent les observations selon les grands vents et les événements de poussières, sur une période de 11 ans (Von-Holdt et al., 2017). L'étude ci-présente tente d'observer les différences entre les transects des sites et expérimentations en laboratoires. Les conclusions peuvent donc différer sur certains points en raison des méthodes, mais aussi en raison des échelles spatiales et temporelles.

La comparaison entre cette étude et la littérature laisse supposer deux grandes limitations :

- a. Les sites d'échantillonnage pour les trois vallées ne sont pas majoritairement représentatifs des sources d'émissions ;
- b. La dynamique de mise en suspension et les composantes environnementales diffèrent pour les trois sites ;

Dans le cas de la première déclaration, la localisation des sites d'étude s'est effectuée en fonction de l'article de von Holdt et al (2017), c'est-à-dire l'article du même article qui a répertorié la fréquence des événements de transport par imagerie, mais aussi du besoin d'avoir trois localisations similaires (les trois sites d'échantillonnages sont situés au même endroit dans les bassins des rivières éphémères). Considérant que les autres zones du bassin versant n'ont pas été

analysées, il est possible de supposer que d'autres sources peuvent émettre des poussières selon un processus différent qu'étudié le long des transects.

Dans le deuxième cas, lorsqu'il est question d'étudier le transport des particules, les résultats et les connaissances acquises au travers la littérature démontre que la disponibilité des sédiments n'est qu'une des variables à considérer. Une analyse des données météorologique ainsi que des compteurs de particules *in situ* pourraient aider à répondre à ce problème, puisque la composante environnementale joue un rôle important sur la mise en suspension des particules. Cependant, selon les résultats de tamisage et du compteur de particules présentement étudié, nous pouvons supposer que les mécanismes d'importance des trois sites diffèrent.

Pour le transect du Huab, il serait question d'entraînement aérodynamique et de désintégration des agrégats (p. ex. formation de croûtes de sols), particulièrement en raison de la concentration en particules fines (argiles). Puisque le processus de saltation/bombardement des particules est considéré comme le principal facteur d'entraînement des particules d'aérosols, le Huab se trouve à n'émettre qu'une partie des sédiments disponibles. Le site est principalement composé de fines particules (grande concentration de sédiments $< 80 \mu\text{m}$), donc des sédiments plus propices à l'entraînement aérodynamique et la désintégration des agrégats. L'une des remarques, principalement sur les sources d'émissions de la vallée, est qu'il semble y avoir un transport constant sur les terrasses aux abords des chenaux de la rivière (Von-Holdt et al., 2017).

Pour le transect du Omaruru et le Kuiseb, il serait question de bombardement par saltation et désintégration des agrégats. À noter que le bombardement s'applique davantage au Kuiseb considérant la quantité de particules grossières (sable $> 100 \mu\text{m}$), la haute teneur en quartz et sa localisation par rapport à la mer de sable. En effet, les particules $>100 \mu\text{m}$ nécessitent davantage de force pour se déplacer par le vent, il s'avère donc plus probable que la fréquence de transport soit plus importante pour le Kuiseb que le Omaruru, ce dernier possédant une grande quantité de sédiments $> 100 \mu\text{m}$.

À noter ici que les conclusions tirées de ces résultats ne constituent qu'une observation qui découle des échantillonnages de transect. Afin d'obtenir une représentativité des sites, il serait nécessaire d'étudier de points autres tel qu'en amont et en aval des sites d'études. Toutefois, les caractéristiques géomorphologiques des trois sites appuient la théorie des différences d'émissions : la rivière du Huab est plus active que les autres bassins, ce qui amène une plus grande mobilisation des sédiments d'argiles et réduction des émissions dans les chenaux actifs. Par ailleurs Omaruru et le Kuiseb sont plus propices à des modifications anthropiques : ils sont situés près de la civilisation

et un barrage fût érigé dans la région du Omaruru. Cela ne semble pas avoir un impact important pour l'échelle de l'étude ainsi que les objectifs et analyses qui en découlent, mais cela pourrait potentiellement limiter l'apport en sédiments fins ainsi que relocaliser les sources d'émissions potentielles à proximité de l'exutoire (Von-Holdt et al., 2017). La plus grande différence entre ces deux se trouve au niveau de la morphologie des sites : selon les observations de terrain à l'échelle du transect, le Kuiseb semble principalement entrecoupé de dunes et d'une surface de croûtes d'argiles, idéal pour le processus de saltation et bombardement. Le Omaruru semble plus sec (barrage en amont) avec une surface plane, permettant un corridor pour le transport de sédiments au travers le transect. Puisque la surface d'émissions de poussières à l'exutoire du Kuiseb est plane et à proximité de la mer de sable, l'origine des panaches de poussières varie donc entre une surface de Gravel et des roches et sédiments fins (Von-Holdt et al., 2017).

4.2.2: Y a-t-il une variation entre le sol, le matériel parental et les poussières potentiellement émises par ce dernier ?

Comme mentionné dans l'interprétation des résultats, la minéralogie semble démontrer une différence entre les sites. Cette idée est observée pour les échantillons de STPM et les résultats de STPE et STAE. Le Huab est grandement composé de particules d'argiles, le Omaruru possède une composition plus diversifiée que les autres sites et le Kuiseb est grandement composé de quartz et feldspath. Le ratio de facteurs enrichissant pour les STPE est assez similaire se trouve assez similaire entre les trois sites, mais certains diffèrent des STAE, bien que le ratio d'enrichissement diminue grandement. Cette différence n'est pas observée pour le Kuiseb et le Omaruru puisqu'ils restent majoritairement similaires. Ici l'analyse en correspondances principale s'avère importante à intégrer puisque celle-ci fait ressortir une différence entre ces deux sites. Selon les résultats, malgré un groupement au centre pour la majorité des variables, les trois sites sont tout de même situés à l'extrémité l'une de l'autre, donc avec certaines caractéristiques individuelles. Les minéraux généralement retrouvés en majorité ou forte présence dans les sols sont assez similaires entre les trois sites (les quartz, les feldspaths). Cependant, les différences majeures au niveau de la composition minéralogique et élémentaire se retrouvent principalement dans les éléments qui sont présents en minorité (p. ex. les micas, la calcite) ou négligeables (p. ex. Illite, Kaolinite) au niveau des particules de limons. Ces éléments négligeables au niveau des limons dominent au niveau des particules d'argile (donc une partie des aérosols). Ainsi il est normal d'observer une diminution du quartz et des feldspaths au niveau des aérosols. Finalement les principales variables qui se démarquent sont le Ti, l'illite, la Kaolinite et la Muscovite.

Pour conclure, ces hypothèses ne peuvent qu’être partiellement appuyées par la littérature scientifique, puisque les données sur la caractérisation des sites en relation avec les événements de transport restent incomplètes (Thomas et al., 2017). Les informations actuelles sont localisées sur quelques vallées seulement (p. ex. une station AERONET à Henties Bay) et les champs d’études varient grandement (p. ex. concentration sur les sédiments des rivières, versus l’observation des propriétés optiques des particules dans l’atmosphère, etc.). Les données acquises concernant l’émissivité au niveau de la quantité, la taille et la caractérisation des particules émises pour les douze vallées de la région. La qualité et la quantité des informations sont donc limitées selon les vallées à l’étude, puisqu’il y a beaucoup plus de recherches connexes au sujet étudié à propos de la vallée du Huab, que la vallée du Omaruru par exemple. Il y a donc un manque potentiel d’uniformité au niveau des connaissances sur la dynamique d’émission des sites pour répondre aux objectifs de ce travail.

Conclusion générale

Le projet de recherche permet d'évaluer la distribution des nutriments en Namibie, en fonction de trois vallées qui bordent la côte. Les particules de poussières possèdent une grande incertitude dans les modèles climatiques, alors qu'ils possèdent une grande influence sur le bilan radiatif global et l'apport en nutriments pour divers écosystèmes. Étudier l'érosion éolienne dans un contexte géographique permet d'améliorer la compréhension de l'influence des nombreuses variables environnementales, donc l'amélioration des modèles climatiques. La géologie du site, l'influence des patrons de circulation globaux ainsi que les variables influençant le déplacement des particules s'avère des informations essentielles à maîtriser lors de ce type d'analyse, puisqu'ils permettent d'estimer le déplacement des particules en fonction des conditions environnementales.

Le travail se concentre sur les trois principales rivières éphémères en côte de la Namibie durant la période hivernale de l'hémisphère sud, en raison des émissions plus fréquentes durant cette saison. Les images satellitaires fournissent d'importantes informations quant à l'émission des poussières fines, alors que les données de terrains permettent d'observer la variabilité des vents et types de minéraux à l'échelle du transect. À l'été 2017, des mesures en temps réel ont été prises ainsi que des échantillons de surface, dont l'analyse des sols et filtres s'est effectuée en laboratoire. Seul le type de sol, c'est-à-dire la distribution de la taille, de la minéralogie et composition élémentaire, a été traité afin d'évaluer les sources d'émission et le potentiel de transport des poussières.

Il a été observé que le transect étudié dans la vallée du Huab possède une taille de particule plus fine en raison de divers facteurs, dont une rivière éphémère plus active, alors que le transect de la vallée de Omaruru possède une composition en minéraux plus variée. En ce qui concerne le transect de la vallée du Kuiseb, en raison du site d'échantillonnage et une forte influence de la mer de sable, des particules plus près de la fraction sable ont été identifiées en plus grande quantité qu'observé pour les autres sites. Il est donc attendu que, malgré une plus grande concentration de particules fines pour le transect du Huab, son processus d'émission demande une fréquence de vent et un environnement propice à l'émission des particules. Selon la littérature existante, les résultats semblent indiquer que le mécanisme d'émission ne permet pas d'émettre autant que la vallée du Kuiseb. Cela est appuyé par les données de la taille des particules, la composition minéralogique ou encore la composition élémentaire. Évidemment les conditions météorologiques jouent un rôle important, il serait donc intéressant d'éventuellement étudier les vents responsables du transport des poussières le long de la vallée et enregistrer des événements de transport afin de quantifier les émissions.

4.3: Implication de l'étude

Caractériser les vallées de la région côtière de la Namibie permet d'évaluer le type d'environnement dans lequel les particules sont déposées, émises puis transportées le long de la côte. Évidemment de plus amples analyses se trouvent nécessaires pour répondre à cette problématique, considérant la taille d'échantillonnage, l'écart-type des valeurs de tamisage ainsi que le type d'analyses dont les suppositions sont déduites. Des analyses de terrain d'évènements de transport, par exemple, pourraient grandement améliorer la compréhension des phénomènes (p. ex. installation de compteurs de particules sur le site, mesure des températures, mesure de la direction du vent, etc.), ou encore une plus grande quantité d'échantillons de sols analysés. L'importance de l'étude des particules de poussières et les aérosols s'avère de plus en plus importante dans le contexte des changements climatiques. Les poussières affectent la perte et redistribution des nutriments et les cycles hydrologiques, puis modifient le bilan radiatif, la concentration de la pollution dans l'air ainsi que l'effet des interactions avec les nuages. Les poussières minérales sont principalement étudiées pour leur apport en nutriments ainsi que leurs propriétés optiques. La modification du climat engendre une modification des environnements et vice versa, il est donc nécessaire d'étudier l'effet d'une modification des émissions (soit positivement ou négativement). Considérant la complexité du transport de ces particules, la modélisation s'avère importante afin de mitiger l'effet des changements climatiques sur certains environnements. Plusieurs types de données sont donc nécessaires pour obtenir un modèle robuste (p. ex. imageries, données de terrains, analyses en laboratoires, etc.) et ce à différentes échelles temporelles et spatiales.

Bibliographie

ACACIA Projet E1. Digital Atlas of Namibia. Univ Col 2002. http://www.uni-koeln.de/sfb389/e/e1/download/atlas_namibia/e1_download_climate_e.htm#annual_rainfall.

Acta C, Ireland X. Abundance of chemical elements in the continental crust : a new table 1964;28.

Ahrens C. Meteorology today: an introduction to weather, climate and the environment. 7th ed. Pacific Grove, CA. Thomson/Books/Cole; 2003.

Alfaro C, Gaudichet A, Maih M. Mineral aerosol production by wind erosion : aerosol particle sizes and At low wind produced different increases with the to fit the is was observed experiments size speeds mostly large aerosol particles are released , then speeds in the wind runnel There 1998;25:991–4.

Bagnold R. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes. Progress in Physical Geography; 1941. <https://doi.org/https://doi.org/10.1177/030913339401800105>.

Barchyn TE, Hugenholtz CH. Comparison of four methods to calculate aeolian sediment transport threshold from field data: Implications for transport prediction and discussion of method evolution. Geomorphology 2011;129:190–203. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.01.022>.

Bellehumeur C, Legendre P. Multiscale sources of variation in ecological variables: Modeling spatial dispersion, elaborating sampling designs. Landsc Ecol 1998;13:15–25. <https://doi.org/10.1023/A:1007903325977>.

Bhattachan A, Reche I, D’Odorico P. Soluble ferrous iron (Fe(II)) enrichment in airborne dust. J Geophys Res Atmos 2016;119–36. <https://doi.org/10.1002/2016JD024957>. Received.

Carslaw KS, Boucher O, Spracklen D v., Mann GW, Rae JG., Woodward S, et al. A review of natural interactions and feedbacks within the Earth system. Atmos Chem Phys 2010;10:1701–1737. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/acp-10-1701-2010>.

Carter MR, Gregorich E. Soil Sampling and Methods of Analysis. vol. 44. 2006. <https://doi.org/10.1017/S0014479708006546>.

Choobari OA, Zawar-Reza P, Sturman A. The global distribution of mineral dust and its impacts on the climate system: A review. Atmos Res 2014;138:152–65. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.11.007>.

Dansie AP, Wiggs GFS, Thomas DSG. Iron and nutrient content of wind-erodible sediment in the

ephemeral river valleys of Namibia. *Geomorphology* 2017;290:335–46. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.03.016>.

Dean JR. *Environmental Trace Analysis: Techniques and Applications*. Wiley; 2014. <https://doi.org/10.1002/9781118683422>.

Di-Biagio C, Formenti P, Balkanski Y, Caponi L, Cazaunau M, Pangui E, et al. Global scale variability of the mineral dust long-wave refractive index: A new dataset of in situ measurements for climate modeling and remote sensing. *Atmos Chem Phys* 2017;17:1901–29. <https://doi.org/10.5194/acp-17-1901-2017>.

Drummer TD, McDonald LL. Size Bias in Line Transect Sampling. *Int Biometric Soc* 2016;43:13–21.

Duncan AR, Newton SR, Berg C Van Den, Reid DL. Geochemistry and petrology of dolerite sills in the Huab River Valley, Damaraland, north-western Namibia. *Commun Geol Surv Namib* 1989; 5:5–18.

Eckardt F, Washington R, Wilkinson MJ. The origin of dust on the west coast of southern Africa. *Palaeocol Africa Surround Islands* 2002;27:207–19.

Eitel B, Dieter Blümel W, Hüser K, Mauz B. Dust and loessic alluvial deposits in Northwestern Namibia (Damaraland, Kaokoveld): Sedimentology and palaeoclimatic evidence based on luminescence data. *Quat Int* 2001;76–77 : 57–65. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(00\)00089-6](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(00)00089-6).

Ellis JT, Sherman DJ. *Fundamentals of Aeolian Sediment Transport: Wind-Blown Sand*. Treatise Geomorphol 2013;11:85–108. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00299-2>.

France OB, France CG, Germany CH, Uk AJ. Clouds and aerosols. *Clim Chang 2013 Phys Sci Basis Work Gr I Contrib to Fifth Assess Rep Intergov Panel Clim Chang* 2013;9781107057:571–658. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.016>.

Garzanti E, Vermeesch P, Padoan M, Resentini A, Vezzoli G, Andò S. Provenance of Passive-Margin Sand (Southern Africa). *J Geol* 2014;122:17–42. <https://doi.org/10.1086/674803>.

Gassó S, Stein AF. Does dust from Patagonia reach the sub-Antarctic Atlantic Ocean? *Geophys Res Lett* 2007;34:3–7. <https://doi.org/10.1029/2006GL027693>.

Geological Survey of Namibia. *Simplified Geological Map of Namibia*. World Wildl Fund Namib

Desert (AT1315) Acces 6 Mai 2013 2002. <https://visibleearth.nasa.gov/view.php?id=81073> (accessed October 1, 2018).

Geyh MA, Ploethner D. Groundwater isotope study in the Omaruru River delta aquifer, central Namib desert, Namibia. *IAHS-AISH Publ* 1995:163–70.

Giacovazzo C, Monaco HL, Artioli G, Viterbo D, Milanesio M, Gilli G, et al. *Fundamentals of Crystallography*. Oxford University Press; 2013. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199573653.001.0001>.

Ginoux P. Effects of nonsphericity on mineral dust modeling. *J Geophys Res D Atmos* 2003;108. <https://doi.org/10.1029/2002jd002516>.

Goscombe B, Hand M, Gray D. Structure of the Kaoko Belt, Namibia: Progressive evolution of a classic transpressional orogen. *J Struct Geol* 2003;25:1049–81. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(02\)00150-5](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(02)00150-5).

Goudie A, Viles H. *Landscapes and Landforms of Namibia* 2015:181–96. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-8020-9>.

Goudie AS, Eckardt F. The Evolution of the Morphological Framework of the Central Namib Desert, Namibia, Since the Early Cretaceous. *Geogr Ann Ser A, Phys Geogr* 1999;81:443–58. <https://doi.org/10.1111/1468-0459.00073>.

Grodek T, Benito G, Botero BA, Jacoby Y, Porat N, Haviv I, et al. The last millennium largest floods in the hyperarid Kuiseb River basin, Namib Desert. *J Quat Sci* 2013;28:258–70. <https://doi.org/10.1002/jqs.2618>.

Gutiérrez M, Gutiérrez F. *Landscapes and landforms of Spain*. vol. 28. Springer; 2014. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-8628-7>.

Harrison MSJ. A generalized classification of South African summer rain-bearing synoptic systems. *J Climatol* 1984;4:547–60. <https://doi.org/10.1002/joc.3370040510>.

Hartmann DL, Klein Tank AMG, Rusticucci M, Alexander L V., Brönnimann S, Charabi YAR, et al. Observations : Atmosphere and surface. *Clim Chang 2013 Phys Sci Basis Work Gr I Contrib to Fifth Assess Rep Intergov Panel Clim Chang* 2013;9781107057:159–254. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.008>.

Instruments ARA. ARA N-FRM Sampler. 2017.

Jacob RE, Kröner A, Burger AJ. Areal extent and first U-Pb age of the Pre-Damara Abbabis complex in the central Damara belt of South West Africa (Namibia). *Geol Rundschau* 1978;67:706–18. <https://doi.org/10.1007/BF01802813>.

Jickells T, Moore CM. The Importance of Atmospheric Deposition for Ocean Productivity. *Annu Rev Ecol Evol Syst* 2015;46:481–501. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-112414-054118>.

Jickells TD, An ZS, Andersen KK, Baker AR, Bergametti G, Brooks N, et al. Global Iron Connections Between Desert Dust, Ocean Biogeochemistry, and Climate 2005;308:67–72.

Journet E, Balkanski Y, Harrison SP. A new data set of soil mineralogy for dust-cycle modeling. *Atmos Chem Phys* 2014;14:3801–16. <https://doi.org/10.5194/acp-14-3801-2014>.

Journet E, Desboeufs K V, Caquineau S, Colin J-L. Mineralogy as a critical factor of dust iron solubility. *Geophys Res Lett* 2008 ; 35:3–7. <https://doi.org/10.1029/2007GL031589>.

Klotz ML, Sein MM, Schramm R. Fiche d’application : Stabilisation d’éléments volatils dans la technique de fusion et l’analyse par spectroscopie de fluorescence X (XRF). *Spectra Anal* 2015 ; 49:49–53.

Kohfeld KE, Tegen I. Record of Mineral Aerosols and Their Role in the Earth System. *Treatise on Geochemistry*, vol. 4–9, 2007, p. 1–26. <https://doi.org/10.1016/B978-008043751-4/00236-4>.

Kok JF, Mahowald NM, Fratini G, Gillies JA, Ishizuka M, Leys JF, et al. An improved dust emission model - Part 1 : Model description and comparison against measurements. *Atmos Chem Phys* 2014;14:13023–41. <https://doi.org/10.5194/acp-14-13023-2014>.

Kok JF, Parteli EJR, Michaels TI, Karam DB. The physics of wind-blown sand and dust. *Reports Prog Phys* 2012 ; 75:106901. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/75/10/106901>.

Kok JF, Renno NO. A comprehensive numerical model of steady state saltation (COMSALT). *J Geophys Res Atmos* 2009;114:1–20. <https://doi.org/10.1029/2009JD011702>.

Lancaster N, Baas ACW, Sherman DJ. Aeolian geomorphology: Introduction. *Treatise Geomorphol.*, vol. 11, Longman; 2013, p. 1–6. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00294-3>.

Legendre P, Legendre L. *Numerical ecology*. 3rd ed. 2012.

Levin N, Kidron GJ, Ben-Dor E. The spatial and temporal variability of sand erosion across a stabilizing coastal dune field. *Sedimentology* 2006;53:697–715. <https://doi.org/10.1111/j.1365->

3091.2006.00787.x.

Lu H. An integrated wind erosion modelling system with emphasis on dust emission and transport. Ph.D. thesis, The University of New South Wales, Australia, 2000.

Lu H, Shao Y. Toward quantitative prediction of dust storms: An integrated wind erosion modelling system and its applications. *Environ Model Softw* 2001; 16:233–49. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(00\)00083-9](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(00)00083-9).

Lutterotti L, Bortolotti M, Ischia G, Lonardelli I, Wenk HR. Rietveld texture analysis from diffraction images. *Zeitschrift Fur Krist Suppl* 2007;1:125–30. https://doi.org/10.1524/zksu.2007.2007.suppl_26.125.

Mahowald N, Albani S, Kok JF, Engelstaeder S, Scanza R, Ward DS, et al. The size distribution of desert dust aerosols and its impact on the Earth system. *Aeolian Res* 2014;15:53–71. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2013.09.002>.

Mahowald N, Jickells TD, Baker AR, Artaxo P, Benitez-Nelson CR, Bergametti G, et al. Global distribution of atmospheric phosphorus sources, concentrations and deposition rates, and anthropogenic impacts. *Global Biogeochem Cycles* 2008; 22:1–19. <https://doi.org/10.1029/2008GB003240>.

Mahowald NM, Engelstaedter S, Luo C, Sealy A, Artaxo P, Benitez-Nelson C, et al. Atmospheric Iron Deposition: Global Distribution, Variability, and Human Perturbations. *Ann Rev Mar Sci* 2009;1:245–78. <https://doi.org/10.1146/annurev.marine.010908.163727>.

Martin JH, Fitzwater SE. Iron deficiency limits phytoplankton growth in the north-east pacific subarctic. *Nature* 1988 ; 331:341–3. <https://doi.org/10.1038/331341a0>.

Marx SK, Kamber BS, McGowan HA, Petherick LM, McTainsh GH, Stromsoe N, et al. Palaeo-dust records : A window to understanding past environments. *Glob Planet Change* 2018;165:13–43. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.03.001>.

McTainsh GH, Lynch AW, Hales R. Particle-size analysis of aeolian dusts, soils and sediments in very small quantities using a coulter multisizer. *Earth Surf Process Landforms* 1997;22:1207–16. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199724\)22:13<1207::AID-ESP820>3.0.CO;2-K](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199724)22:13<1207::AID-ESP820>3.0.CO;2-K).

Mendelsohn J, Jarvis A, Roberts C, Robertson T. *The Atlas of Namibia: A Potrait of the land and its people* 2002:1–201.

Meskhidze N, Chameides WL, Nenes A. Dust and pollution: A recipe for enhanced ocean fertilization? *J Geophys Res D Atmos* 2005;110:1–23. <https://doi.org/10.1029/2004JD005082>.

Migoń P. *Geomorphological Landscapes of the World*. Springer; 2010. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.

Myhre G, Shindell D, Bréon F-M, Collins W, Fuglestedt J, Huang J, et al. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. *Clim Chang 2013 Phys Sci Basis Contrib Work Gr I to Fifth Assess Rep Intergov Panel Clim Chang 2013*:659–740. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.018>.

NASA. Worldview 2018.

Nowak S, Lafon S, Caquineau S, Journet E, Laurent B. Quantitative study of the mineralogical composition of mineral dust aerosols by X-ray diffraction. *Talanta* 2018;186:133–9. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2018.03.059>.

Paliy O, Shankar V. Application of multivariate statistical techniques in microbial ecology. *Mol Ecol* 2016;25:1032–57. <https://doi.org/10.1111/mec.13536>.

Paris Diderot UFR de Chimie. Plateforme RX 2018. <http://www.chimie.univ-paris-diderot.fr/fr/ufr/plateformes/rx>.

Pérez C, Haustein K, Janjic Z, Jorba O, Huneus N, Baldasano JM, et al. Atmospheric dust modeling from meso to global scales with the online NMMB/BSC-Dust model – Part 1 : Model description, annual simulations and evaluation. *Atmos Chem Phys* 2011;11:13001–27. <https://doi.org/10.5194/acp-11-13001-2011>.

Petkov V. *Multisizer 4e Particle Analyzer: User's Manual* 2011; 22203:1–9. <https://doi.org/10.13155/29825>.

Prospero JM, Ginoux P, Torres O, Nicholson SE, Gill TE. Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product. *Rev Geophys* 2002;40:1–31. <https://doi.org/10.1029/2000RG000095>.

Pye K. *Aeolian dust and dust deposits*. Academic Press; 1987.

Raffaele L, Bruno L, Wiggs GFS. Uncertainty propagation in aeolian processes: From threshold shear velocity to sand transport rate. *Geomorphology* 2018;301:28–38. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.10.028>.

Ravi S, D'Odorico P, Breshears DD, Field JP, Goudie AS, Huxman TE, et al. Aeolian processes and the biosphere. *Rev Geophys* 2011;49:1–45. <https://doi.org/10.1029/2010RG000328>.

Rogers J, Rau AJ. Surficial sediments of the wave-dominated Orange River Delta and the adjacent continental margin off south-western Africa. *African J Mar Sci* 2006;28:511–24. <https://doi.org/10.2989/18142320609504202>.

Saad M, Masmoudi M, Chevaillier S, Laurent B, Lafon S, Alfaro SC. Variability of the elemental composition of airborne mineral dust along the coast of Central Tunisia. *Atmos Res* 2018;209:170–8. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.04.001>.

Shao Y. *Physics and modelling wind erosion*. Springer 2008.

Shao Y, McTainsh GH, Leys JF, Raupach MR. Efficiencies of sediment samplers for wind erosion measurement. *Aust J Soil Res* 1993a;31:519–32. <https://doi.org/10.1071/SR9930519>.

Shao Y, Raupach MR, Findlater PA. Effect of saltation bombardment on the entrainment of dust by wind. *J Geophys Res* 1993b;98:12719. <https://doi.org/10.1029/93JD00396>.

Shao Y, Wyrwoll KH, Chappell A, Huang J, Lin Z, McTainsh GH, et al. Dust cycle: An emerging core theme in Earth system science. *Aeolian Res* 2011;2:181–204. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2011.02.001>.

Siesser WG. Late Miocene origin of the Benguela upwelling system off Northern Namibia. *Science* (80-) 1980 ; 208:283–5. <https://doi.org/10.1126/science.208.4441.283>.

Signorell R, Reid JP. *Fundamentals and Applications in Aerosol Spectroscopy*. CRC Press; 2010. <https://doi.org/10.1201/b10417>.

Southwood TRE, Henderson PA. *Ecological Methods*. Third Edit. 2015. <https://doi.org/10.1038/278674a0>.

Swap R, Garstang M, Greco S, Talbot R, Källberg P. Saharan dust in the Amazon Basin. *Tellus* 1992;44B :133–49. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0889.1992.t01-1-00005.x>.

Tanaka TY, Chiba M. A numerical study of the contributions of dust source regions to the global dust budget. *Glob Planet Change* 2006;52:88–104. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.02.002>.

Taylor SR, McLennan SM. The geochemical evolution of the continental crust. *Rev Geophys* 1995;33:241–65. <https://doi.org/10.1029/95RG00262>.

Tegen I, Neubauer D, Ferrachat S, Drian CS Le, Bey I, Schutgens N, et al. The global aerosol-climate model echam6.3-ham2.3 -Part 1: Aerosol evaluation. *Geosci Model Dev* 2019;12:1643–77. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-1643-2019>.

Thomas DSG, Durcan JA, Dansie A, Wiggs GFS. Holocene fluvial valley fill sources of atmospheric mineral dust in the Skeleton Coast, Namibia. *Earth Surf Process Landforms* 2017. <https://doi.org/10.1002/esp.4151>.

Todd M, Washington R. Circulation anomalies associated with tropical-temperate troughs in southern Africa and the south west Indian Ocean. *Clim Dyn* 1999; 15:937–51. <https://doi.org/10.1007/s003820050323>.

Trapp JM, Millero FJ, Prospero JM. Trends in the solubility of iron in dust-dominated aerosols in the equatorial Atlantic trade winds: Importance of iron speciation and sources. *Geochemistry, Geophys Geosystems* 2010;11:1–22. <https://doi.org/10.1029/2009GC002651>.

Tyson PD, Garstang M, Swap R, Kållberg P, Edwards M. An air transport climatology for subtropical Southern Africa. *Int J Climatol* 1996;16:265–91. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(199603\)16:3<265::AID-JOC8>3.0.CO;2-M](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(199603)16:3<265::AID-JOC8>3.0.CO;2-M).

Vickery KJ, Eckardt FD, Bryant RG. A sub-basin scale dust plume source frequency inventory for southern Africa, 2005–2008. *Geophys Res Lett* 2013;40:5274–9. <https://doi.org/10.1002/grl.50968>.

Von-Holdt JR, Eckardt FD, Wiggs GFS. Landsat identifies aeolian dust emission dynamics at the landform scale. *Remote Sens Environ* 2017; 198:229–43. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.010>.

Wang J, Doussin JF, Perrier S, Perraudin E, Katrib Y, Pangui E, et al. Design of a new multi-phase experimental simulation chamber for atmospheric photochemistry, aerosol and cloud chemistry research. *Atmos Meas Tech* 2011;4:2465–94. <https://doi.org/10.5194/amt-4-2465-2011>.

Washington R, Todd M. Tropical – Temperate Links in Southern African and Southwest Indian Ocean Satellite-Derived Daily Rainfall. *Int J Climatol* 1999;19:1601–16. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(19991130\)19:14<1601::AID-JOC407>3.0.CO;2-0](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(19991130)19:14<1601::AID-JOC407>3.0.CO;2-0).

White BR. soil transport by winds on Mars. *J Geophys Res* 1979; 84:4643. <https://doi.org/10.1029/jb084ib09p04643>.

Annexe A

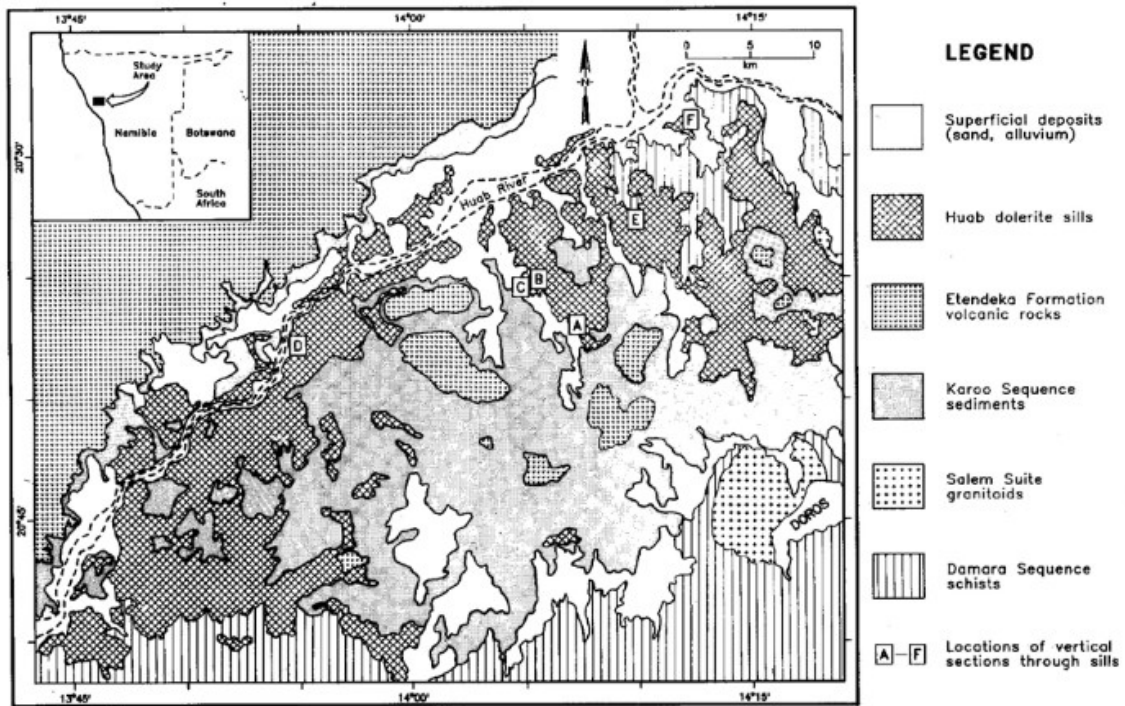


Fig. 1: Simplified geological map of part of the Huab River Valley, Damaraland.

Fig. 1 : Carte géologique de la vallée de Huab (en amont du site d'étude) (Duncan et al., 1989).

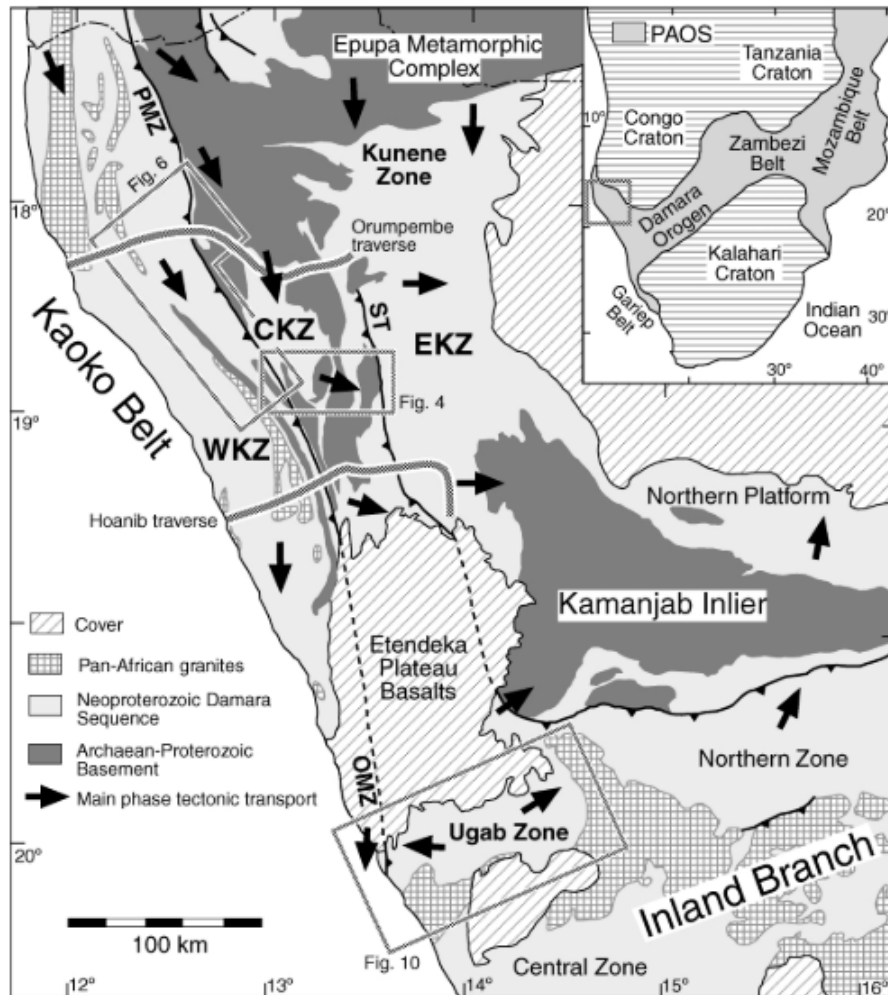
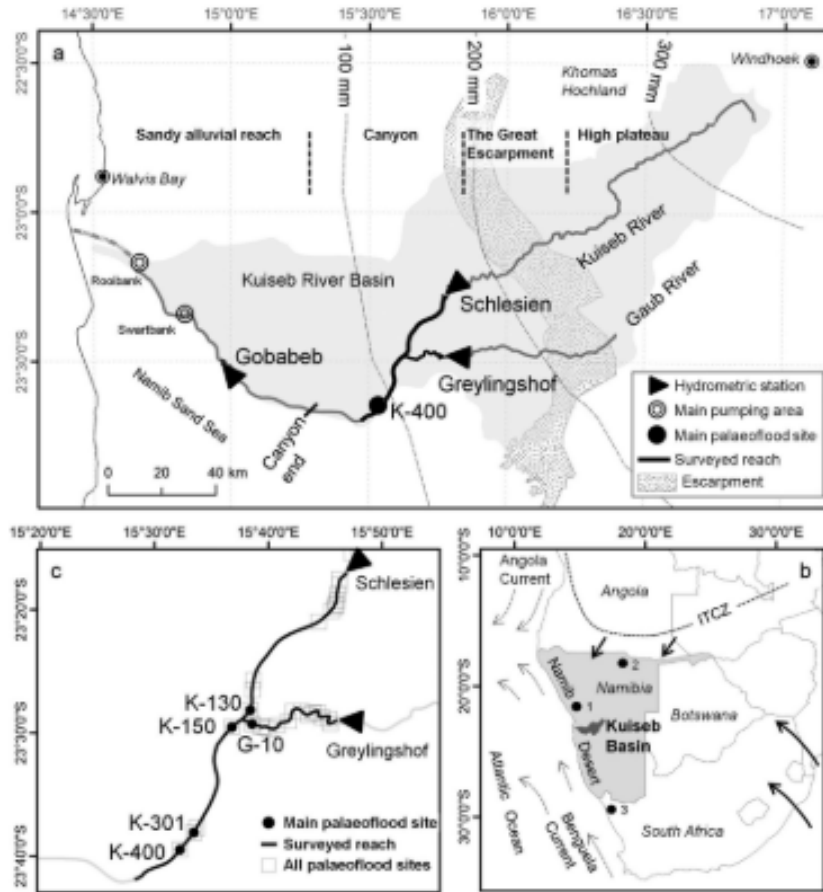


Fig. 1. Location map of the Kaoko Belt branch of the Damara Orogen. The inset outlines the regional context within the Cambrian Pan-African Orogenic System (PAOS), after Goscombe et al. (2000). Boxes outline areas mapped in detail, and solid lines indicate traverses investigated. ST—Sesfontein Thrust; PMZ—Purros Mylonite Zone; OMZ—Ogden Mylonite Zone; EKZ—Eastern Kaoko Zone; CKZ—Central Kaoko Zone; WKZ—Western Kaoko Zone. Arrows indicate upper-plate transport direction during the main phase of the Damara Orogeny in different regions. These are not necessarily time equivalent and are based on stretching lineations in highly sheared regions and fold vergence in regions devoid of stretching lineations (i.e. Ugab Zone, EKZ and Kunene Zone).

Fig. A 2 : Localisation due la région de Kaoko et du Damara Orogen (Goscombe et al., 2003).

Figure 1. (a) The Kuiseb River basin and its largest tributary, the Gaub River. The map shows rainfall isohyets, hydrometric stations and the main morphological divisions (high plateau, Great Escarpment, canyon and sandy alluvial reach). (b) Location of the study area within southern Africa and indication of the major ocean currents (dashed grey arrows) and the main atmospheric circulation that brings moisture to central Namibia during the austral summer (black arrows). Numbers shown correspond to palaeoenvironmental sites cited in the text: 1, caves at Spitzkoppe inselberg containing hyrax middens (Chase *et al.*,); 2, Dante cave stalagmite (Sletten *et al.*,); 3, palaeoflood records of the Buffels River (Benito *et al.*,). (c) Location of palaeoflood hydrology study sites along the canyons of the Kuiseb and the Gaub rivers.



Fig_A 3 : Localisation du bassin versant du Kuiseb (Grodek et al., 2013).



Fig_A 4 : Image Google Earth. Capture d'écran prise le 10 février 2020. Date des Images satellitaires : a. 14/12/2018 ; b. 9/11/2018 ; c. 19/01/2019 ; Localisation du transect (points GPS verts) en rapport avec le barrage du Delta du Omaruru ;

Tab_A1 : Paramètres et variables de l'instrument ARA-N-FRM. Traduit de l'anglais (Instruments ARA, 2017).

Paramètres	Description
DATE	Date d'échantillonnage (Jour-Mois_Année)
TIME	Temps d'échantillonnage par intervalle (moyenne de 5 minutes)
SECONDS	Temps des intervalles (secondes)
LPM_SET	Fixer le taux du débit (litres réels/minute)
LPM_ACT	Taux du débit réel (litres réels/minute)
VOL_M3	Vitesse du vent (mètres/secondes)
VOL_STD	Volume avec conditions standard (mètres cubes, accumulés)
TEMP_EXT	Température externe (degrés Celcius)
MMHG	Pression barométrique (mmHg)
WIND_AZ	Azimut du vent (degrés)
WIND_MPS	Vitesse du vent (mètres/secondes)
VOLTS	Voltage des batteries
AMPS	Apérage des batteries
TEMP_INT	Température interne (degrés Celsius)
P1	Sortie externe brut (compte/0.01 pieds cubes)
P2	Sortie externe brut (compte/0.01 pieds cubes)
PM2.5	Concentration estimé (microgrammes/ mètres cubes)
PM10	Concentration estimé (microgrammes/ mètres cubes)
FLAGS	NONE- Aucune erreur lors de l'échantillonnage
	B- Échec de la batterie, voltage insuffisant
	F- Débit n'a pas été maintenu
	W- Direction du vent se situe dans le secteur programmé
	A- Ampérage trop élevé. Possibilité d'échec de la pompe

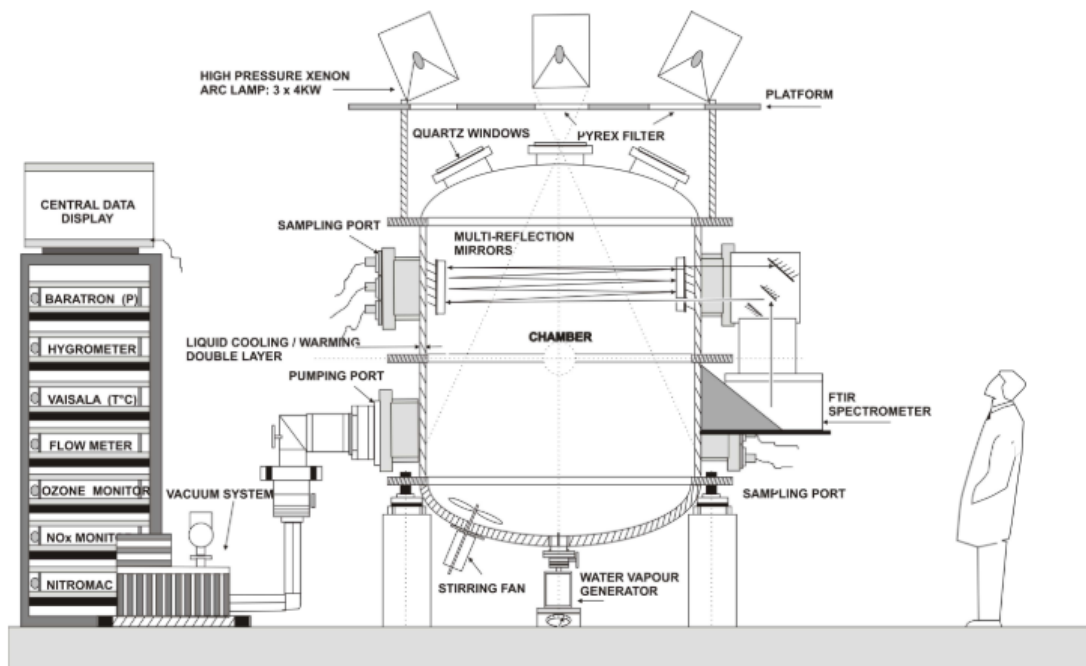
Tab_A 2 : Taille des tubes selon la taille et le volume des particules analysées (Petkov, 2011).

Table 4.1 Aperture Sizes

Aperture (Nominal Diameter, μm)	Diameter Range (μm)			Volume Range μm^3 or fL		
	Total	Standard	Extended	Total	Standard	Extended
10 ^a	0.2–8	0.2–6	6–8	0.004–268	0.004–113	113–268
20 ^a	0.4–16	0.4–12	12–16	0.034–2.14×10 ³	0.034–905	905–2.14×10 ³
30 ^a	0.6–24	0.6–18	18–24	0.113–7.24×10 ³	0.113–3.05×10 ³	3.05×10 ³ –7.24×10 ³
50	1.0–40	1.0–30	30–40	0.524–33.5×10 ³	0.524–14.1×10 ³	14.1×10 ³ –33.5×10 ³
70	1.4–56	1.4–42	42–56	1.44–92.0×10 ³	1.44–38.8×10 ³	38.8×10 ³ –92.0×10 ³
100	2.0–80	2.0–60	60–80	4.19–268×10 ³	4.19–113×10 ³	113×10 ³ –268×10 ³
140	2.8–112	2.8–84	84–112	11.5–736×10 ³	11.5–310×10 ³	310×10 ³ –736×10 ³
200	4.0–160	4.0–120	120–160	33.5–2.14×10 ⁶	33.5–905×10 ³	905×10 ³ –2.14×10 ⁶
280	5.6–224	5.6–168	168–224	92.0–5.88×10 ⁶	92.0–2.48×10 ⁶	2.48×10 ⁶ –5.88×10 ⁶
400	8.0–320	8.0–240	240–320	268–17.2×10 ⁶	268–7.24×10 ⁶	7.24×10 ⁶ –17.2×10 ⁶
560	11.2–448	11.2–336	336–448	736–47.1×10 ⁶	736–19.9×10 ⁶	19.9×10 ⁶ –47.1×10 ⁶
800 ^b	16–640	16–480	480–640	2145–137×10 ⁶	2145–57.9×10 ⁶	57.9×10 ⁶ –137×10 ⁶
1000 ^b	20–800	20–600	600–800	4189–268×10 ⁶	4189–113×10 ⁶	113.1×10 ⁶ –268×10 ⁶
2000 ^b	40–1600	40–1200	1200–1600	33.5×10 ³ –2.14×10 ⁹	33.5×10 ³ –905×10 ⁶	905×10 ⁶ –2.14×10 ⁹

a. Range depends on system cleanliness and environmental electrical noise.

b. Range depends on sample density.



Fig_A 5 : Schéma du CESAM (Wang et al., 2011)

Tab_A 3 : Représentation des différentes analyses en ordination possible selon un espace spatial réduit (Legendre and Legendre, 2012).

Method	Distance preserved	Variables
Principal component analysis (PCA)	Euclidean distance	Quantitative data, linear relationships (beware of double-zeros)
Correspondence analysis (CA)	χ^2 distance	Non-negative, dimensionally homogeneous quantitative or binary data; species frequencies or presence/absence data
Principal coordinate analysis (PCoA), metric (multidimensional) scaling, classical scaling	Any distance measure	Quantitative, semiquantitative, qualitative, or mixed
Nonmetric multidimensional scaling (nMDS)	Any distance measure	Quantitative, semiquantitative, qualitative, or mixed

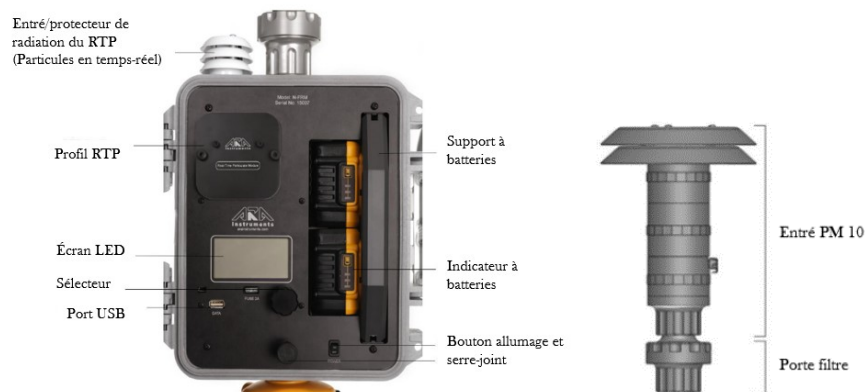
Annexe B

Station météorologique :



Image_B 1 : Photos de terrain 2017. Prise par Amélie Chaput

Fig_B 1 : Description de l'ARA N-FRM Sampler (Instruments ARA, 2017).



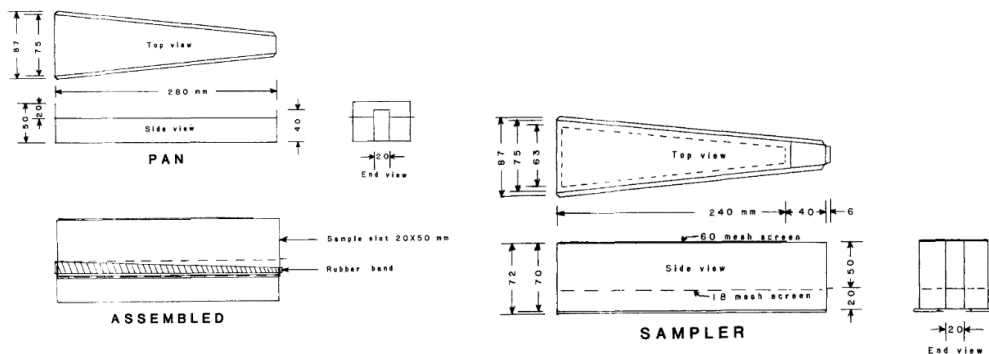
Comme mentionné plus haut, chaque station est munie d'un ARA N-FRM Sampler. Le choix de cet instrument s'est fait en fonction de sa taille, sa facilité d'installation et sa capacité à enregistrer les données journalières. Les paramètres analysés sont la direction de vents (anémomètres rattachés à l'instrument), la vitesse du vent, le débit (volumétrique) et autres (Tab_A 1). En plus, l'embout de PM 10 (Fig_B 1) permet d'estimer la concentration en masse des particules $< 10 \mu\text{m}$, dont la pompe est située à l'intérieur du ARA-N-FRM (Instruments ARA, 2017). La calibration de l'instrument est effectuée par la compagnie dans plusieurs conditions et tailles de particules, contre divers instruments. Si la calibration est de 1 % (Instruments ARA, 2017), il y a tout de même des erreurs indirectement reliées à l'instrument lors du calcul de masse ainsi que la contamination des filtres et lors de la manipulation de ceux-ci. L'outil est d'ailleurs couplé d'un laser compteur de particules, dont la précision de celui-ci est insuffisante, mais fourni

un aperçu de la taille des particules en temps réel. Cet instrument permet ainsi d'observer les conditions météorologiques in situ, alors que le filtre (dont l'intervalle de remplacement reste à la discrétion du chercheur) vise à estimer la masse totale des jours d'échantillonnage. Contrairement aux instruments qui ne mesurent que les données in situ par laser (e. g compteur de particules optiques), le filtre PM 10 peut ensuite être analysé pour y observer les caractéristiques de taille des particules, minéralogiques et/ou chimiques, puis être comparé aux conditions journalières enregistrées.



Image_B 2 : Photos de terrain 2017. Prise par Amélie Chaput

Les BSNE (« Big Springs Number Eight ») servent à collecter les sédiments sur le terrain et peuvent être placées selon différentes hauteurs en considérant qu'il est impossible d'aller sous la limite de 5 cm par la faute du boîtier de fond (Image_B 2 & Fig_B 2). La précision de ce modèle varie en fonction de la taille des particules et la vitesse du vent, mais cette méthode reste privilégiée pour de nombreuses recherches, en raison coût et la facilité d'installation (Shao et al., 1993a). Finalement, les pièges à sédiments permettent d'obtenir une distribution granulométrique moyenne, accumulée selon une échelle temporelle choisie (par ex., récupération des échantillons sur une base journalière, hebdomadaire, etc.).



Fig_B 2 : Description des pièges à sédiments de type BSNE. (Shao et al., 1993a)

Tab_B 1 : Description de la précision des pièges à sédiments de type BSNE (Shao et al., 1993a)

Collection Efficiency by Particle Size (μ)						
Material	> 250	125-250	90-125	63-90	44-63	<44
%						
Blown sand	78.9	103.3	118.2	140.30	155.6	165.0
Sieved soil	81.1	104.2	114.6	126.4	126.6	95.6
Washed sand	82.5	110.9	215.2	555.0*	800.0*	400.0*
*Less than 1% of original sample in this size range and subject to large errors from handling and sieving sample.						

Material	Collection Efficiency (%) by Wind Speed (msecnd)			
	10.4	13.0	15.7	Average
Blown sand	93.1	88.9	89.5	90.5
Sieved Soil	90.5	87.2	86.4	88.0
Washed sand	93.1	90.2	86.6	90.0
Average	92.2	88.8	87.5	89.5
*Blown sand is eroded soil collected from wind deposits of April 1984 storms. Sieved soil is that portion of an Amarillo fine sandy loam soil that is less than 0.42 mm. Washed sand is water deposited sand that is less than 0.42 mm but constrains verry litle silt and clay.				

Tab_B 2 : Composition minéralogique des sols fins. Regroupement des statistiques descriptives et analytiques pour la minéralogie des trois sites (Huab, Kuiseb, Omaruru). Kurtosis et asymétrie = normalité des données, test post hoc de Kruskal Nemenyi = groupement

Analyses statistiques								
Statistiques descriptives globales selon l'ensemble des sites								
Tests / composition élémentaire	Quartz	Calcite	Albite	Microcline	Palygorskite	Illite	Kaolinite	Muscovite
Moyenne	41,91	2,35	24,24	8,57	1,11	11,67	1,51	5,97
Kurtosis	<u>0,40</u>	<u>-0,79</u>	<u>-0,61</u>	2,81	<u>-0,94</u>	-1,77	-0,22	-1,24
Asymétrie	<u>0,31</u>	<u>0,53</u>	0,61	1,18	<u>0,17</u>	<u>0,21</u>	0,77	<u>0,40</u>
Kruskall.test (p-value)	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
Bartlett.test (p-value)	0,2206	1,64E-04	5,46E-02	1,35E-04	0,150	2,20E-16	0,004	0,002
Asymétrie/Kurtosis								
Huab	-0,65/-0,43	<u>-0,34/-1,26</u>	-1,26/0,94	-0,42/-1,36	0,05/-1,73	<u>-0,28/-1,26</u>	<u>0,7/-0,19</u>	-0,03/-1,67
Kuiseb	0,67/-0,62	0,86/-1,24	0/-1,55	0,28/-1,48	0,05/-2,17	1,84/1,66	0,08/-2,13	0,51/-1,48
Omaruru	-0,21/-2,18	-0,64/-1,74	0,71/-1,71	0,64/-1,75	0,07/-2,35	NA/NA	-0,75/-1,69	-0,38/-1,85

Tab_B 3 : Regroupement des statistiques descriptives et analytiques pour les STPE et STAE des trois sites (Kurtosis et asymétrie = normalité des données, test post hoc de Kruskal Nemenyi = groupement similaire). En gras sont les sites statistiquement similaires.

Statistiques descriptives globales pour l'ensemble des sites - STAE										
Moyenne	2,15	3,73	0,78	1,71	13,52	0,07	1,67	0,35		
Kurtosis	<u>-1,04</u>	-1,26	-0,13	<u>-0,91</u>	-1,42	<u>-0,69</u>	<u>-1,08</u>	-1,35		
Asymétrie	<u>0,11</u>	<u>0,25</u>	0,88	0,57	<u>0,03</u>	0,57	<u>0,12</u>	<u>0,03</u>		
Kruskall (p-value)	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05		
Bartlett (p-value)	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	>0,05	<0,05	>0,05	>0,05		
Statistiques descriptives globales pour l'ensemble des sites - STPE										
Tests / Composition élén	Ca	Fe	Na	Mg	Si	P	K	Ti	Mn	V
Moyenne	7,44	12,13	2,60	4,49	49,32	0,19	5,50	1,43	0,27	0,14
Kurtosis	0,27	5,44	-1,20	<u>-0,72</u>	<u>-0,83</u>	2,04	0,27	9,51	8,02	8,90
Asymétrie	<u>0,24</u>	2,22	<u>0,12</u>	<u>0,35</u>	<u>0,17</u>	1,63	<u>-0,05</u>	3,20	2,87	3,04
Kruskall (p-value)	<u>>0,05</u>	<0,05	<0,05	<0,05	>0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<u>>0,05</u>	=0,05
Bartlett (p-value)	<u>>0,05</u>	<0,05	<u>>0,05</u>	<u>>0,05</u>	<u>>0,05</u>	<0,05	<u>>0,05</u>	<0,05	<0,05	<0,05
Asymétrie/Kurtosis pour les STAE										
Tests / Composition élén	Ca	Fe	Na	Mg	Si	P	K	Ti	Mn	V
HUAB	-0,76/-0,36	<u>-0,5/-0,62</u>	0,74/-0,36	<u>-0,11/-0,95</u>	<u>-0,57/-1,04</u>	0,14/-0,90	-0,22/-0,47	-0,61/-0,35		
KUISEB	1,11/-0,12	0,53/-1,69	0,23/-1,88	0,42/-1,90	0,77/-1,32	0,54/-1,41	0,77/-1,09	0,9/-0,75		
OMARURU	<u>0,59/-0,58</u>	<u>0,04/-1,20</u>	1,12/0,04	-0,18/-1,35	<u>-0,06/-1,04</u>	<u>0,04/1,20</u>	<u>-0,21/-0,90</u>	<u>0,08/-1,06</u>		
Asymétrie/Kurtosis pour les STPE										
Tests / Composition élén	Ca	Fe	Na	Mg	Si	P	K	Ti	Mn	V
HUAB	-0,49/-0,08	-0,49/0,14	<u>-0,13/-0,98</u>	0,44/-0,53	0,47/0,21	-0,13/-0,76	-0,73/-0,01	<u>0,08/-0,89</u>	0,16/0,00	<u>-0,38/-0,77</u>
KUISEB	0,13/-1,40	0,74/-1,24	-1,08/0,34	-0,27/1,35	-0,74/-0,91	<u>0,73/-1,14</u>	<u>-0,27/-0,68</u>	0,95/-1,02	0,81/-1,17	0,89/-1,03
OMARURU	0,79/-0,43	<u>0,67/-0,93</u>	0,24/1,96	1,21/0,62	0,23/-1,76	1,09/0,21	0,77/0,39	1,19/0,20	0,68/-1,48	0,84/-0,82

Tab_B 4 : Shapiro teste pour la composition élémentaire et minéralogique.

Analyses statistiques														
Shapiro pour les aérosols														
	Cl	S	Ca	Fe	Na	Mg	Al	Si	P	K	Ti	Mn	V	Ni
HUAB	>0,05	>0,05	<0,05	>0,05	>0,05	=0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05
KUISEB	>0,05	>0,05	>0,05	1,00	>0,05	>0,05	>0,05	1,00	>0,05	<0,05	>0,05	>0,05	>0,05	<0,05
OMARURU	>0,05	1,00	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	=0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05
Shapiro pour les sols														
	Cl	S	Ca	Fe	Na	Mg	Al	Si	P	K	Ti	Mn	V	Ni
HUAB	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05
KUISEB	<0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	<0,05
OMARURU	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	>0,05	<0,05
Analyses statistiques														
Shapiro														
	Quartz	Calcite	Albite	Microcline	Halite	Gypse	Palygorskite	Illite	Kaolinite	Muscovite	Vermiculite	Sekaninaute		
Huab	0,36	0,72	0,03	0,37	1,34E-04	5,49E-05	0,16	0,64	0,52	0,28	0,01	2,85E-03		
Kuiseb	0,82	0,46	0,60	0,13	0,05	0,69	0,24	0,65	0,39	0,26	0,44	0,86		
Omaruru	0,63	0,41	0,06	0,43	0,27	0,38	0,12	0,03	0,02	0,23	0,92	0,03		

Tab_B 5 : Analyses statistiques effectuées sur la minéralogie dont la moyenne est inférieure à la limite de détection.

Analyses statistiques				
Statistiques descriptives globales				
Tests / composition élémentaire	Halite	Gypse	Vermiculite	Sekaninaite
Moyenne	2,09	0,30	0,09	0,20
Kurtosis	10,46	12,89	-1,34	6,67
Skewness	3,13	3,61	0,49	2,47
Kruskall.test (p-value)	0,00	0,00	0,00	0,00
Bartlett.test (p-value)	2,20E-16	2,20E-16	2,20E-16	2,20E-16
Shapiro				
	Halite	Gypse	Vermiculite	Sekaninaite
Huab	1,34E-04	5,49E-05	0,01	2,85E-03
Kuiseb	0,05	0,69	0,44	0,86
Omaruru	0,27	0,38	0,92	0,03
Skewness/Kurtosis				
	Halite	Gypse	Vermiculite	Sekaninaite
Huab	2,24/4,08	2,25/3,96	<u>0,13/-0,92</u>	1,7/2,38
Kuiseb	NA/NA	NA/NA	NA/NA	NA/NA
Omaruru	NA/NA	NA/NA	NA/NA	NA/NA
Test de post-hoc Kruskal, Nemenyi				
	Halite	Gypse	Vermiculite	Sekaninaite
Huab-Kuiseb	0,01	0,01	0,00	0,00
Huab-Omaruru	0,01	<u>0,38</u>	0,01	0,02
Omaruru-Kuiseb	<u>1,00</u>	<u>1,00</u>	<u>1,00</u>	<u>1,00</u>

Tab_B 6 : Analyses statistiques effectuées sur la composition élémentaire dont la moyenne est inférieure à la limite de détection.

Analyses statistiques					
Statistiques descriptives globales des STAE					
Tests / composition élémentaire	Cl	S	Ni	Mn	V
Moyenne	0,16	0,29	0,02	0,08	0,03
Kurtosis	-0,18	-1,41	-0,67	-1,05	-1,11
Skewness	0,86	0,49	-0,31	0,32	0,32
Kruskall.test (p-value)	<0,05	<0,05	>0,05		
Bartlett.test (p-value)	<0,05	<0,05	>0,05		
Statistiques descriptives globales des STPE					
Stats / composition élémentaire	Cl	S	Ni		
Moyenne	0,09	1,12	0,10		
Kurtosis	0,18	8,05	-1,03		
Skewness	1,37	2,72	-0,09		
Kruskall.test (p-value)	>0,05	<0,05	>0,05		
Bartlett.test(p-value)	<0,05	<0,05	>0,05		
Skewness/Kurtosis pour les aérosols					
	Cl	S	Ni	Mn	V
HUAB	0,51/-0,87	-0,15/-1,08	-0,61/-0,56	-0,15/-0,71	-0,91/-0,56
KUISEB	1,12/-0,21	0,00/0,00	0,27/-1,30	0,09/-2,12	0,27/-1,30
OMARURU	0,59/-1,30	1,11/-0,42	-0,17/-1,17	0,05/-1,70	-0,17/-1,17
Skewness/Kurtosis pour les sols					
	Cl	S	Ni		
HUAB	0,73/-1,45	1,64/2,14	0,76/-0,41		
KUISEB	0,00/0,00	0,00/0,00	-0,15/-1,85		
OMARURU	0,91/-1,09	0,00/0,00	0,36/-1,60		
Test post-hoc Kruskal, Nemenyi					
	Cl	S	Ni	Mn	V
HUAB-KUISEB	<0,05	<0,05	>0,05	<0,05	<0,05
HUAB-OMARURU	>0,05	<0,05	>0,05	<0,05	>0,05
OMARURU-KUISEB	>0,05	>0,05	1,00	>0,05	>>0,05
Test post-hoc Kruskal, Nemenyi					
	Cl	S	Ni		
HUAB-KUISEB	>0,05	<0,05	>0,05		
HUAB-OMARURU	1,00	<0,05	<0,05		
OMARURU-KUISEB	>0,05	1,00	<0,05		