

ANNEXE 9A

Etat initial du climat local

ETAT INITIAL DU CLIMAT LOCAL

Préparé pour
Rio Tinto Iron Ore Atlantic Ltd

Date de parution : juin 2023

Rapport préparé par



SRK Consulting (UK) Limited
UK31243

DROITS D'AUTEUR ET CLAUSE DE NON-RESPONSABILITÉ

Les droits d'auteur (et tout autre droit de propriété intellectuelle applicable) de ce document et toute donnée ou tout modèle qui l'accompagnent et qui sont créés par SRK Consulting (UK) Limited (SRK) sont réservés par SRK et protégés par la législation internationale sur les droits d'auteur et autres. Les droits d'auteur sur tout élément constitutif de ce document tel que les illustrations sont détenus et réservés par le détenteur des droits d'auteur tel que mentionné dans ce document.

L'utilisation de ce document est strictement soumise aux conditions concédées par SRK aux destinataires désignés de ce document ou aux personnes auxquelles SRK a consenti à ce qu'il soit transféré (les « destinataires »). Sauf accord contraire de SRK, ceci ne confère aucun droit à aucun tiers. Ce document ne peut être utilisé ou invoqué à aucune fin autre que celle pour laquelle il est indiqué dans le présent document, et SRK ne peut être tenu responsable d'aucune perte ni aucun dommage causé par une telle utilisation ou invocation. Dans le cas où le destinataire du présent document souhaiterait en utiliser la teneur à l'appui de toute fin au-delà ou en dehors de celle expressément indiquée ou pour lever des fonds auprès d'un tiers lorsque le document n'est pas utilisé dans sa forme complète à cette fin, le destinataire doit, avant une telle utilisation, présenter à SRK une ébauche de tout rapport ou document produit par lui susceptible d'incorporer une partie quelconque de la teneur de ce document pour examen afin que SRK puisse s'assurer que celui-ci est présenté d'une manière qui reflète fidèlement et raisonnablement tout résultat ou toute conclusion produits par SRK.

Ce document ne peut être distribué à un tiers que dans son intégralité, comme le prévoit SRK, et ne peut être reproduit ou diffusé dans le domaine public (en tout ou en partie) ni sous aucune forme remaniée, abrégée ou autrement modifiée sauf accord exprès de SRK. Aucune autre œuvre du titulaire des droits d'auteur ne peut être séparée du présent document, utilisée ni reproduite à aucune autre fin que dans le cadre du présent document dans son intégralité, sous licence de SRK. Dans le cas où ce document serait divulgué ou distribué à un tiers, aucun dit tiers ne sera habilité à accorder foi aux informations, garanties ou déclarations susceptibles de figurer dans ce document, et les destinataires de ce document devront indemniser SRK de toute réclamation, toute perte et tout coût qui pourraient être encourus par SRK concernant ces dits tiers.

Entité juridique SRK :		SRK Consulting (UK) Limited
Adresse de SRK :		5th Floor Churchill House 17 Churchill Way Cardiff, CF10 2HH Pays de Galles, Royaume-Uni.
Date :		juin 2023
Numéro du projet :		UK31243
Directeur de projet chez SRK :	Tony Rex	Consultant d'entreprise (hydrogéologie)
Gestionnaire de projet chez SRK :	Dylan John	Consultant supérieur (gestion de projet)
Entité juridique cliente :		Rio Tinto Iron Ore Atlantic Ltd
Adresse du client :		6 St James Square Londres Royaume-Uni SW1Y 4AD

Table des matières

1	INTRODUCTION	1
2	RESUME DES DONNEES CLIMATIQUES DISPONIBLES.....	1
2.1	Données régionales.....	1
2.2	Données du site.....	1
2.3	Comblement des données pluviométriques manquantes	9
3	CONTEXTE REGIONAL	12
4	CONTEXTE CLIMATOLOGIQUE LOCAL	16
5	PRESSION ATMOSPHERIQUE.....	17
6	RAYONNEMENT SOLAIRE.....	20
7	TEMPERATURE.....	24
8	DIRECTION ET VITESSE DU VENT	27
9	HUMIDITE	33
10	ÉVAPORATION.....	36
11	PRECIPITATIONS.....	41
11.1	Formes de précipitations	41
11.2	Mécanismes des précipitations pluvieuses	43
11.3	Répartition pluviométrique	43
11.4	Variabilité pluviométrique.....	46
11.5	Variabilité diurne	50
11.6	Intensités pluviométriques	50
11.7	Orages	53
12	COURBES NOMINALES DE PROFONDEUR-DUREE-FREQUENCE PLUVIOMETRIQUES	54
13	JOURS DE PLUIE	58
14	ÉVALUATION DU CHANGEMENT CLIMATIQUE.....	59
14.1	Climat historique ; tendances observées.....	59
14.2	Climat historique ; orages brefs, changements multiséculaires.....	62
14.3	Projections climatiques	64
	RÉFÉRENCES.....	I

Liste des tableaux

Tableau 2-1 :	données climatiques régionales disponibles.....	3
Tableau 2-2 :	données disponibles des stations météorologiques automatiques sur site	5
Tableau 2-3 :	données disponibles des pluviomètres automatiques autonomes sur site	7
Tableau 2-4 :	données disponibles des pluviomètres manuels sur site	8
Tableau 3-1 :	pluviométrie (mm) dans les stations du sud-est guinéen	14
Tableau 3-2 :	températures (°C) dans les stations du sud-est guinéen	15
Tableau 5-1 :	données récapitulatives de la pression atmosphérique (mbar)	19
Tableau 6-1 :	données récapitulatives du rayonnement solaire (MJ/m ² /jour)	22
Tableau 6-2 :	données récapitulatives du rayonnement ultraviolet à la SMA de Mafindou	23
Tableau 7-1 :	données récapitulatives de la température (°C).....	26
Tableau 8-1 :	données récapitulatives sur la vitesse du vent (m/s)	32
Tableau 9-1 :	données récapitulatives de l'humidité relative (% de saturation)	35
Tableau 10-1 :	données récapitulatives de l'évaporation (mm).....	38
Tableau 10-2 :	zones d'altitude proposées pour le quadrillage de l'ETP	41
Tableau 11-1 :	données récapitulatives des précipitations observées (mm)	48
Tableau 11-2 :	profondeurs et intensités pluviométriques maximums enregistrées sur le site du projet, 2002-2011	52
Tableau 12-1 :	intensités pluviométriques nominales pour les durées allant jusqu'à 24 heures	54
Tableau 12-2 :	intensités pluviométriques nominales pour les durées allant de 2 à 30 jours	54
Tableau 12-3 :	profondeurs pluviométriques nominales pour les durées allant jusqu'à 24 heures	55
Tableau 12-4 :	profondeurs pluviométriques nominales pour les durées allant de 2 à 30 jours	55
Tableau 12-5 :	paramètres des courbes IDF pour les durées allant jusqu'à 24 heures.....	58
Tableau 12-6 :	paramètres des courbes IDF pour les durées allant de 2 à 30 jours	58
Tableau 13-1 :	périodes de précipitations d'une durée d'une heure au pluviomètre Whisky 1 du Pic de Fon	59
Tableau 14-1 :	changements prévus à l'échelle nationale de la température de l'air et des précipitations annuelles en Guinée par rapport à la référence de 1961-1990 pour le RCP4.5 (MEEF 2019)	65
Tableau 14-2 :	résumé des prévisions de changement climatique	66

Liste des figures

Figure 2-1 :	pluviométrie annuelle moyenne en Guinée, 1960-1990.....	2
Figure 2-2 :	contexte climatique en Guinée du Sud-Est, 1960-1990.....	2
Figure 2-3 :	réseau de surveillance météorologique, isohyètes des précipitations annuelles moyennes estimées pour 2002-2020, et zones d'influence des pluviomètres du projet	4
Figure 2-4 :	exhaustivité du relevé pluviométrique quotidien avant (en haut) et après (en bas) comblement et extension	10
Figure 2-5 :	analyse par double cumul entre les pluviomètres comblés et Canga est	11
Figure 2-6 :	précipitations annuelles moyennes à chaque pluviomètre avant et après comblement des données	12
Figure 3-1 :	localisation de la ZCIT (désignée par ITD) sur l'Afrique de l'Ouest en janvier (à gauche) et juillet (à droite). Oke (1977) reproduit dans Fullwood (2008).....	13
Figure 4-1 :	schéma de formation des rotors éoliens de chaque côté d'une crête. Source : Fullwood (2008) d'après Oke (1987).	16
Figure 5-1 :	relation entre l'altitude et la pression atmosphérique moyenne sur le site	17
Figure 5-2 :	pression atmosphérique et température à Dabatini, août 2004-juillet 2005.....	17
Figure 5-3 :	variation diurne de la pression atmosphérique sur le Pic de Fon, 14 août 2004	18
Figure 6-1 :	rayonnement solaire à Dabatini, août 2004-juillet 2005.....	20
Figure 6-2 :	variation diurne du rayonnement solaire lors de journées dégagée et nuageuse à Dabatini	20
Figure 6-3 :	rayonnement solaire moyen mensuel, août 2007-décembre 2009.....	21
Figure 7-1 :	température de l'air à Dabatini, août 2004-juillet 2005.....	24
Figure 7-2 :	variation diurne de la température lors de journées dégagée et nuageuse à Dabatini	25
Figure 7-3 :	relation entre température et altitude sur le Pic de Fon	25
Figure 8-1 :	direction et vitesse du vent à Dabatini, juillet 2004 - juin 2005	28

Figure 8-2 :	direction et vitesse du vent au Pic de Ouéléba, juillet 2007 - février 2008	29
Figure 8-3 :	direction et vitesse du vent à Mafindou, mai 2004 - avril 2005	30
Figure 8-4 :	direction et vitesse du vent à Mandou, mai 2004 - avril 2005	31
Figure 9-1 :	humidité relative à Dabatini, juin 2004 - mai 2005	33
Figure 9-2 :	variation diurne de l'humidité relative en saison humide et sèche à Dabatini	34
Figure 10-1 :	évapotranspiration potentielle et évaporation aquatique libre quotidiennes à Dabatini, 2007	37
Figure 10-2 :	évapotranspiration potentielle quotidienne à toutes les stations météorologiques, de janvier 2007 à juin 2012	37
Figure 10-3 :	relation entre altitude et ETP et variables des composantes, 2007-2011	39
Figure 10-4 :	répartition mensuelle de l'ETP et des variables des composantes, 2007-2011	40
Figure 11-1 :	survenue de brouillard dans les camps de Canga est et Ouéléba	42
Figure 11-2 :	séries chronologiques pluviométriques mensuelles complètes, 2007-2013	44
Figure 11-3 :	dynamique des précipitations saisonnières moyennes sur la zone du projet	45
Figure 11-4 :	précipitations mensuelles et annuelles à Canga est, 2002-2020	46
Figure 11-5 :	variation diurne des précipitations sur le Pic de Fon	51
Figure 11-6 :	orages enregistrés à Canga est, 2007	53
Figure 12-1 :	courbes IDF pluviométriques nominales pour les durées allant jusqu'à 24 heures	56
Figure 12-2 :	courbes IDF pluviométriques nominales pour les durées allant de 2 à 30 jours	57
Figure 14-1 :	tendances des températures et précipitations en Guinée du sud-est 1	60
Figure 14-2 :	Tendances des températures et précipitations en Guinée du sud-est 2	61
Figure 14-3 :	précipitations journalières du site d'après le modèle ERA5 (utilisées comme indicateur) de 1950 à 2020	62
Figure 14-4 :	courbes intensité-durée-fréquence d'après le modèle ERA5, informations présentées pour des durées d'une heure à 30 jours (720 h) pour des périodicités de 2 à 100 ans, périodes historiques représentées en lignes colorées. Graphique à utiliser uniquement pour le contexte historique (ne pas utiliser en conception de génie civil)	63
Figure 14-5 :	anomalie de la température de l'air (°C) en Guinée d'ici 2100 (MEEF 2019)	64
Figure 14-6 :	anomalie des précipitations annuelles moyennes (%) pour la Guinée d'ici 2100 (MEEF 2019)	64

Liste des annexes techniques

A	RAPPORT D'ÉTUDE DE VÉRIFICATION 2010 DU MET OFFICE	A-1
B	MÉTHODOLOGIE DE L'ETP ET EO	B-1
C	ÉTUDE QUADRILLÉE DES PRÉCIPITATIONS	C-1

RÉFÉRENCE CLIMATIQUE LOCALE

1 INTRODUCTION

Le présent rapport fournit la description de référence du climat du sud-est de la Guinée et du site minier à l'appui de l'EISE. La caractérisation du cadre climatique du sud-est de la Guinée a exploité les données des stations climatiques gouvernementales fournies par la *Direction Nationale de la Météorologie (DNM)* à Conakry. La caractérisation du climat et de sa variabilité sur le site minier a exploité les données enregistrées par le programme de surveillance météorologique du projet en cours depuis 2001. Toutes les données météorologiques enregistrées par le programme de surveillance du site et fournies par la DNM sont gérées dans une base de données Microsoft Access.

Une préoccupation particulière du projet a été qu'en abaissant la crête au Pic de Fon et à Ouéléba sont susceptibles de survenir des changements pluviométriques et d'autres variables météorologiques pouvant entraîner des effets environnementaux supplémentaires. Afin d'étudier l'impact climatologique de la mine envisagée, l'Office météorologique du Royaume-Uni (UKMO ou Met Office), avec l'aide de la DNM, a entrepris une étude de modélisation numérique du climat à haute résolution entre 2008 et 2010 à l'aide du modèle unifié du Met Office (le modèle). Les investigations du modèles sont décrites au chapitre 9 de l'EISE. Pour tester l'applicabilité du modèle à la chaîne du Simandou, l'UKMO a mené une étude de vérification des résultats du modèle. Le rapport de l'étude de vérification du Met Office est présenté à l'annexe A. Les rapports dressés par l'UKMO au cours de l'étude de modélisation sont recensés ci-dessous sous Références.

2 RESUME DES DONNEES CLIMATIQUES DISPONIBLES

2.1 Données régionales

Le Tableau 2-1 énumère les données figurant dans la base de données Access des stations météorologiques exploitées par la DNM. Les données présentent des lacunes. Les emplacements des stations sont indiqués dans la Figure 2-1 et la Figure 2-2

2.2 Données du site

Les données du site comprennent les données météorologiques (divers paramètres) recueillies par 6 stations météorologiques automatiques (SMA), et les données pluviométriques recueillies par 14 pluviomètres automatiques autonomes et 10 pluviomètres manuels répartis sur la zone du projet (Figures 2-3).

Le Tableau 2-2 énumère les données figurant dans la base de données des stations météorologiques automatiques. Les stations échantillonnent les conditions météorologiques sur le sommet de la crête du Pic de Fon (SMA de Dabatini) et Ouéléba (SMA du Pic de Ouéléba), les plaines du côté est de la chaîne (SMA de Mafindou et SMA de l'aéroport de Beyla) et du côté ouest (SMA de Mandou), ainsi que dans la zone forestière du sud-ouest du Pic de Fon (SMA de Fokou ouest). Les données de 30 minutes ont été traitées en totaux ou moyennes journaliers et mensuels, selon le cas. L'aéroport de Beyla et Dabatini sont restés ouverts jusqu'en 2022, ce toutefois avec des lacunes dans leurs registres. Toutes les autres stations ont été fermées au cours de la période 2012-2016. Le processus de rénovation et réouverture des stations en vue du projet a débuté avec la station du Pic de Ouéléba en février 2022.

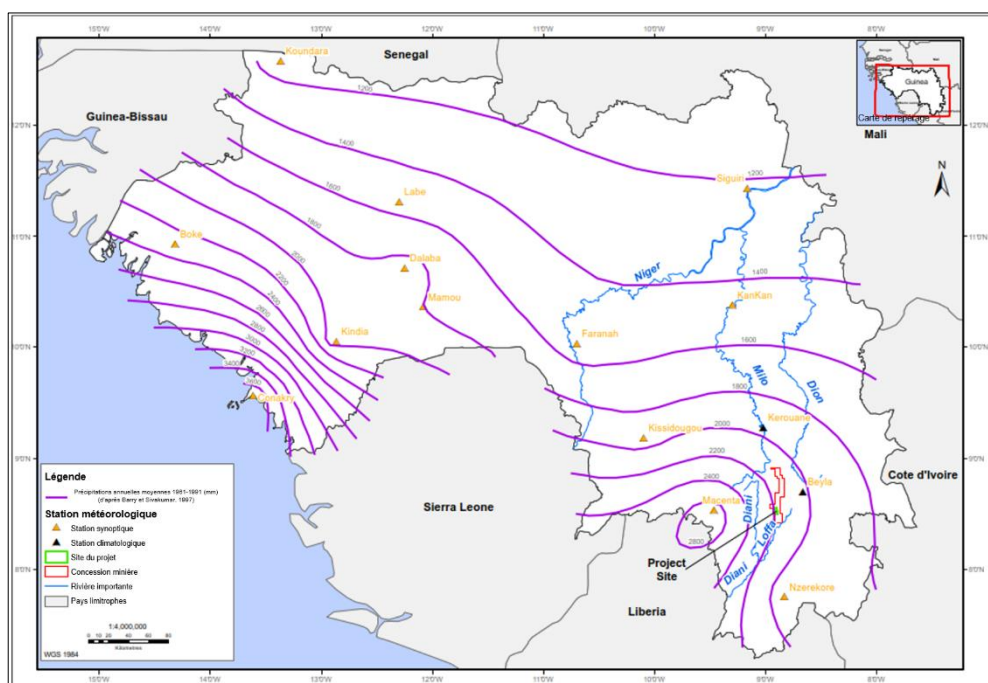


Figure 2-1 : pluviométrie annuelle moyenne en Guinée, 1960-1990

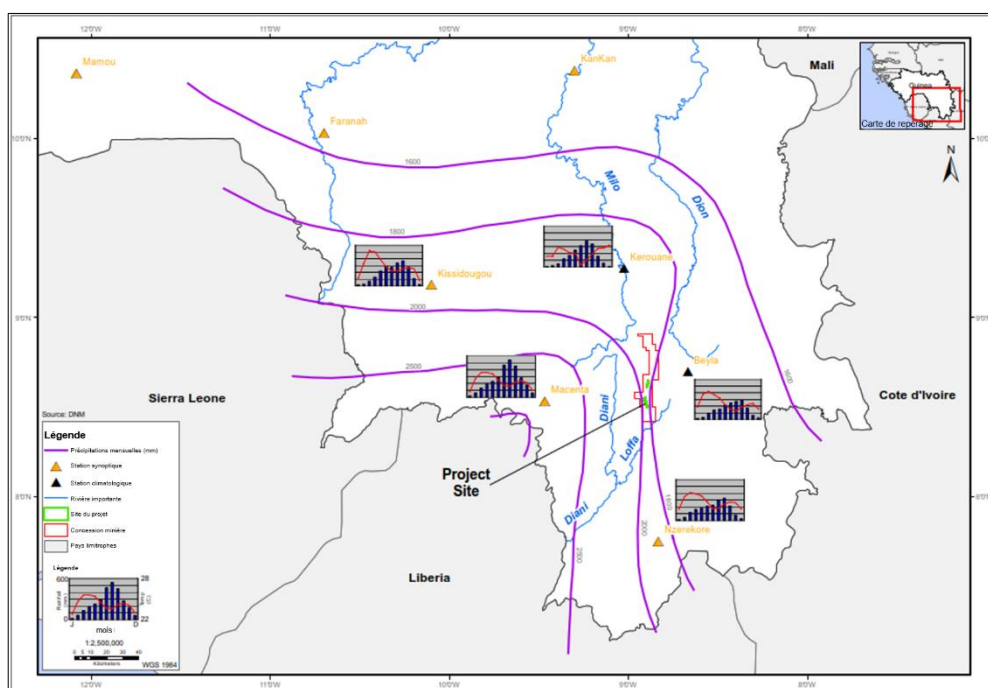


Figure 2-2 : contexte climatique en Guinée du Sud-Est, 1960-1990

Tableau 2-1: données climatiques régionales disponibles

Station	Altitude m	Paramètres	Base chronologique	Première date	Dernière date
Beyla	700	Couverture nuageuse	06:00, 12:00, 18:00	Mai 2002	Oct. 2005
		Évap. (Piche)	Total quotidien	Mai 2002	Oct. 2005
		Temp. mini.	Quotidienne	Jan. 2000	Oct. 2005
		Temp. maxi.	Quotidienne	Mars 2000	Nov. 2002
		Temp. moyenne	Quotidienne	Mars 1897	Déc. 2002
		Précipitations	Total quotidien	Mars 1897	Déc. 2007
		Jours de pluie	Total mensuel	Jan. 1980	Déc. 2003
		Humidité rel.	06:00, 12:00, 18:00	Mai 2002	Oct. 2005
		Vitesse du vent	06:00, 12:00, 18:00	Mai 2002	Oct. 2005
Kérouané	520	Précipitations	Total quotidien	Jan. 1956	Déc. 2005
		Temp. mini.	Quotidienne	Jan. 1997	Juin 2004
		Temp. maxi.	Quotidienne	Jan. 1997	Déc. 2003
		Temp. moyenne	Quotidienne	Jan. 1997	Déc. 2003
Kissidougou	524	Précipitations	Total quotidien	Jan. 1903	Déc. 2005
		Temp. mini.	Quotidienne	Jan. 1903	Déc. 2005
		Temp. maxi.	Quotidienne	Jan. 1903	Déc. 2005
		Temp. moyenne	Quotidienne	Jan. 1903	Déc. 2005
Nzérékoré		Précipitations	Total quotidien	Mai 1922	Déc. 2007
		Temp. mini.	Quotidienne	Juil. 1956	Déc. 2005
		Temp. maxi.	Quotidienne	Juil. 1956	Déc. 2005
		Temp. moyenne	Quotidienne	Juil. 1956	Déc. 2005
Macenta	520	Précipitations	Total quotidien	Mai 1922	Déc. 2007
		Temp. mini.	Quotidienne	Juil. 1956	Déc. 2005
		Temp. maxi.	Quotidienne	Juil. 1956	Déc. 2005
		Temp. moyenne	Quotidienne	Juil. 1956	Déc. 2005

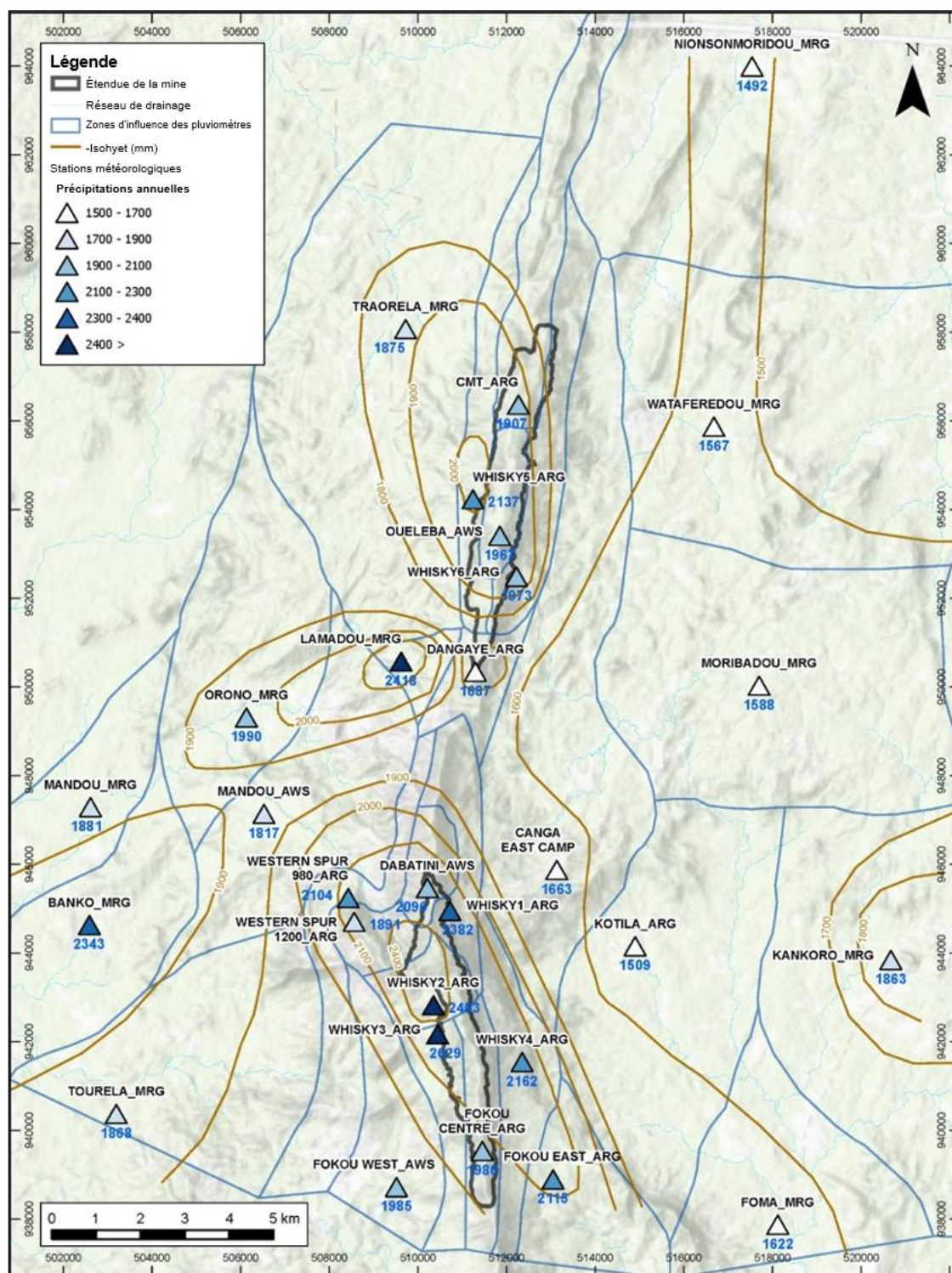


Figure 2-3 : réseau de surveillance météorologique, isohyètes des précipitations annuelles moyennes estimées pour 2002-2020, et zones d'influence des pluviomètres du projet

Tableau 2-2 : données disponibles des stations météorologiques automatiques sur site

Station	Altitude m	Paramètres	Base chronologique	Première date	Dernière date
Aéroport de Beyla	652	Pression barométrique	1 heure	Mars 2010	Déc. 2021
531494E		Température	1 heure	Mars 2010	Déc. 2021
961368N		Précipitations	1 heure	Mars 2010	Déc. 2021
		Humidité relative	1 heure	Mars 2010	Déc. 2021
		Rayonnement solaire	1 heure	Mars 2010	Déc. 2021
		Vitesse du vent	1 heure	Mars 2010	Déc. 2021
		Direction du vent	1 heure	Mars 2010	Déc. 2021
Dabatini	1650	Pression barométrique	30 minutes	Déc. 2001	Fév. 2022
510213E		Évap. (eaux libres)*	Quotidienne	Jan. 2007	Juil. 2022
945495N		Évapotranspiration pot.*	Quotidienne	Jan. 2007	Juil. 2022
		Température	30 minutes	Déc. 2001	Fév. 2022
		Précipitations	30 minutes	Déc. 2001	Fév. 2010
		Jours de pluie	Quotidienne	Déc. 2001	Juil. 2012
		Humidité relative	30 minutes	Déc. 2001	Fév. 2022
		Rayonnement solaire	30 minutes	Déc. 2001	Juil. 2012
		Pression de vap. sat.*	30 minutes	Mai 2008	Juin 2011
		Pression de vap.*	30 minutes	Juil. 2007	Juin 2011
		Vitesse du vent	30 minutes	Déc. 2001	Jan. 2016
		Direction du vent	30 minutes	Déc. 2001	Jan. 2016
		Particules en suspension	30 minutes	Déc. 2001	Août 2005
Fokou ouest	820	Pression barométrique	30 minutes	Juil. 2007	Mars 2013
509515E		Évap. (eaux libres)*	Quotidienne	Juil. 2007	Avril 2012
938750N		Évapotranspiration pot.*	Quotidienne	Juil. 2007	Avril 2012
		Température	30 minutes	Juil. 2007	Mars 2013
		Précipitations	30 minutes	Fév. 2007	Août 2012
		Humidité relative	30 minutes	Juil. 2007	Jan. 2013
		Rayonnement solaire	30 minutes	Juil. 2007	Mars 2013
		Pression de vap. sat.*	30 minutes	Juil. 2007	Juin 2011
		Pression de vap.*	30 minutes	Juil. 2007	Juin 2011
		Vitesse du vent	30 minutes	Juil. 2007	Mars 2013
		Direction du vent	30 minutes	Juil. 2007	Mars 2013
Mafindou	830	Pression barométrique	30 minutes	Fév. 2004	Avril 2012
523800E		Évap. (eaux libres)*	Quotidienne	Août 2007	Déc. 2011
950714N		Évapotranspiration pot.*	Quotidienne	Août 2007	Déc. 2011
		Température	30 minutes	Déc. 2001	Août 2012
		Précipitations	30 minutes	Déc. 2001	Août 2012
		Humidité relative	30 minutes	Juil. 2007	Août 2012
		Rayonnement solaire	30 minutes	Août 2007	Août 2012
		Rayonnement UV-a	30 minutes	Fév. 2008	Avril 2012
		Rayonnement UV-b	30 minutes	Fév. 2008	Juin 2011
		Rayonnement UV-c	30 minutes	Fév. 2008	Mai 2012
		Pression de vapeur sat.*	30 minutes	Déc. 2007	Avril 2012
		Pression de vapeur*	30 minutes	Juil. 2007	Avril 2012
		Vitesse du vent	30 minutes	Fév. 2004	Avril 2012
		Direction du vent	30 minutes	Fév. 2004	Avril 2012

Station	Altitude m	Paramètres	Base chronologi que	Première date	Dernière date
Mandou	710	Pression barométrique	30 minutes	Fév. 2004	Juil. 2012
506525E		Évap. (eaux libres)*	Quotidienne	Sept. 2007	Avril 2012
947166N		Évapotranspiration pot.*	Quotidienne	Sept. 2007	Avril 2012
		Température	30 minutes	Déc. 2001	Juil. 2012
		Précipitations	30 minutes	Déc. 2001	Juil. 2012
		Humidité relative	30 minutes	Sept. 2007	Juil. 2012
		Rayonnement solaire	30 minutes	Sept. 2007	Juil. 2012
		Pression de vapeur sat.*	30 minutes	Mai 2008	Juin 2012
		Pression de vapeur*	30 minutes	Sept. 2007	Juin 2012
		Vitesse du vent	30 minutes	Fév. 2004	Juil. 2012
		Direction du vent	30 minutes	Fév. 2004	Juil. 2012
Pic de Ouéléba	1330	Pression barométrique	30 minutes	Juil. 2007	Juin 2013
511845E		Évap. (eaux libres)*	Quotidienne	Juil. 2007	Mars 2012
953438N		Évapotranspiration pot.*	Quotidienne	Juil. 2007	Mars 2012
		Température	30 minutes	Juil. 2007	Juin 2013
		Précipitations	30 minutes	Juil. 2007	Jan. 2014
		Humidité relative	30 minutes	Juil. 2007	Juin 2013
		Rayonnement solaire	30 minutes	Juil. 2007	Sept. 2015
		Pression de vapeur sat.*	30 minutes	Juil. 2008	Juin 2011
		Pression de vapeur*	30 minutes	Juil. 2007	Juin 2011
		Vitesse du vent	30 minutes	Juil. 2007	Juin 2013
		Direction du vent	30 minutes	Juil. 2007	Juin 2013
Kérouané**	1450	Pression barométrique	30 minutes	Déc. 2001	Juil. 2009
507890E		Température	30 minutes	Déc. 2001	Juil. 2009
1019380N		Précipitations	30 minutes	Déc. 2001	Juil. 2009
		Humidité relative	30 minutes	Déc. 2001	Juil. 2009
		Rayonnement solaire	30 minutes	Déc. 2001	Juil. 2009
		Pression de vap. sat.*	30 minutes	Juil. 2008	Juil. 2009
		Pression de vap.*	30 minutes	Juin 2007	Juil. 2009
		Vitesse du vent	30 minutes	Déc. 2001	Juil. 2009
		Direction du vent	30 minutes	Déc. 2001	Juil. 2009

*Calculé. **La SMA de Kérouané était une station météo automatique de Rio Tinto située sur la crête à l'est de la ville de Kérouané. La station a été fermée en juillet 2009, mais est incluse ici par souci d'exhaustivité.

Le Tableau 2-3 énumère les données de contrôle qualitatif figurant dans la base de données météorologiques des pluviomètres automatiques autonomes (des pluviomètres automatiques font également partie de chaque station météorologique). En 2011, l'intervalle de relevé est passé au relevé événementiel sur la plupart des pluviomètres automatiques autonomes. La collecte des données et le contrôle qualitatif se poursuivent.

Tableau 2-3 : données disponibles des pluviomètres automatiques autonomes sur site

Station	Altitude m	Paramètres	Base chronologique	Première date	Dernière date
<i>Pic de Fon</i>					
Canga est	955	Précipitations	30 minutes	Jan. 2007	Mai 2009
			5 minutes	Mai 2009	Juin 2011
			Évènement	Juin 2011	Jan. 2022
Dangaye	1115	Précipitations	30 minutes	Juin 2008	Oct. 2011
			5 minutes	Oct. 2011	Mai 2014
Centre de Fokou	1300	Précipitations	30 minutes	Oct. 2006	Juin 2011
			Évènement	Juin 2011	Sept. 2012
Fokou est	850	Précipitations	30 minutes	Fév. 2007	Avril 2011
Pluviomètre vérificateur de Fokou ouest	1030	Précipitations	5 minutes	Mai 2009	Juin 2012
			Évènement	Juin 2011	Nov. 2012
Foma		Précipitations	5 minutes	Nov. 2010	Oct. 2011
			Évènement	Oct. 2011	Mai 2012
Éperon ouest 1200	1200	Précipitations	30 minutes	Déc. 2006	Juin 2011
			Évènement	Juin 2011	Juin 2013
Éperon ouest 980	980	Précipitations	30 minutes	Jan. 2007	Juin 2011
			Évènement	Juin 2011	Mars 2013
Whisky 1	1340	Précipitations	30 minutes	Nov. 2005	Oct. 2008
			5 minutes	Oct. 2008	Nov. 2008
			30 minutes	Nov. 2008	Juin 2009
			5 minutes	Juin 2009	Juil. 2014
			Évènement	Juin 2011	Oct. 2021
Whisky 2	1350	Précipitations	30 minutes	Nov. 2005	Oct. 2008
			5 minutes	Oct. 2008	Déc. 2008
			30 minutes	Déc. 2008	Juin 2009
			5 minutes	Juin 2009	Juil. 2014
			Évènement	Juin 2011	Juil. 2014
Whisky 3	1205	Précipitations	30 minutes	Fév. 2007	Juil. 2011
			Évènement	Juil. 2011	Mai 2014
Whisky 4	990	Précipitations	30 minutes	Jan. 2007	Oct. 2009
			5 minutes	Oct. 2009	Juin 2011
			Évènement	Juin 2011	Mai 2012
<i>Ouéléba</i>					
Site EGC	1160	Précipitations	30 minutes	Avr. 2008	Oct. 2008
			5 minutes	Oct. 2008	Nov. 2008
			30 minutes	Nov. 2008	Mai 2009
			5 minutes	Mai 2009	Juin 2011
			Évènement	Juin 2011	Sept. 2012
Nionsonmoridou	670	Précipitations	Évènement	Oct. 2015	Déc. 2021
Wataferedou	780	Évènement	Évènement	Juin 2014	Déc. 2021
Whisky 5	1095	Précipitations	30 minutes	Fév. 2007	Oct. 2008
			5 minutes	Oct. 2008	Nov. 2008
			30 minutes	Nov. 2008	Août 2009
			5 minutes	Août 2009	Juin 2011
			Évènement	Juin 2011	Sept. 2012
Whisky 6	1060	Précipitations	30 minutes	Fév. 2007	Oct. 2008
			5 minutes	Oct. 2008	Nov. 2008
			30 minutes	Nov. 2008	Sept. 2009
			5 minutes	Sept. 2009	Oct. 2011
			Évènement	Oct. 2011	Déc. 2015

Le Tableau 2-4 énumère les données de contrôle qualitatif figurant dans la base de données météorologiques des pluviomètres manuels situés dans les villages. L'apparition de brouillard, tonnerre et éclairs pendant le laps de temps entre chaque observation est également enregistrée par l'observateur. La collecte des données et le contrôle qualitatif se poursuivent.

Tableau 2-4 : données disponibles des pluviomètres manuels sur site

Station	Altitude m	Paramètres	Base chronologique ¹	Première date	Dernière date
<i>Pic de Fon</i>					
Banko	545	Précipitations	08:00, 16:00	Mai 2007	Août 2019
		Brouillard	08:00, 16:00	Mai 2007	Août 2019
		Tonnerre	08:00, 16:00	Mai 2007	Août 2019
Canga est	955	Précipitations	08:00, 16:00	Jan. 2002	Déc. 2021
		Brouillard	08:00, 16:00	Mai 2007	Déc. 2020
		Tonnerre	08:00, 16:00	Mai 2007	Déc. 2020
		Température	08:00, 12:00, 16:00	Jan. 2002	Jan. 2008
		Température maxi.	Quotidienne	Jan. 2002	Jan. 2008
		Température mini.	Quotidienne	Jan. 2002	Jan. 2008
Foma	626	Précipitations	08:00, 16:00	Mai 2007	Mars 2016
		Brouillard	08:00, 16:00	Mai 2007	Mars 2016
		Tonnerre	08:00, 16:00	Mai 2007	Mars 2016
Kankoro	s/o	Précipitations	08:00, 16:00	Jan. 2009	Mars 2016
		Brouillard	08:00, 16:00	Jan. 2009	Déc. 2011
		Tonnerre	08:00, 16:00	Jan. 2009	Déc. 2011
Moribadou	s/o	Précipitations	08:00, 16:00	Jan. 2009	Oct. 2019
		Brouillard	08:00, 16:00	Jan. 2009	Sept. 2012
		Tonnerre	08:00, 16:00	Jan. 2009	Sept. 2012
Mandou	565	Précipitations	08:00, 16:00	Jan. 2009	Déc. 2020
		Brouillard	08:00, 16:00	Jan. 2009	Déc. 2011
		Tonnerre	08:00, 16:00	Jan. 2009	Déc. 2011
Tourela	s/o	Précipitations	08:00, 16:00	Juin 2007	Juin 2019
		Brouillard	08:00, 16:00	Juin 2007	Déc. 2011
		Tonnerre	08:00, 16:00	Juin 2007	Déc. 2011
<i>Ouéléba</i>					
Lamadou	780	Précipitations	08:00, 16:00	Juin 2007	Fév. 2016
		Brouillard	08:00, 16:00	Août 2007	Déc. 2011
		Tonnerre	08:00, 16:00	Août 2007	Déc. 2011
Nionsonmoridou	670	Précipitations	08:00, 16:00	Juil. 2007	Déc. 2019
		Brouillard	08:00, 16:00	Juil. 2007	Août 2012
		Tonnerre	08:00, 16:00	Juil. 2007	Août 2012
Camp d'Ouéléba	1200	Précipitations	08:00, 16:00	Mars 2006	Mai 2008
		Brouillard	08:00, 16:00	Juin 2007	Mai 2008
		Tonnerre	08:00, 16:00	Juin 2007	Mai 2008
Traorela	720	Précipitations	08:00, 16:00	Mai 2007	Déc. 2019
		Brouillard	08:00, 16:00	Mai 2007	Déc. 2011
		Tonnerre	08:00, 16:00	Mai 2007	Déc. 2011
Wataferedou	780	Précipitations	08:00, 16:00	Mai 2007	Sept. 2019
		Brouillard	08:00, 16:00	Mai 2007	Sept. 2019
		Tonnerre	08:00, 16:00	Mai 2007	Sept. 2019

¹ Les observations de 08h00 et 16h00 sont combinées en séries quotidiennes.

2.3 Comblement des données pluviométriques manquantes

Les registres observés aux différents pluviomètres du projet sont relativement courts et comportent de nombreuses lacunes. Un relevé pluviométrique quotidien sur chaque pluviomètre du projet, aussi complet que possible, a été généré par le comblement des lacunes et l'extension des registres, opération dite « comblement des données ». Le registre de chaque pluviomètre « cible » a été comblé par une régression basée sur la cartographie des quantiles à partir d'un pluviomètre « donneur » voisin choisi sur la base de son coefficient de corrélation avec le pluviomètre cible égalant ou dépassant un coefficient seuil donné et dépassant ceux d'autres pluviomètres « candidats ». Pour maximiser le comblement et l'extension tout en préservant la qualité des données, le coefficient de corrélation seuil initial appliqué était de 0,5, puis il a été réduit dans les itérations à 0,4, 0,3 et finalement 0,2. La Figure 2-4 montre l'exhaustivité des relevés pluviométriques quotidiens, qui comprennent les relevés régionaux de la DNM, avant et après le comblement des données.

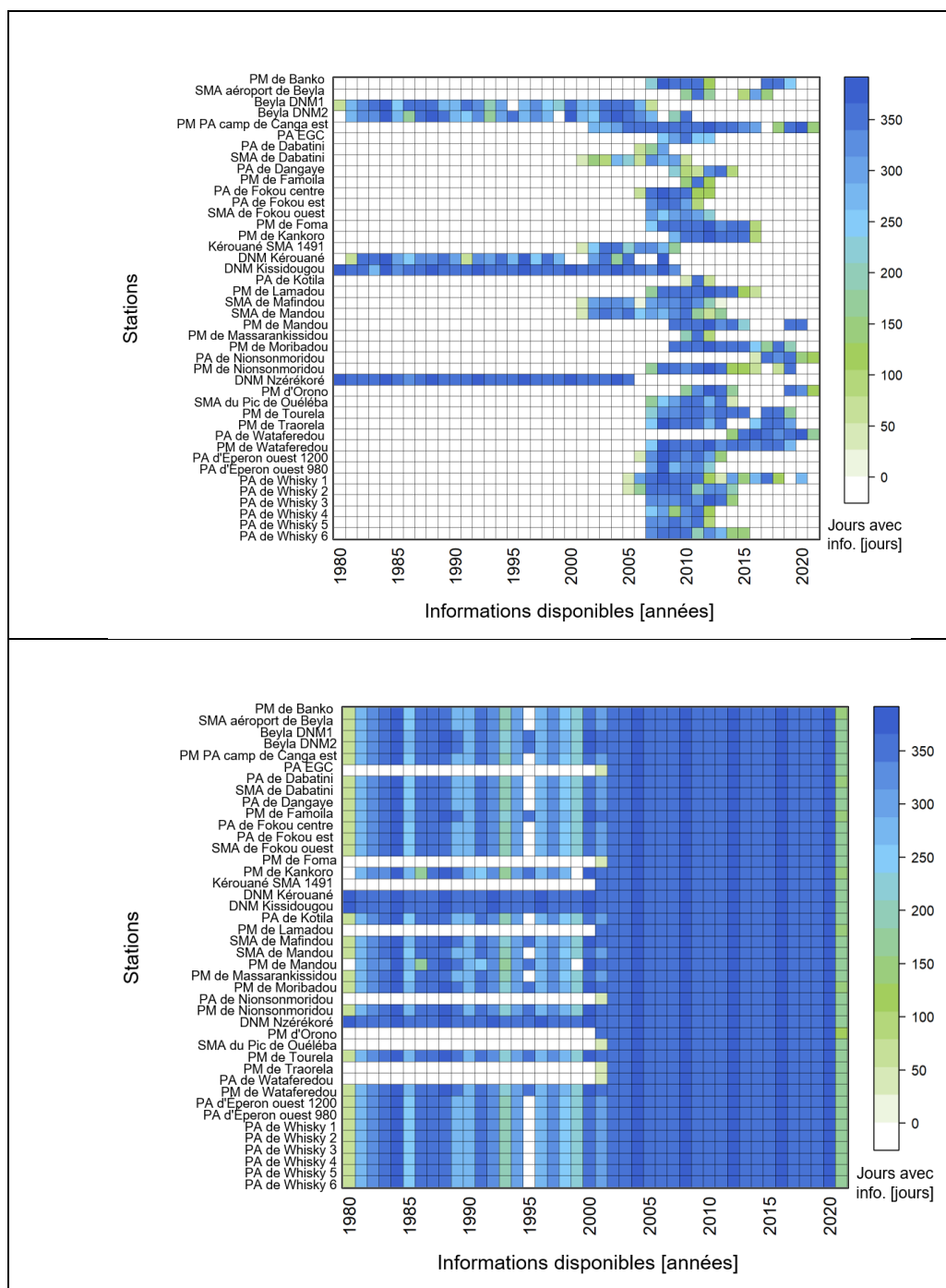


Figure 2-4 : exhaustivité du relevé pluviométrique quotidien avant (en haut) et après (en bas) comblement et extension

L'analyse par double cumul entre chaque pluviomètre et Canga est, registre pluviométrique le plus long et le plus fiable sur le site, suggère que les registres comblés sont de qualité acceptable (Figure 2-5).

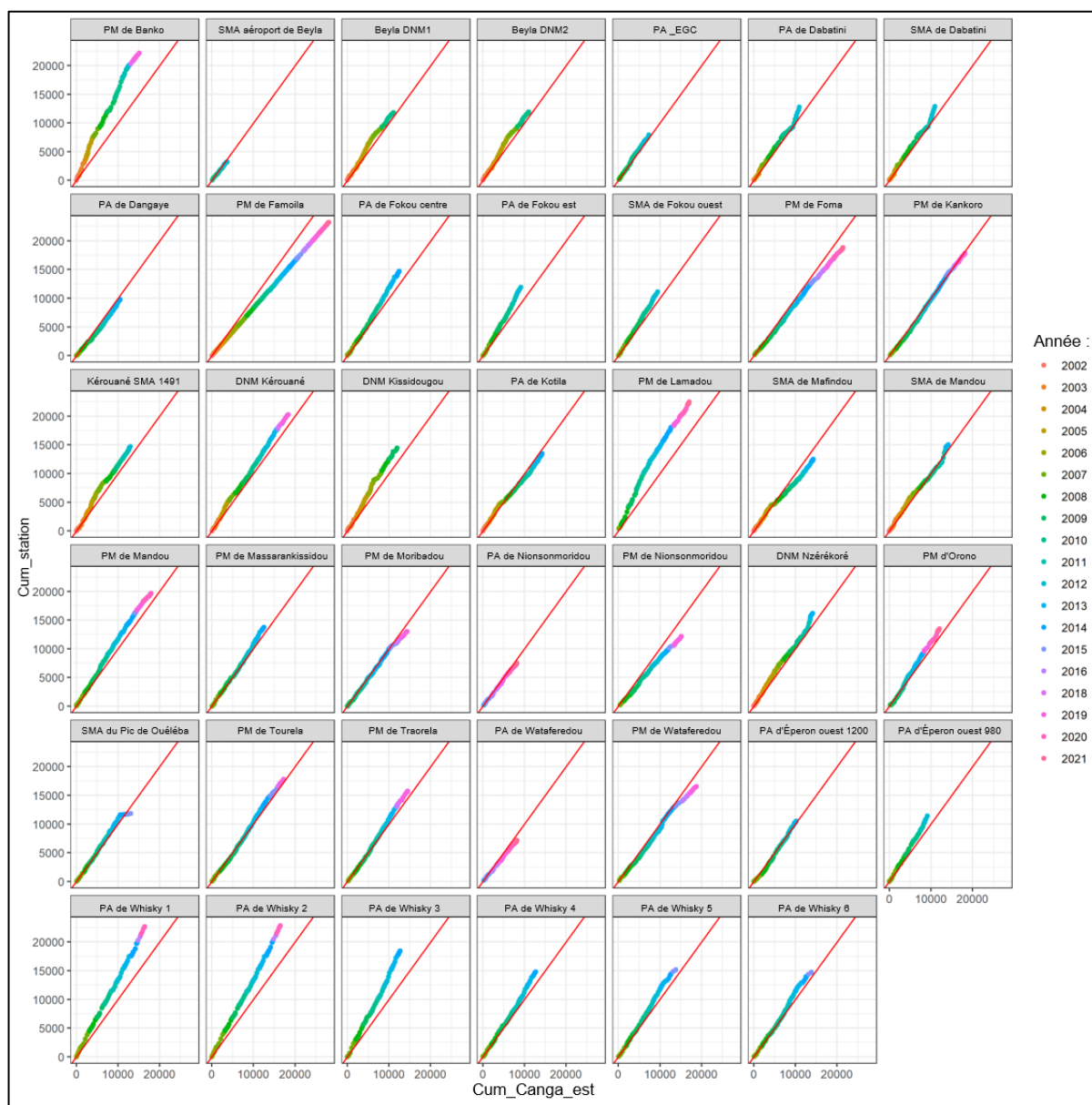


Figure 2-5 : analyse par double cumul entre les pluviomètres comblés et Canga est

La Figure 2-6 montre les précipitations annuelles moyennes (PAM) estimées à chaque pluviomètre, et les PAM après le processus de comblement des données. La plupart des pluviomètres ne présentent qu'une modification minimale des PAM.

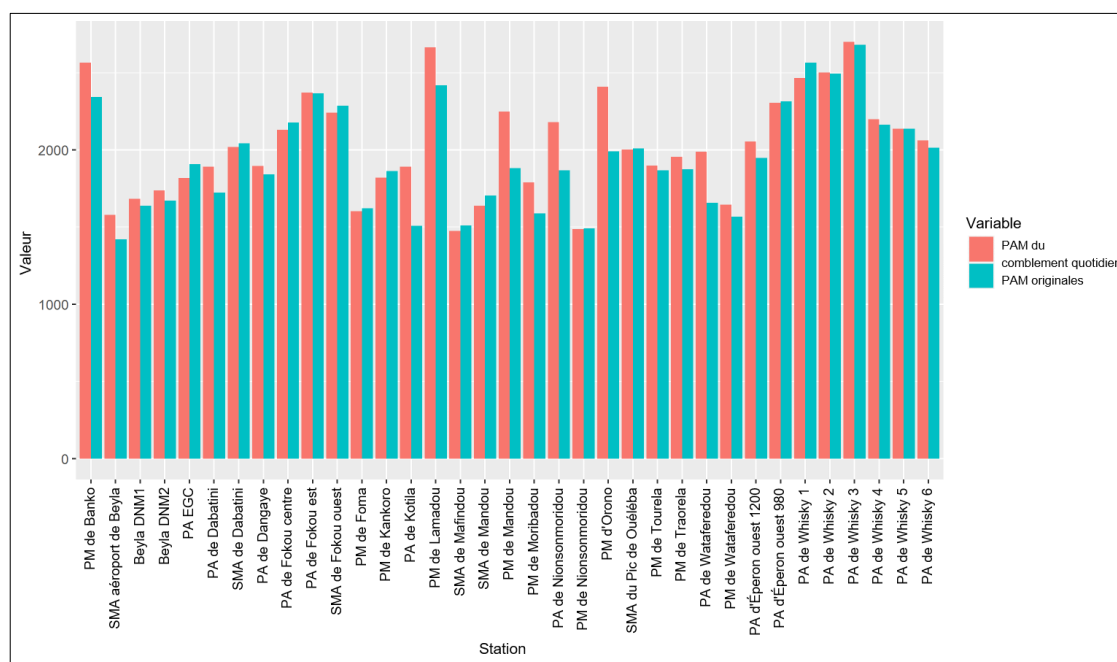


Figure 2-6 : précipitations annuelles moyennes à chaque pluviomètre avant et après comblement des données

La Figure 2-3 montre la répartition spatiale des précipitations annuelles moyennes sur Ouéléba et le Pic de Fon d'après les registres comblés et étendus de la période 2001-2020.

3 CONTEXTE REGIONAL

Le climat du sud-est de la Guinée, et du site du projet, est tropical humide saisonnier et dominé par la « mousson ouest-africaine ». La Figure 2-1 montre la répartition généralisée des précipitations annuelles moyennes en Guinée, tirée de Barry et Sivakumar (1997). La Figure 2-2 porte sur le sud-est de la Guinée, et tient compte des données de la zone du projet. La chaîne du Simandou modifie la répartition régionale des précipitations et d'autres variables météorologiques. Il existe par exemple des gradients est-ouest abrupts dans les précipitations sur l'ensemble de la chaîne. Les températures en altitude sont inférieures à celles de la plaine à l'est et à l'ouest de la chaîne.

Le climat guinéen est dominé par des phénomènes suscités par l'interaction de (a) la migration saisonnière du soleil et de la zone de rayonnement et chaleur maximums, vers le nord de janvier à juillet et vers le sud d'août à décembre, (b) des changements saisonniers connexes de la répartition des systèmes de haute pression subtropicaux sur le désert du Sahara et l'océan Atlantique au sud. Une convection d'air à grande échelle est associée à la zone de chaleur maximum, en créant une zone latitudinale migrante de basse pression dans laquelle les vents de surface secs convergent du nord-est et les vents de surface humides du sud-est, en provenance des zones de haute pression au-dessus du Sahara et de l'océan Atlantique respectivement. Cette zone, souvent appelée zone de convergence intertropicale (ZCIT), est caractérisée comme zone d'instabilité et de précipitations accrues résultant d'une convection généralisée d'air humide.

En décembre, la ZCIT est à sa position moyenne la plus méridionale de 5°N (Figure 3-1). À cette époque, des vents secs du nord-est dominent la Guinée, en créant des conditions de saison sèche. La ZCIT migre vers le nord en passant sur le sud de la Guinée entre février et mai. La position la plus septentrionale de la ZCIT est en moyenne de 20°N, et atteinte en juillet-août. La ZCIT migre ensuite vers le sud, en passant une deuxième fois au-dessus de la Guinée entre août et septembre/octobre. Comme l'air au sud de la ZCIT est humide, les précipitations sur la Guinée, et la zone du projet, sont saisonnières et de mousson. La saison pluvieuse est la plus longue au sud du pays (9 à 10 mois à Nzérékoré/Macenta) et la plus courte (5 mois) au nord. La saison pluvieuse sur le site du projet dure environ huit mois, de mars à octobre. La saison sèche dure de novembre à février. Bien que l'on fasse ici une nette distinction entre saison pluvieuse et saison sèche, des précipitations peuvent survenir en saison sèche quand de brèves incursions d'air humide proviennent du sud. Environ 90 à 95 % des précipitations annuelles ont lieu pendant la saison humide dans le sud-est de la Guinée.

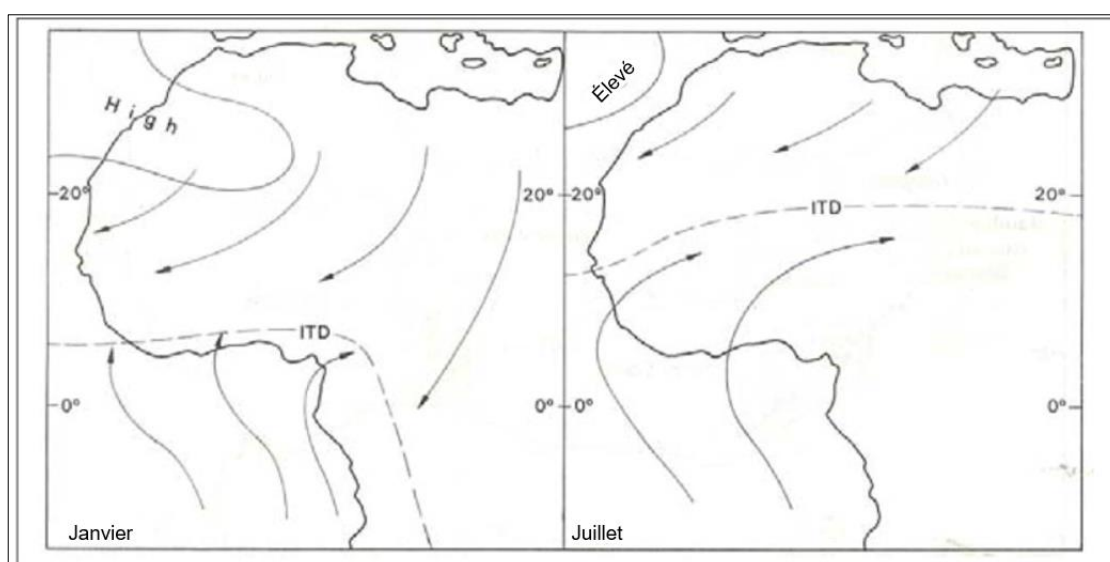


Figure 3-1 : localisation de la ZCIT (désignée par ITD) sur l'Afrique de l'Ouest en janvier (à gauche) et juillet (à droite). Oke (1977) reproduit dans Fullwood (2008)

Le Tableau 3-1 et le Tableau 3-2 présentent les précipitations et les températures moyennes mensuelles aux stations météorologiques de la DNM dans le sud-est de la Guinée. Ces données sont présentées à la Figure 2.2. Elles montrent la répartition saisonnière des précipitations et températures. Les températures les plus élevées se manifestent au début de l'année. Les températures sont plus basses au milieu de l'année, même si le soleil est présent, en raison de l'augmentation de la couverture nuageuse pendant la mousson.

Fullwood (2008) présente une analyse plus détaillée du contexte climatique régional du projet et des mécanismes météorologiques qui en sont à l'origine.

Tableau 3-1 : pluviométrie (mm) dans les stations du sud-est guinéen

	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Ann.
Beyla (1905-2007)													
Moyenne mensuelle	12.4	30.9	91.4	140.8	154.4	211.6	242.7	270.9	280.6	167.1	58.0	22.4	1683.2
Maxi. mensuel	92.3	247.6	251.7	244.9	364.8	450.3	428.8	488.8	529.0	390.2	192.2	147.0	529.0
Mini. mensuel	0.0	0.0	0.0	8.8	9.6	22.1	97.3	113.7	31.6	43.0	0.0	0.0	0.0
Maxi. quotidien	60.2	80.1	64	81.4	86	82	230	196	109.5	95	63.8	97.5	230
n	56	54	61	60	59	63	52	53	57	59	59	57	71
Kérouané (1956-2007)													
Moyenne mensuelle	5.3	19.5	46.2	114.8	169.2	247.2	312.0	377.4	337.3	156.1	55.2	5.5	1845.6
Maxi. mensuel	68.0	134.9	217.7	315.1	316.0	489.1	533.3	622.7	618.8	342.2	202.5	40.3	622.7
Mini. mensuel	0.0	0.0	0.0	0.0	60.3	115.8	170.1	243.6	173.9	64.1	0.0	0.0	0.0
Maxi. quotidien	37.5	60.0	67.2	89.7	73.2	138.3	132.6	159.7	122	69.5	71.2	40.3	159.7
n	39	40	40	38	39	38	33	39	38	36	36	32	41
Kissidougou (1903-2005)													
Moyenne mensuelle	13.4	23.9	65.5	128.0	218.7	285.9	270.4	334.7	365.5	270.9	100.7	17.6	2095.2
Maxi. mensuel	145.0	253.0	234.5	333.0	567.0	599.0	645.0	608.5	602.1	684.9	229.1	134.5	684.9
Mini. mensuel	0.0	0.0	0.0	13.0	64.1	129.7	112.2	87.0	162.9	110.6	2.7	0.0	0.0
Maxi. quotidien	81	96.4	98.8	85.8	143.1	171.7	120.3	150	203.4	144.2	78.5	106.5	203.4
n	85	84	82	83	84	87	86	84	87	84	84	80	91
Nzérékoré (1922-2007)													
Moyenne mensuelle	14.2	45.6	117.5	157.8	177.8	205.1	220.5	298.4	325.9	211.4	78.5	26.1	1878.9
Maxi. mensuel	93.2	202.9	283.3	270.5	324.8	350.9	477.5	638.3	517.6	550.0	228.0	120.9	638.3
Mini. mensuel	0.0	0.0	25.7	46.7	50.0	42.5	33.0	86.7	130.2	82.1	0.0	0.0	0.0
Maxi. quotidien	70.6	90.3	100.5	107.5	94.5	104.0	132.0	117.5	127.0	147.0	90.5	72.8	147.0
n	81	83	81	81	82	83	82	82	83	82	82	82	84
Macenta (1922-1975)													
Moyenne mensuelle	15.9	60.7	132.3	187.7	226.7	283.8	462.9	540.4	451.4	274.6	170.9	58.4	2865.7
Maxi. mensuel	111.4	290.1	272.8	372.5	473.2	483.8	841.5	998.4	796.5	519.3	369.0	255.3	998.4
Mini. mensuel	0.0	0.0	27.9	68.0	83.9	14.1	140.2	222.0	229.5	95.0	57.0	0.0	0.0
Maxi. quotidien	48.0	175.9	92.2	95.0	99.2	174.9	177.5	140.1	170.1	130.0	94.3	85	177.5
n	44	44	43	44	43	45	44	44	44	44	43	43	45

Tableau 3-2 : températures (°C) dans les stations du sud-est guinéen

	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Ann.
Beyla (1905-2002)													
Moyenne mensuelle	23.9	25.8	26.2	25.7	25.2	24.2	23.5	23.3	23.9	24.2	24.4	23.6	24.5
Maxi. quotidien	38	38	39.9	38.8	36.2	39	35	35.2	34.6	35.3	37	38.1	39.9
Mini. quotidien	8.5	11.5	10.3	13.5	13	13	15	15	15	13.8	12	9	8.5
Kérouané (1997-2003)													
Moyenne mensuelle	23.6	23.6	24.9	24.6	24.1	24	22.3	23	23.9	24.7	24.8	25.2	24.1
Maxi. quotidien	35.7	35	36.2	36	36	36	33	32.4	33	33.7	35.4	36	36.2
Mini. quotidien	8.5	12	13.5	14	11.2	12	12	12	12	13.5	15	10.5	8.5
Kissidougou (1903-2005)													
Moyenne mensuelle	23.1	25.3	27.2	27	25.9	24.8	24.2	24.2	24.5	24.7	24.5	22.8	24.8
Maxi. quotidien	37.6	40	39.6	39	38	36	36	34.5	34.7	34.4	36.1	36	40
Mini. quotidien	4.9	7.3	10.2	15.4	14	15.4	15.5	15.5	15	11	11.3	6	4.9
Nzérékoré (1956-2005)													
Moyenne mensuelle	23.7	25.5	26.1	25.9	25.6	24.7	23.7	23.8	24.4	24.7	24.6	23.7	24.7
Maxi. quotidien	39.2	37.3	37.6	35	33.7	32.5	31	31	31.5	31.8	32.3	32.8	39.2
Mini. quotidien	7.2	8.5	10	15.6	16.7	14.5	14.9	16.8	16.7	16.9	11.4	9.4	7.2
Macenta (1934-2005)													
Moyenne mensuelle	22.8	24.7	25.6	25.6	25.4	24.5	23.7	23.6	24.2	24.4	24.1	23	24.3
Maxi. quotidien	38.4	38.2	39	39.1	38.2	39	36.2	39	41	39.1	40.8	35.4	41
Mini. quotidien	5	5	8.6	12	11	11.2	13.2	15	14	14	10.6	6	5

4 CONTEXTE CLIMATOLOGIQUE LOCAL

L'orientation nord-sud de la crête du Simandou et l'interaction entre la crête et les vents créent une climatologie locale dans la zone du projet. La crête oppose une barrière considérable au courant d'air quand les vents soufflent de l'est ou de l'ouest, et moindre si la direction du vent a de fortes composantes méridionales ou septentrionales. Quand les vents soufflent de l'est ou de l'ouest, on pense que des tourbillons éoliens orientés verticalement, dits « rotors éoliens », se forment sur le côté au vent et en particulier sur le côté sous le vent de la crête (Figure 4-1).

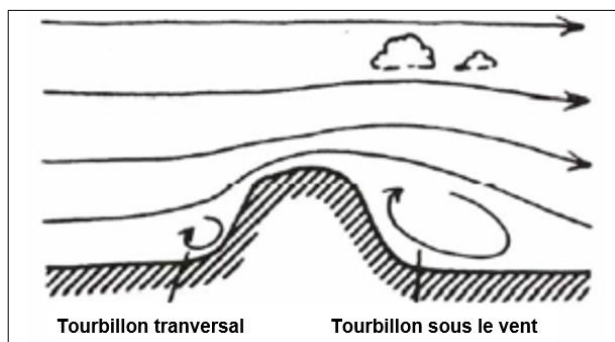


Figure 4-1 : schéma de formation des rotors éoliens de chaque côté d'une crête.
Source : Fullwood (2008) d'après Oke (1987).

En saison sèche, le vent appelé Harmattan domine, avec une forte composante orientale. Malgré le vent sec, le brouillard est fréquent sur le côté ouest de la crête. On pense que l'évapotranspiration provenant de la zone forestière relativement vaste côté ouest crée de l'air humide au-dessus de la forêt. Les rotors qui se forment sur le côté ouest emprisonnent l'air humide au-dessus de la forêt. La dilatation de l'air au sein des rotors réduit la température de l'air au point que du brouillard se forme dans l'air humide. On a pu observer que le brouillard remontait le long des pentes sous le vent occidentales, poussé par les rotors, et se propageait parfois par-dessus le sommet de la crête pour descendre le long des pentes orientales. L'humidité fournie par l'évapotranspiration de la forêt est considérée comme insuffisante pour provoquer des précipitations. Les précipitations de la saison sèche semblent plutôt être associées à des incursions d'air très humide en provenance du sud, les précipitations augmentant avec l'altitude car la convection a lieu de préférence sur les terres hautes.

En saison humide, le courant d'air humide de la mousson provient du sud-ouest. Le courant de la mousson est relativement superficiel et recouvert par des vents d'est plus secs. La crête du Simandou est suffisamment haute pour pénétrer souvent le courant d'air oriental. Les relevés éoliens aux stations météorologiques de crête de Dabatini et Ouléba indiquent que des vents d'est soufflent la plupart des mois, sauf au plus fort de la saison des humide. Les niveaux d'humidité sont élevés partout, et le brouillard des deux côtés de la crête est un phénomène relativement courant. Il n'y a aucune relation entre pluviométrie et altitude. En effet, l'aspect est plus important, avec des précipitations plus élevées tendant à survenir sur le côté occidental au vent de la crête. Le contexte climatologique régional et local est traité plus en détail dans Fullwood (2008).

Les sections suivantes présentent les données météorologiques et climatiques mesurées sur le site du projet. La plupart des graphiques présentés concernent Dabatini, cette station étant la plus haute du site (1650 m).

5 PRESSION ATMOSPHERIQUE

La chaîne du Simandou sur le site du projet variant d'environ 700 mRL (au-dessus du niveau de la mer) à la base de la montagne à 1656 m sur le Pic de Fon, la pression atmosphérique varie également, diminuant de 935 mbar (millibar) à 700 m à 838 mbar à 1650 m. La Figure 5-1 montre que la pression diminue linéairement avec l'altitude, à savoir de 10,2 mbar tous les 100 m d'élévation. Si l'on suppose que l'altitude moyenne de la crête du Pic de Fon est de 1400 m, la pression moyenne sur le sommet de la crête est de 864 mbar. Sur Ouéléba, la pression moyenne est de 870 mbar.

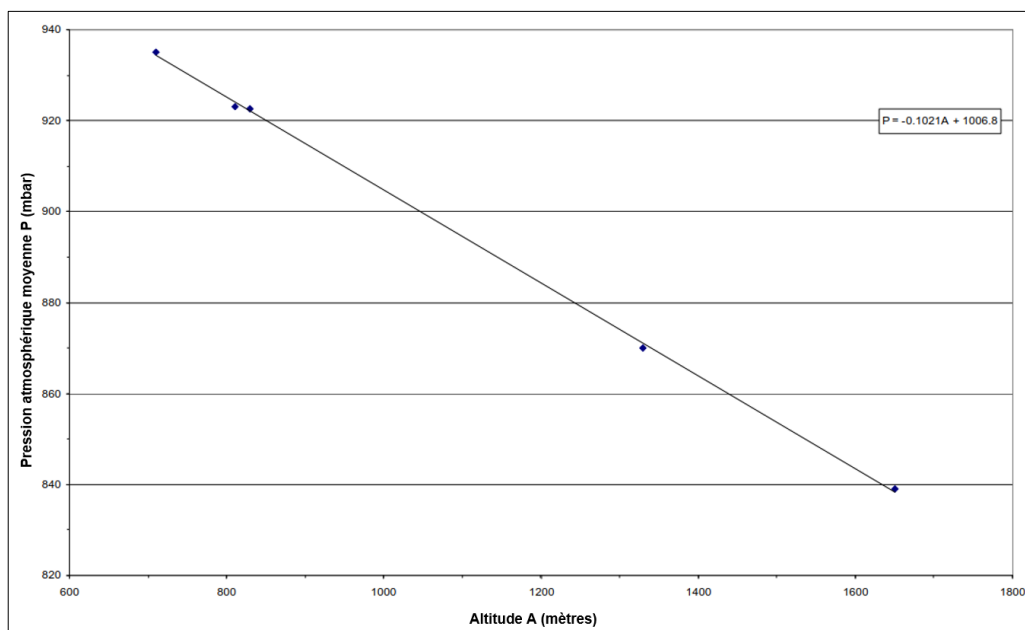


Figure 5-1 : relation entre l'altitude et la pression atmosphérique moyenne sur le site

Comme cela est typique dans les régions tropicales, la variation saisonnière de la pression atmosphérique est faible. La Figure 5-2 montre la variation mensuelle et quotidienne de la pression enregistrée à Dabatini.

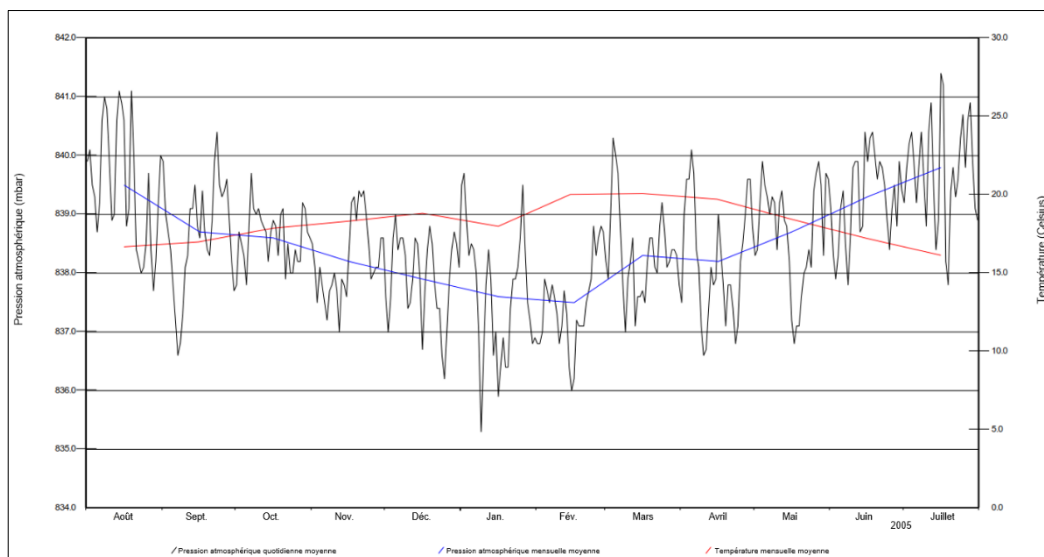


Figure 5-2 : pression atmosphérique et température à Dabatini, août 2004-juillet 2005

En raison d'un dysfonctionnement de la station, la période d'août 2004 à juillet 2005 est la seule période de 12 mois de relevés continus. Il existe une variation saisonnière de la pression moyenne de 2 mbar seulement entre un maximum de près de 840 mbar en juillet-août et un minimum de près de 838 mbar en février. La pression varie de jour en jour tout au long de l'année, mais rarement de plus de 3 mbar. La variation saisonnière de la pression est liée à celle de la température. La Figure 5-2 montre que la période de pression la plus élevée (saison humide) coïncide avec la période de température la plus basse (qui est elle-même liée à la couverture nuageuse et à une humidité élevée), et que la période de pression la plus basse (saison sèche) coïncide avec la période de température la plus haute.

Il existe aussi une oscillation diurne de la pression sur le site, ce qui reflète la marée atmosphérique globale. La Figure 5-3 montre que l'onde de pression diurne à Dabatini a une amplitude d'environ 2 mbar. Les maxima surviennent entre 08:00 et 14:00 heures, et de nouveau entre 22:00 et 24:00 heures. Les minima se produisent vers 04:00 heures et 18:00 heures. On ne connaît pas la cause avec certitude, mais elle est probablement liée au rythme quotidien du réchauffement et du refroidissement.

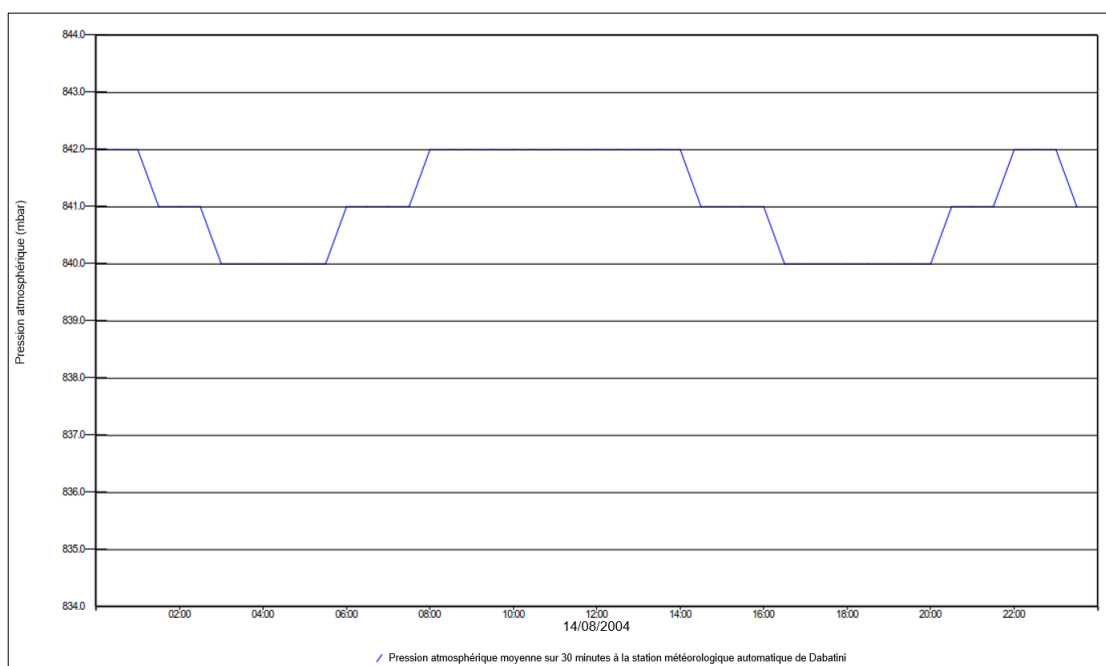


Figure 5-3 : variation diurne de la pression atmosphérique sur le Pic de Fon, 14 août 2004

Le Tableau 5-1 présente les données récapitulatives de la pression atmosphérique enregistrées par les stations météorologiques automatiques.

Tableau 5-1 : données récapitulatives de la pression atmosphérique (mbar)

	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Ann.
Station météo automatique de l'aéroport de Beyla, 652 m (mai 2010 - nov. 2021)													
Moyenne mensuelle	937.8	936.9	937.1	937.2	938.1	939.4	939.6	939.3	938.9	938.1	937.6	938.3	938.2
Maxi. quotidien	945.0	943.0	944.0	942.0	943.0	944.0	944.0	943.0	944.0	943.0	942.0	943.0	945.0
Mini. quotidien	931.0	931.0	932.0	931.0	933.0	934.0	935.0	934.0	931.0	933.0	933.0	933.0	931.0
n	7	7	7	6	6	5	6	6	6	5	5	6	
Station météo automatique de Dabatini, 1650 m (déc. 2001 - déc. 2015)													
Moyenne mensuelle	837.3	837.3	837.2	837.3	837.7	838.7	838.7	838.1	838.1	837.6	837.0	837.3	837.7
Maxi. quotidien	840.2	841.0	842.0	842.0	842.0	844.0	843.0	843.0	842.0	841.0	841.0	841.0	842.0
Mini. quotidien	831.0	833.0	832.0	833.0	832.0	834.0	834.0	834.0	833.0	833.0	830.0	830.0	830.0
n	9	10	11	8	8	9	7	8	8	8	8	11	
Station météo automatique de Fokou ouest, 810 m (juillet 2007 - février 2013)													
Moyenne mensuelle	921.9	921.3	921.1	921.2	922.3	924.0	923.6	923.9	923.9	922.6	922.0	921.9	922.5
Maxi. quotidien	927.0	926.0	925.0	927.0	927.0	928.0	928.0	928.0	928.0	927.0	926.0	927.0	928.0
Mini. quotidien	916.0	912.0	915.0	917.0	918.0	920.0	920.0	919.0	919.0	918.0	917.0	916.0	915.0
n	4	4	3	2	2	3	3	4	4	4	5	4	
Station météo automatique de Mafindou, 830 m (février 2004 - avril 2012)													
Moyenne mensuelle	920.4	920.0	920.1	920.0	921.1	922.5	922.7	922.2	922.3	921.1	920.6	920.4	921.1
Maxi. quotidien	928.0	926.0	927.0	927.0	929.0	930.0	929.0	930.0	930.0	927.0	926.0	926.0	930.0
Mini. quotidien	914.0	914.0	914.0	914.0	916.0	917.0	917.0	917.0	917.0	918.0	916.0	914.0	914.0
n	7	7	6	7	7	7	6	7	6	5	5	6	
Station météo automatique de Mandou, 710 m (février 2004 - mars 2012)													
Moyenne mensuelle	934.1	933.7	933.8	933.8	934.8	936.2	936.4	936.0	935.6	934.7	934.2	934.1	934.8
Maxi. quotidien	939.0	939.0	939.0	939.0	940.0	941.0	941.0	940.0	940.0	940.0	939.0	939.0	941.0
Mini. quotidien	927.0	927.0	927.0	928.0	930.0	931.0	932.0	931.0	931.0	929.0	929.0	928.0	927.0
n	7	8	8	6	7	6	5	5	6	6	6	6	
Station météo automatique d'Ouéléba, 1330 m (août 2007 - mai 2013)													
Moyenne mensuelle	870.0	869.6	869.7	869.8	870.6	871.5	871.5	870.7	871.4	870.3	870.1	869.8	870.4
Maxi. quotidien	874.0	874.0	874.0	874.0	874.0	875.0	875.0	874.0	875.0	876.0	875.0	875.0	876.0
Mini. quotidien	865.0	865.0	865.0	865.0	866.0	868.0	868.0	866.0	867.0	866.0	866.0	865.0	865.0
n	6	6	5	6	5	3	1	3	4	5	5	5	

n = nombre de mois de relevés.

6 RAYONNEMENT SOLAIRE

La Figure 6-1 montre la variation mensuelle et quotidienne du rayonnement solaire (onde courte) enregistrée à la station météorologique de Dabatini au cours de la période de 12 mois à compter d'août 2004. Le rayonnement mensuel moyen varie de 14-15 MJ/m²/jour en saison humide à 19-20 MJ/m²/jour en saison sèche. Il existe des variations considérables du rayonnement d'un jour à l'autre tout au long de l'année en fonction de la nébulosité, en particulier au début et à la fin de la saison humide.

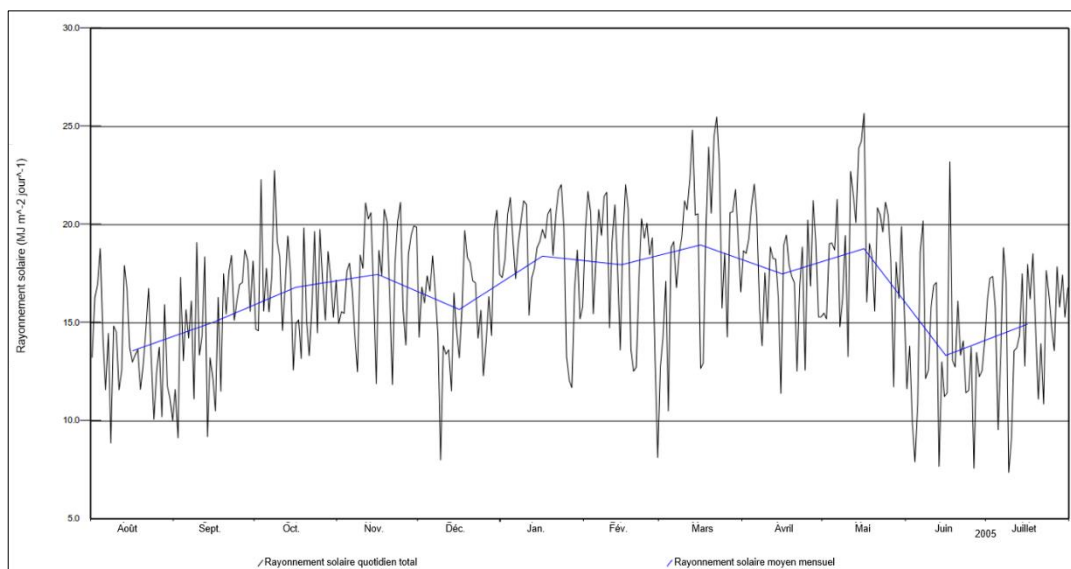


Figure 6-1 : rayonnement solaire à Dabatini, août 2004-juillet 2005

Le rayonnement solaire varie également considérablement au cours d'une journée sur le site du projet. La Figure 6-2 montre le rayonnement reçu un jour type de la saison humide (22 juillet 2007) et de la saison sèche (15 janvier 2008). Pendant la saison humide, la couverture nuageuse et le brouillard réduisent considérablement les niveaux de rayonnement solaire par rapport à ceux d'un jour dégagé.

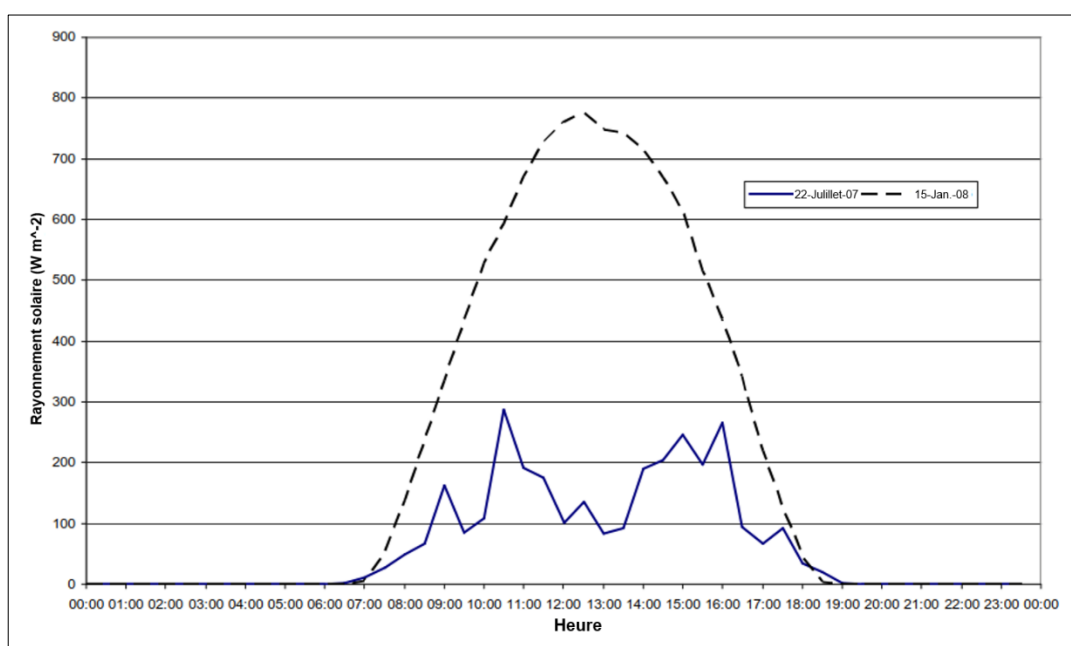


Figure 6-2 : variation diurne du rayonnement solaire lors de journées dégagée et nuageuse à Dabatini

La Figure 6-3 montre le rayonnement mensuel moyen reçu par toutes les stations météorologiques automatiques entre août 2007 et décembre 2009. Les données présentent des lacunes importantes, principalement en raison de dysfonctionnements des capteurs. Le rayonnement solaire est relativement faible à toutes les stations pendant la saison humide, de juin à septembre chaque année. Le rayonnement solaire augmente pendant les saisons sèches, de novembre à mars. Les creux du rayonnement solaire en décembre et janvier peuvent être dues à la faible transparence de l'atmosphère à cette période de l'année où l'Harmattan souffle du nord-est, en transportant une poussière saharienne qui provoque une mauvaise visibilité.

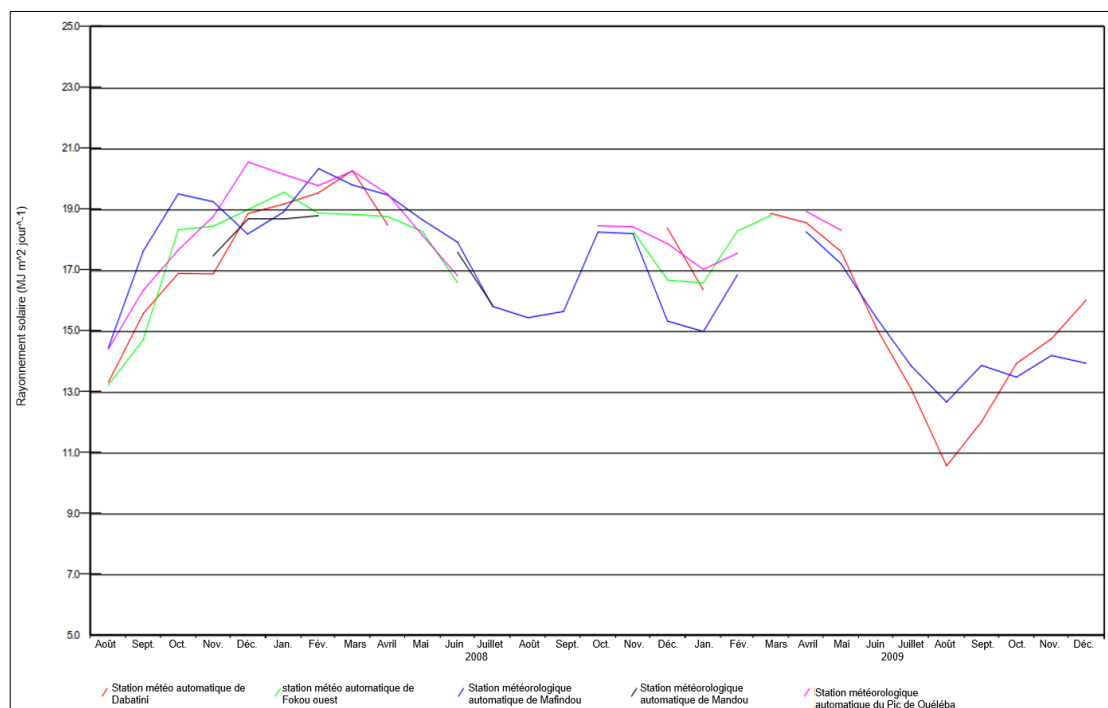


Figure 6-3 : rayonnement solaire moyen mensuel, août 2007-décembre 2009

Le Tableau 6-1 présente les données récapitulatives du rayonnement solaire enregistrées par les stations météorologiques automatiques.

Le rayonnement ultraviolet (UV-A, UV-B et UV-C) est surveillé par la SMA de Mafindou depuis mars 2008. Le Tableau 6-2 présente les données récapitulatives du rayonnement UV à Mafindou. Notons que les unités de rayonnement UV-C sont les $\text{kJ/m}^2/\text{jour}$, alors que les unités de rayonnement UV-A et UV-B sont les $\text{MJ/m}^2/\text{jour}$.

Tableau 6-1 : données récapitulatives du rayonnement solaire (MJ/m²/jour)

	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Ann.
Station météo automatique de Dabatini (décembre 2001 - juin 2012)													
Moyenne mensuelle	16.97	17.88	18.25	17.40	18.41	15.62	13.68	11.81	12.99	14.48	15.03	16.89	15.78
Maxi. quotidien	22.75	25.52	28.45	39.95	46.46	30.52	25.55	24.72	23.72	27.92	24.12	22.95	46.46
Mini. quotidien	6.24	6.37	7.76	4.50	7.02	3.17	5.78	4.41	3.78	4.22	4.48	6.27	3.17
n	8	8	9	7	6	6	3	5	5	5	5	8	
Station météo automatique de Fokou ouest (juillet 2007 - février 2012)													
Moyenne mensuelle	12.61	13.06	13.27	12.06	12.04	11.59	5.88	9.05	10.66	11.31	12.94	12.93	11.45
Maxi. quotidien	20.36	22.85	24.72	25.36	26.12	25.11	9.21	28.32	34.09	32.20	26.54	20.87	34.09
Mini. quotidien	4.25	3.47	2.75	1.05	4.07	4.31	1.69	2.27	3.45	4.29	3.21	6.00	1.05
n	5	5	5	3	3	3	1	3	3	3	4	4	
Station météo automatique de Mafindou (août 2007 - avril 2012)													
Moyenne mensuelle	14.89	17.45	17.12	17.75	17.80	18.59	18.14	16.99	17.54	16.69	16.12	14.69	16.98
Maxi. quotidien	25.61	30.73	40.58	40.65	39.34	42.91	41.56	41.89	41.24	35.53	27.24	21.16	42.91
Mini. quotidien	5.16	7.66	5.57	5.66	6.71	3.60	5.59	5.78	5.72	4.98	5.57	6.31	3.60
n	5	5	4	5	4	4	4	5	5	5	5	5	
Station météo automatique de Mandou (septembre 2007 - juin 2012)													
Moyenne mensuelle	16.09	16.66	17.13	17.06	16.84	15.16	14.50	13.92	15.64	14.08	14.58	15.73	15.62
Maxi. quotidien	20.22	23.27	23.75	24.22	24.34	24.30	24.08	22.40	28.71	23.67	23.55	20.67	28.71
Mini. quotidien	3.86	5.78	4.34	5.04	5.82	5.12	4.22	3.30	2.73	4.02	4.18	4.21	2.73
n	3	4	3	3	3	4	3	2	3	2	3	3	
Station météo automatique d'Ouéléba (août 2007 - janvier 2012)													
Moyenne mensuelle	17.88	18.99	19.13	18.70	17.52	15.15	11.83	11.81	14.10	16.02	16.23	17.35	16.23
Maxi. quotidien	21.90	24.01	26.89	27.14	25.20	24.50	26.50	26.41	28.37	24.51	24.20	22.27	28.37
Mini. quotidien	7.10	6.39	8.78	6.52	6.91	7.31	2.78	5.25	5.81	3.08	6.11	7.75	2.78
n	5	4	3	4	4	3	2	3	2	4	4	4	

n = nombre de mois de relevés.

Tableau 6-2 : données récapitulatives du rayonnement ultraviolet à la SMA de Mafindou

	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Ann.
UV-A (MJ/m²/jour) (mars 2008 - avril 2012)													
Moyenne mensuelle	0.49	0.64	0.75	0.68	0.58	0.51	0.48	0.55	0.64	0.73	0.69	0.51	0.60
Maxi. quotidien	0.78	0.95	1.14	1.05	0.86	0.67	0.70	0.85	1.02	1.09	1.05	0.81	1.14
Mini. quotidien	0.12	0.17	0.27	0.19	0.27	0.29	0.22	0.21	0.25	0.32	0.31	0.20	0.12
n	4	4	4	5	4	4	4	4	4	4	4	4	
UV-B (MJ/m²/jour) (mars 2008 - juin 2011)													
Moyenne mensuelle	0.06	0.08	0.09	0.09	0.09	0.08	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08	0.06	0.08
Maxi. quotidien	0.09	0.11	0.14	0.13	0.12	0.11	0.10	0.12	0.13	0.12	0.12	0.10	0.14
Mini. quotidien	0.02	0.04	0.03	0.03	0.03	0.01	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.01
n	3	3	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	
UV-C (kJ/m²/jour) (mars 2008 - avril 2012)													
Moyenne mensuelle	0.513	0.790	1.353	1.594	1.381	0.972	0.877	1.008	0.962	0.898	0.805	0.454	0.967
Maxi. quotidien	0.994	1.772	2.947	3.466	3.049	2.419	1.911	2.369	2.447	1.633	1.557	0.913	3.466
Mini. quotidien	0.073	0.110	0.086	0.227	0.102	0.229	0.152	0.038	0.218	0.259	0.252	0.079	0.038
n	3	2	3	3	4	3	3	4	3	3	4	4	

n = nombre de mois de relevés

7 TEMPERATURE

La Figure 7-1 montre la variation saisonnière des températures moyennes, maximums et minimums sur Dabatini pour la période de 12 mois à compter d'août 2004.

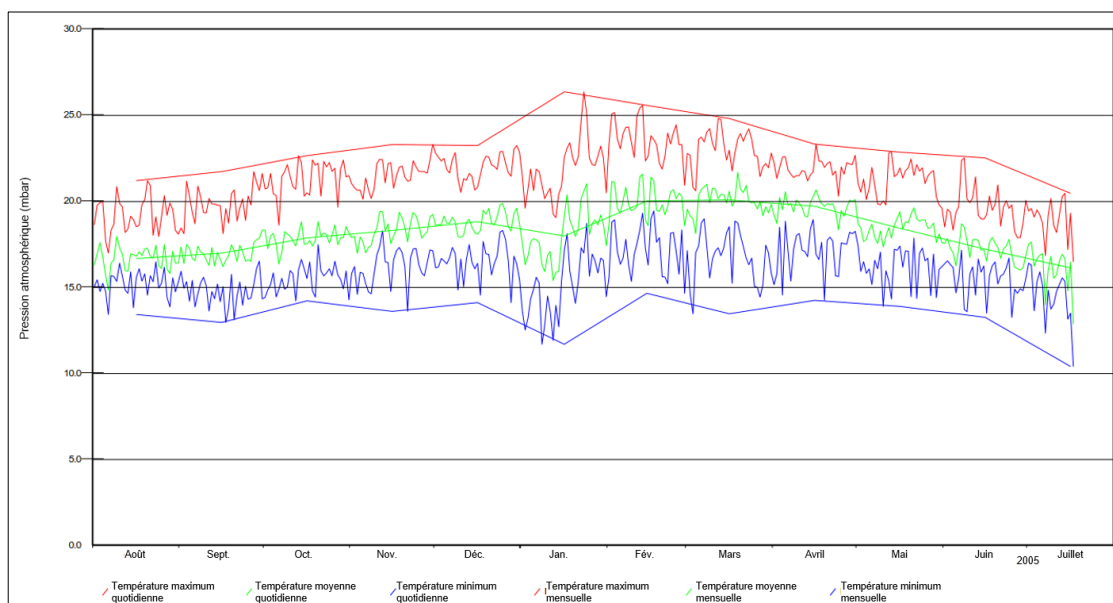


Figure 7-1 : température de l'air à Dabatini, août 2004-juillet 2005

Bien que la Figure 5-2 porte sur une année donnée, les tendances présentées sont représentatives des autres années. La température de l'air varie selon les saisons et d'un jour à l'autre selon la nébulosité, la vitesse du vent et l'humidité. Sur Dabatini, il n'y a qu'un écart de 4°C de la température mensuelle moyenne entre la température moyenne de la saison humide (juillet-août), environ 16°C, et la température de la saison sèche (février-mars), environ 20°C. Les températures de juillet-août sont limitées par un ciel nuageux qui limite le réchauffement, et plus élevées en saison sèche lorsque les niveaux de rayonnement solaire sont élevés. La plage quotidienne entre températures maximums et minimums est la plus étroite pendant la saison humide nuageuse, et la plus large pendant la saison sèche, lorsque le ciel nocturne est dégagé, ce qui entraîne des températures nocturnes plus basses en raison d'une plus grande déperdition thermique de l'atmosphère.

La température diurne varie, principalement en réponse à la nébulosité, l'humidité et la vitesse du vent. La Figure 7-2 montre les variations diurnes de la température à Dabatini un jour type de la saison humide (22 juillet 2007) et de la saison sèche (15 janvier 2008). La variation diurne du rayonnement solaire de ces mêmes jours est illustrée à la Figure 6-2. Le 22 juillet a été un jour très nuageux, et les températures sont demeurées pratiquement constantes, à environ 15-16°C. En revanche, le 15 janvier 2008 a été dégagé, et les températures ont culminé à environ 24°C vers 15 heures. La température minimum (17,5°C) est survenue à 07:00 heures juste avant le lever du soleil, d'où une plage journalière de 6,5°C.

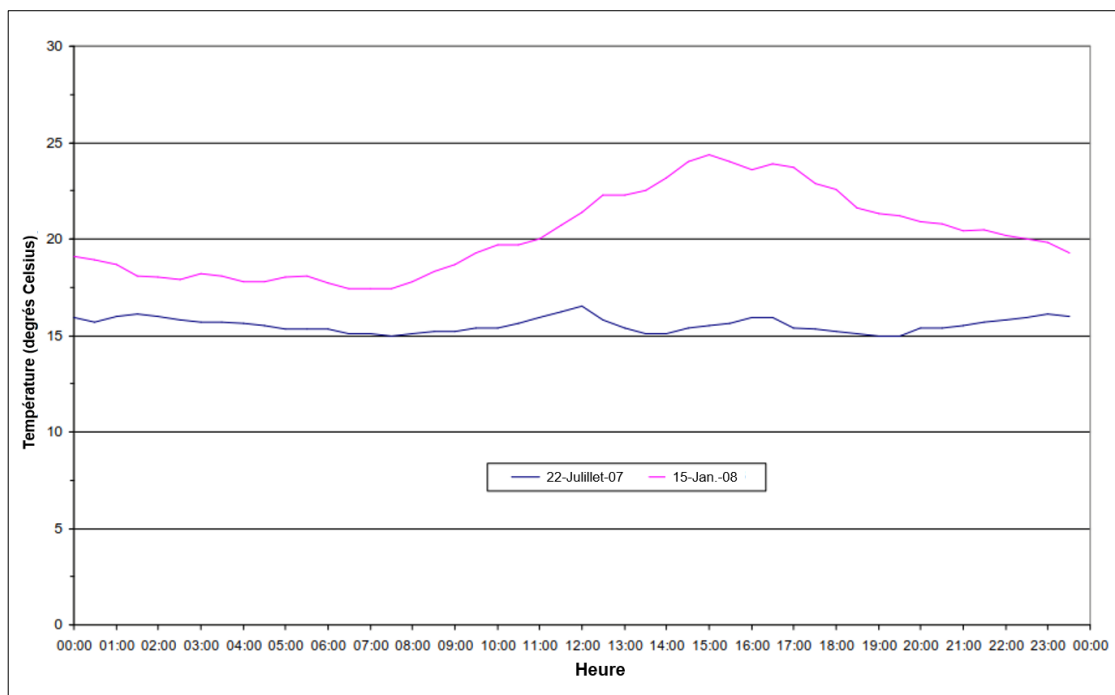


Figure 7-2 : variation diurne de la température lors de journées dégagée et nuageuse à Dabatini

Il existe une relation inverse entre température et altitude. La Figure 7-3 montre que les températures moyenne, maximum et minimum diminuent avec l'altitude sur le Pic de Fon. On s'attend à ce qu'il existe des relations semblables pour Ouéléba.

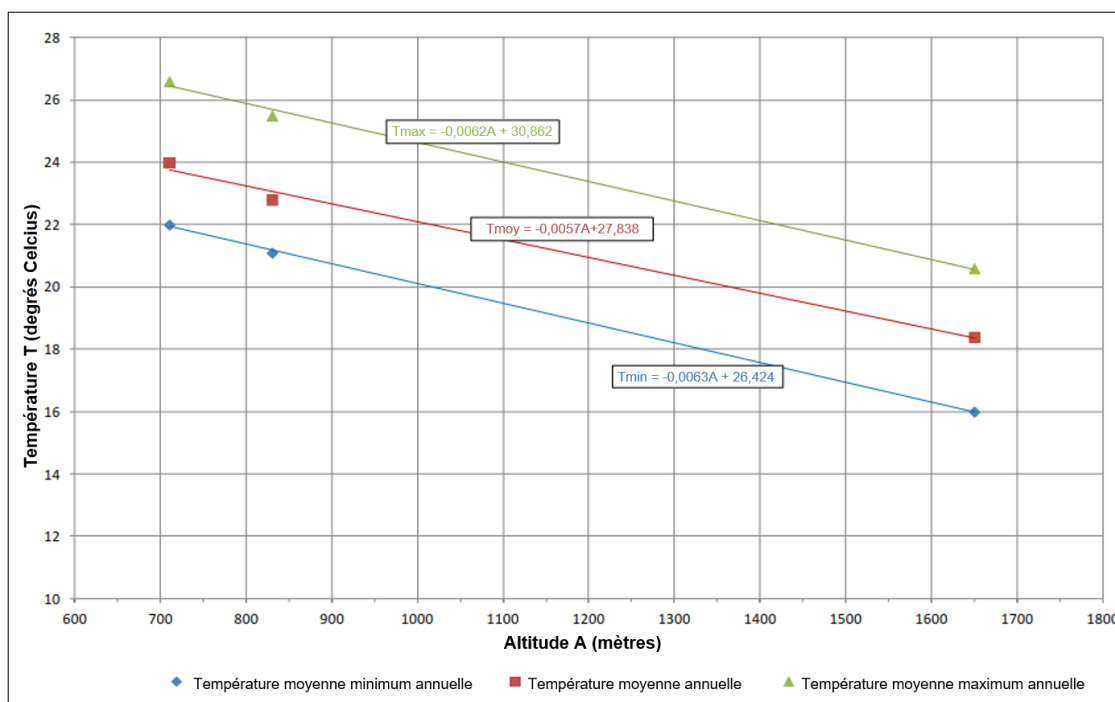


Figure 7-3 : relation entre température et altitude sur le Pic de Fon

Le Tableau 7-1 présente les données récapitulatives de la température enregistrées par les stations météorologiques automatiques.

Tableau 7-1 : données récapitulatives de la température (°C)

	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Ann.
Station météo automatique de l'aéroport de Beyla, 652 m (mai 2010 - nov. 2021)													
Moyenne mensuelle	24.3	25.8	26.5	25.6	25.4	24.0	23.4	23.0	23.6	24.8	25.1	23.4	24.6
Maxi. quotidien	36.0	38.1	37.5	35.8	35.6	34.0	31.8	30.3	32.5	34.3	34.3	34.3	38.1
Mini. quotidien	7.6	10.6	11.0	15.5	17.3	10.5	15.0	12.3	14.5	11.3	11.0	7.8	7.6
n	10	9	9	8	9	9	9	8	9	9	9	9	
Station météo automatique de Dabatini (décembre 2001 - novembre 2020)													
Moyenne mensuelle	19.3	20.9	20.8	20.4	19.5	18.1	17.1	16.9	17.6	18.2	19.1	19.0	18.9
Maxi. quotidien	27.9	29.2	29.4	26.7	25.7	25.1	23.8	23.2	24.7	25.5	26.9	27.8	29.4
Mini. quotidien	10.5	11.8	11.1	13.1	12.6	13.1	10.4	12.2	13.0	12.4	13.1	10.4	10.4
n	10	13	14	11	10	10	10	9	10	9	9	10	
Station météo automatique de Fokou ouest (juillet 2007 - février 2013)													
Moyenne mensuelle	24.8	25.4	24.7	24.2	23.6	22.7	21.9	21.6	22.2	22.8	23.4	24.1	23.4
Maxi. quotidien	36.8	37.0	35.5	34.6	33.1	32.3	30.0	30.1	32.9	32.9	37.6	34.3	37.6
Mini. quotidien	13.6	14.2	17.3	18.2	17.2	17.5	17.3	17.1	17.4	17.2	16.6	15.1	13.6
n	6	6	3	4	4	4	4	6	6	6	6	6	
Station météo automatique de Mafindou (Janvier 2002 - Juillet 2012)													
Moyenne mensuelle	22.9	24.8	24.7	24.0	23.6	22.4	21.7	21.7	21.8	22.2	22.7	22.6	22.9
Maxi. quotidien	34.7	36.1	35.2	34.7	33.1	32.0	30.5	31.1	30.8	32.0	32.8	34.7	36.1
Mini. quotidien	11.2	14.8	12.8	16.8	16.7	16.7	15.9	15.2	16.3	13.9	13.1	11.7	11.2
n	10	10	9	9	9	9	10	10	9	9	7	8	
Station météo automatique de Mandou (décembre 2001 - juin 2012)													
Moyenne mensuelle	25.1	26.0	25.4	24.6	24.2	23.4	22.6	22.5	22.7	23.1	23.8	24.6	24.0
Maxi. quotidien	36.1	37.9	36.5	35.3	33.2	32.5	30.7	31.3	32.7	32.8	34.9	34.5	37.9
Mini. quotidien	12.4	17.0	17.1	16.8	17.1	17.4	16.1	17.3	17.8	17.6	15.3	14.6	12.4
n	11	11	10	11	11	11	9	9	10	9	9	9	
Station météo automatique d'Ouéléba (août 2007 - mai 2013)													
Moyenne mensuelle	22.1	23.1	22.4	22.2	21.8	20.7	19.7	19.0	19.5	20.5	21.8	21.9	21.2
Maxi. quotidien	32.3	34.2	31.1	31.0	30.1	29.3	27.9	26.6	27.7	29.0	31.4	32.2	34.2
Mini. quotidien	11.8	11.9	14.4	15.6	14.6	15.5	15.4	15.2	14.3	14.3	14.0	12.6	11.8
n	6	6	4	4	4	3	1	3	5	6	6	4	

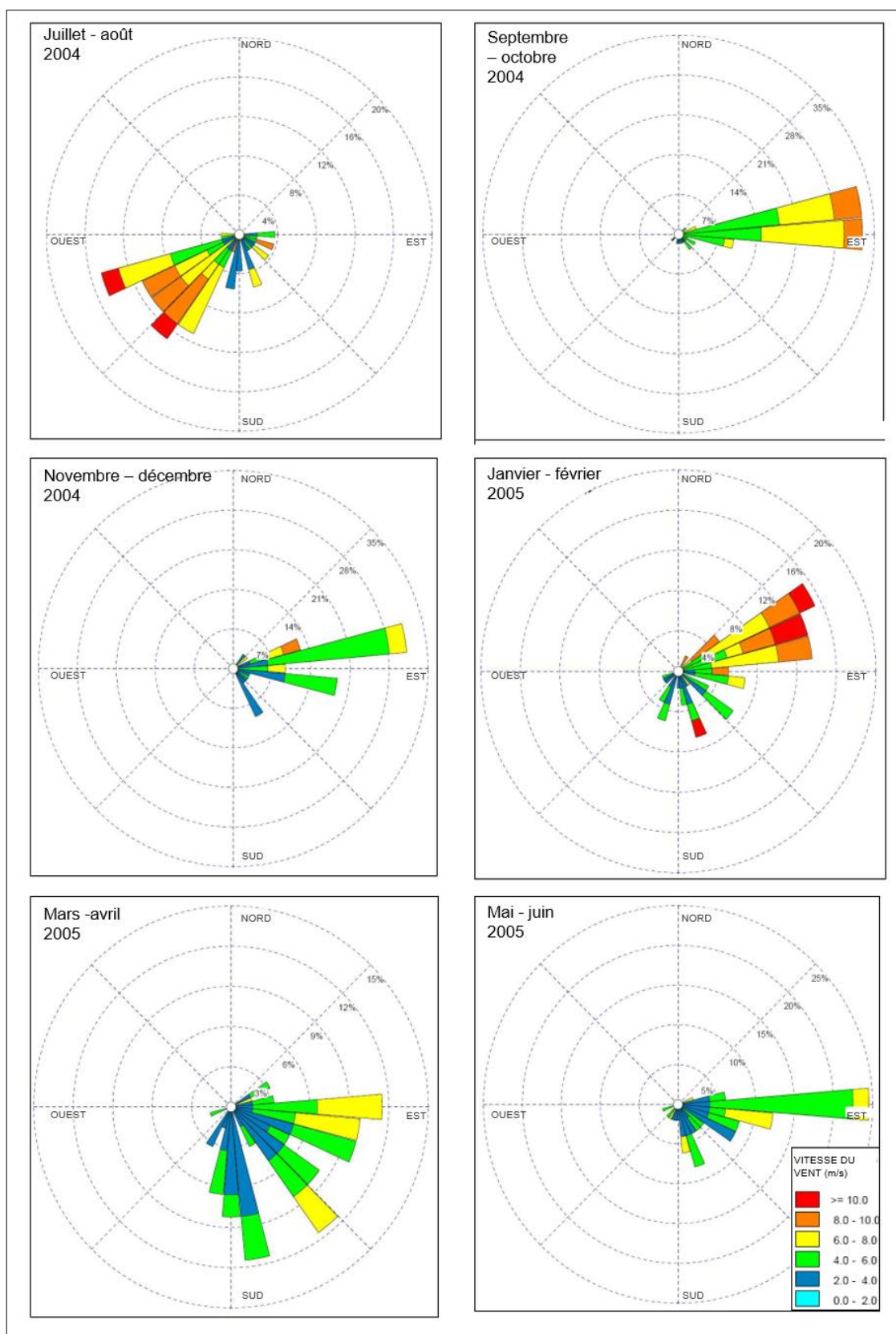
n = nombre de mois de relevés

8 DIRECTION ET VITESSE DU VENT

La direction et la vitesse du vent varient considérablement au cours de l'année selon le site et l'altitude. Les Figure 8-1 à Figure 8-4 montrent les roses des vents de Dabatini, Ouéléba, Mafindou et Mandou, respectivement. Les vitesses du vent sont plus élevées sur les crêtes plus exposées d'Ouéléba et du Pic de Fon qu'à la base des montagnes. En juillet et août, Dabatini subit des vents de mousson du sud-ouest. La vitesse du vent dépasse 10 m/s. La Figure 8-2 indique que sur Ouéléba en juillet et août 2007, la direction du vent provenait de l'ouest. En septembre et octobre (2004) s'est produit à Dabatini un brusque changement de direction du vent, en courant d'est, qui s'est maintenu jusqu'en décembre 2004. Pendant ces mois, la profondeur de la couche éolienne de mousson diminue probablement, et devient insuffisante pour atteindre l'altitude de Dabatini. À ces périodes, Dabatini subit des vents d'est qui se superposent aux vents de surface et soufflent, avec une certaine variation, toute l'année. Le même changement de direction du vent a été observé à Ouéléba en septembre-octobre 2007, bien que les vents aient été plus légers et initialement du sud-est. En janvier-février 2004, le vent à Dabatini souffle du nord-est et forci. Il s'agit de l'Harmattan, qui souffle du Sahara. En janvier-février 2007, à Ouéléba, le vent a continué à souffler de l'est. À Dabatini de mars à juin 2004, l'Harmattan a fléchi, et le vent d'est s'est rétabli.

Le régime ci-dessus est quelque peu modifié aux stations de plaine (Mafindou à l'est et Mandou à l'ouest) par l'orographie orientée nord-sud, qui tend à améliorer les composantes éoliennes du nord et du sud (Figure 8-3 et Figure 8-4). À Mafindou, l'Harmattan souffle du nord-est en janvier-février. La direction du vent à Mandou est plus variable, ce qui indique peut-être la présence de rotors éoliens sous le vent de la chaîne du Simandou.

Les vitesses quotidiennes moyennes du vent sont beaucoup plus faibles à Mafindou et Mandou qu'à Dabatini, dépassant seulement 2 m/s en début de saison humide (avril-mai), au plus fort de la saison humide (juillet-août) et au plus fort de la saison sèche (janvier).



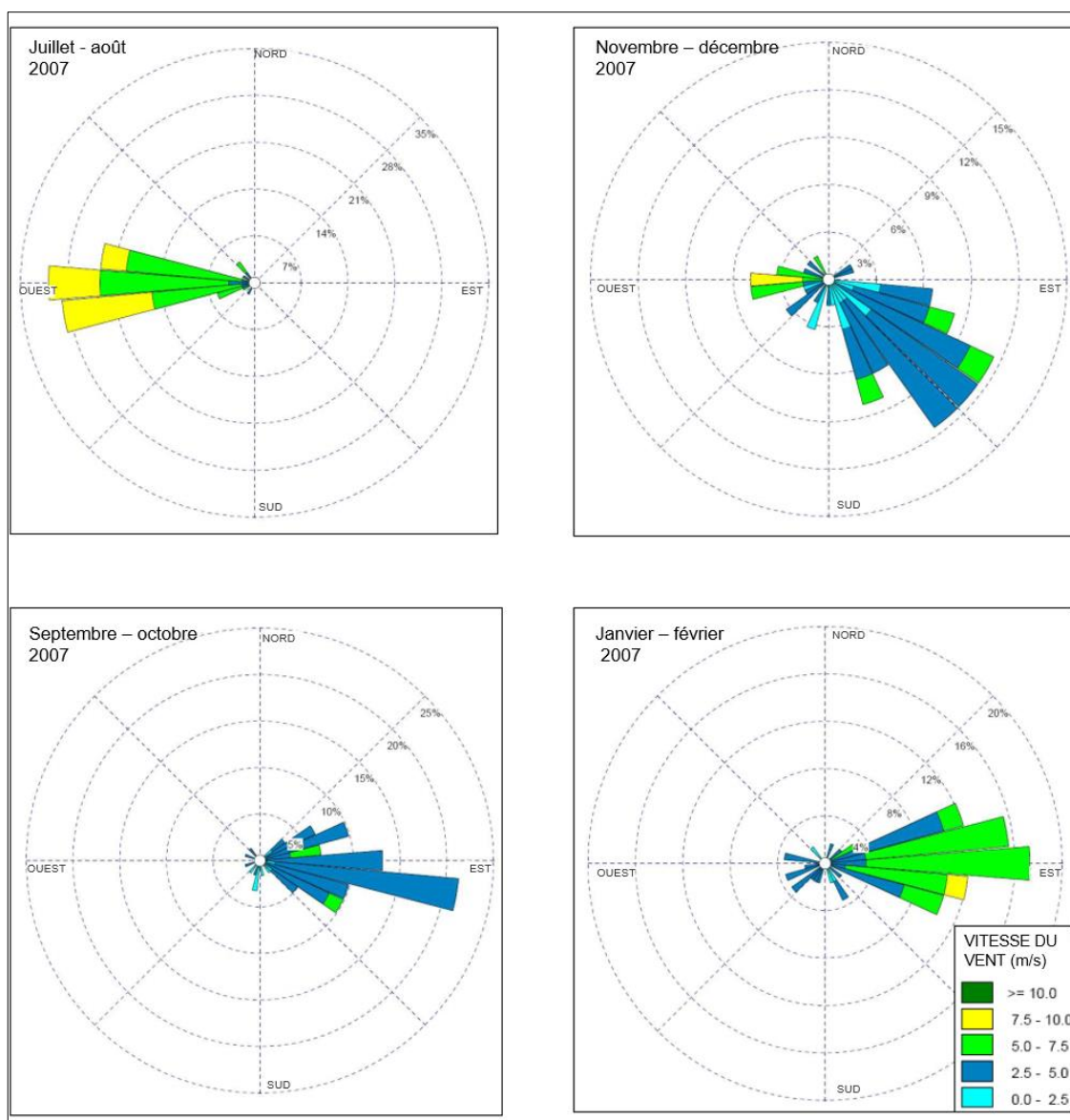


Figure 8-2 : direction et vitesse du vent au Pic de Ouéléba, juillet 2007 - février 2008

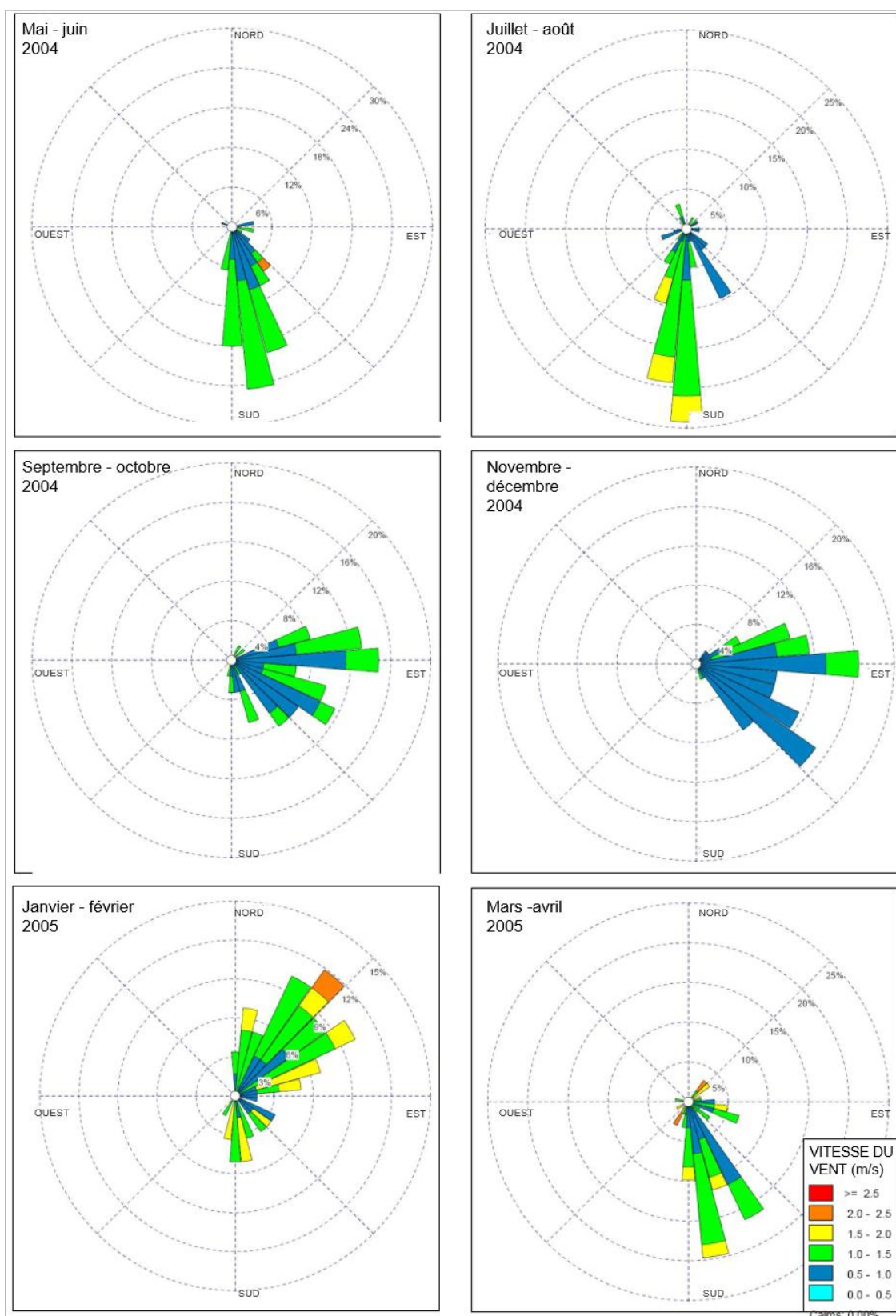


Figure 8-3 : direction et vitesse du vent à Mafindou, mai 2004 - avril 2005

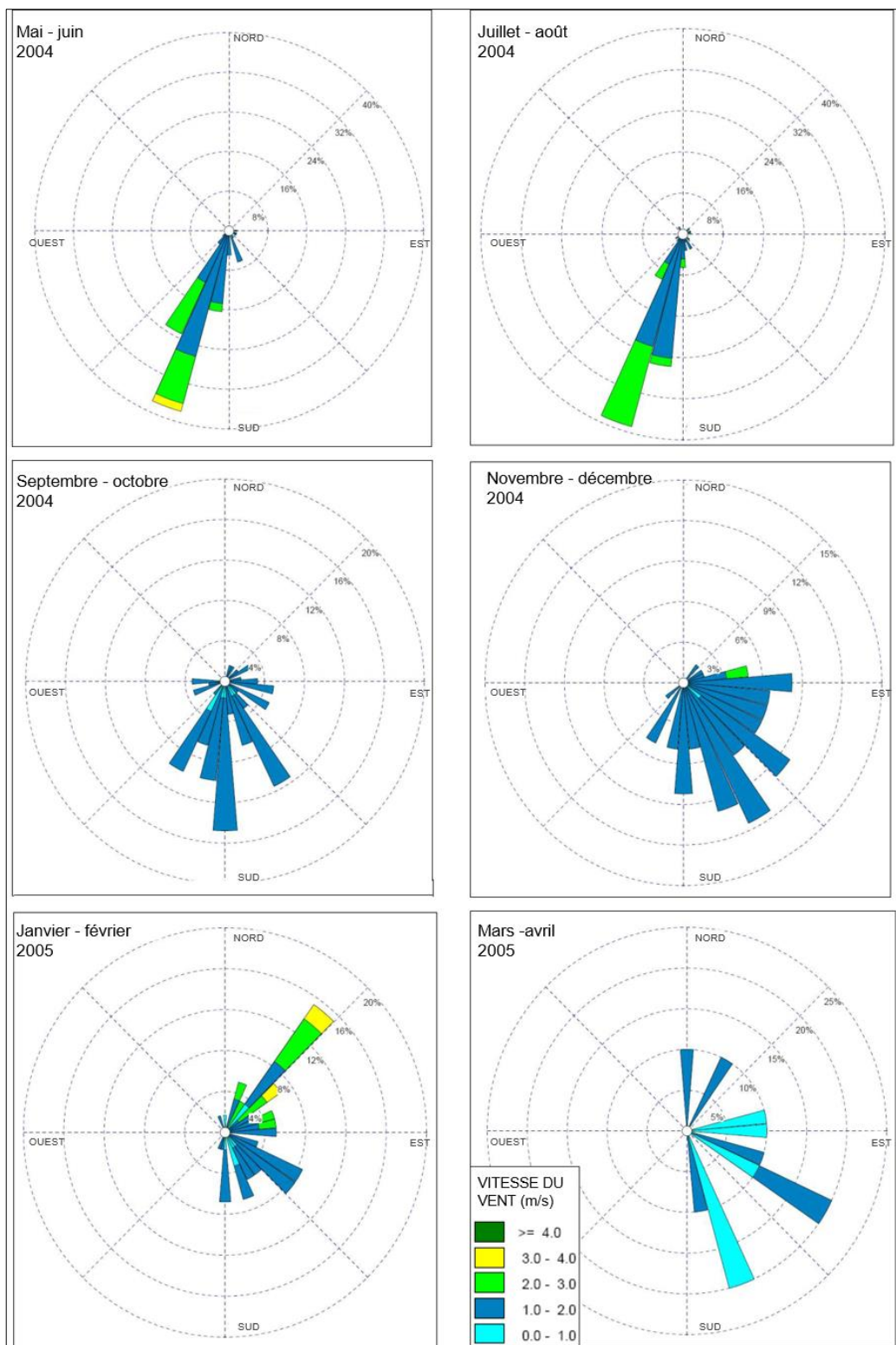


Figure 8-4 : direction et vitesse du vent à Mandou, mai 2004 - avril 2005

Le Tableau 8-1 présente les données récapitulatives sur la vitesse du vent enregistrées par les stations météorologiques automatiques. Il convient de noter que la station météorologique de Dabatini (à l'époque un trépied haut de 9 m) a été soufflée lors d'une tempête le 19 août 2005. Bien que non enregistrée, cette vitesse du vent a probablement dépassé le maximum de 40 m/s enregistré jusqu'à présent.

Tableau 8-1: données récapitulatives sur la vitesse du vent (m/s)

	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Ann.
Station météo automatique de l'aéroport de Beyla (mai 2010 - novembre 2021)													
Moyenne mensuelle	1.55	1.65	1.68	1.56	1.54	1.55	1.67	1.77	1.51	1.36	1.26	1.40	1.54
Maxi. quotidien	13.81	16.79	24.59	19.52	19.42	20.55	19.64	18.30	18.60	18.41	19.36	9.47	24.59
Mini. quotidien	0.83	0.95	0.97	0.94	0.99	0.90	0.99	0.85	0.83	0.69	0.66	0.76	0.66
n	10	9	9	8	8	6	7	7	9	9	9	9	
Station météo automatique de Dabatini (décembre 2001 - juin 2012)													
Moyenne mensuelle	6.46	5.39	4.80	4.62	4.85	4.56	5.41	5.57	5.13	5.56	5.37	5.95	5.31
Maxi. quotidien	25.40	28.30	32.15	34.43	32.04	40.14	29.89	26.29	29.90	28.76	23.05	22.64	40.14
Mini. quotidien	2.19	2.26	2.17	2.44	2.63	2.06	1.80	1.99	2.38	2.85	2.50	2.10	1.80
n	8	8	9	6	6	6	6	6	5	5	4	7	
Station météo automatique de Fokou ouest (juillet 2007 - février 2012)													
Moyenne mensuelle	1.67	1.39	1.16	1.11	1.06	0.95	0.94	0.91	0.94	1.04	1.14	1.34	1.14
Maxi. quotidien	15.81	17.07	20.94	18.80	19.79	20.14	15.89	48.70	18.94	18.25	13.19	15.22	48.7
Mini. quotidien	0.85	0.92	0.82	0.76	0.75	0.72	0.68	0.67	0.64	0.71	0.76	0.91	0.64
n	5	5	4	4	4	3	4	5	5	5	5	4	
Station météo automatique de Mafindou (février 2004 - avril 2012)													
Moyenne mensuelle	1.21	1.25	1.21	1.16	1.11	1.10	1.17	1.14	1.02	1.01	0.99	1.07	1.12
Maxi. quotidien	12.05	16.95	18.82	18.91	15.09	15.30	13.13	13.62	15.19	18.72	16.17	10.78	18.91
Mini. quotidien	0.71	0.61	0.76	0.73	0.73	0.58	0.58	0.59	0.52	0.69	0.54	0.63	0.52
n	7	8	7	8	8	7	9	8	7	7	7	6	
Station météo automatique de Mandou (février 2004 - mai 2011)													
Moyenne mensuelle	1.91	1.71	1.62	1.60	1.60	1.63	1.76	1.64	1.36	1.21	1.27	1.50	1.57
Maxi. quotidien	14.21	22.93	19.09	20.68	24.91	22.47	18.72	11.76	22.15	19.70	16.46	14.70	24.91
Mini. quotidien	1.06	0.65	0.77	0.92	0.96	0.89	0.76	1.00	0.77	0.70	0.84	0.98	0.65
n	7	8	7	7	7	6	4	4	6	6	5	5	
Station météo automatique d'Ouéléba (août 2007 - janvier 2012)													
Moyenne mensuelle	4.14	3.87	3.53	3.48	3.24	3.43	4.60	5.51	3.79	2.68	2.58	3,13	3.66
Maxi. quotidien	22.6	27.5	35.1	27.0	25.2	24.64	23.7	21.5	24.5	28.3	20.0	16.1	35.1
Mini. quotidien	1.78	1.87	1.86	1.76	1.62	1.66	1.97	1.72	1.63	1.60	1.33	1.34	1.33
n	5	4	3	4	4	4	4	5	5	5	5	4	

n = nombre de mois de relevés.

La vitesse quotidienne maximum du vent est un maximum instantané.

9 HUMIDITE

La teneur en vapeur d'eau de l'air sur le site du projet, mesurée par l'humidité relative, est fortement liée à la provenance du vent. Les vents de nord-est et d'est apportent un air plus sec. Les vents du sud et du sud-ouest apportent un air plus humide. Il existe une forte variation saisonnière de l'humidité (et des précipitations) qui est étroitement liée à la variation saisonnière de la direction du vent (voir ci-dessus).

La Figure 9-1 montre la variabilité saisonnière et d'un jour à l'autre de l'humidité relative de juin 2004 à mai 2005 à Dabatini. Pendant la saison humide, l'air est presque saturé la plupart du temps, avec une variabilité limitée d'un jour à l'autre. L'humidité devient plus variable avec l'arrivée de la saison sèche et la variabilité de la direction et de la provenance du vent (voir ci-dessus). L'humidité relative quotidienne moyenne au plus fort de la saison sèche descend à 20-30 %, mais peut atteindre des maxima de 80-95 % lors d'incursions d'air humide en provenance du sud.

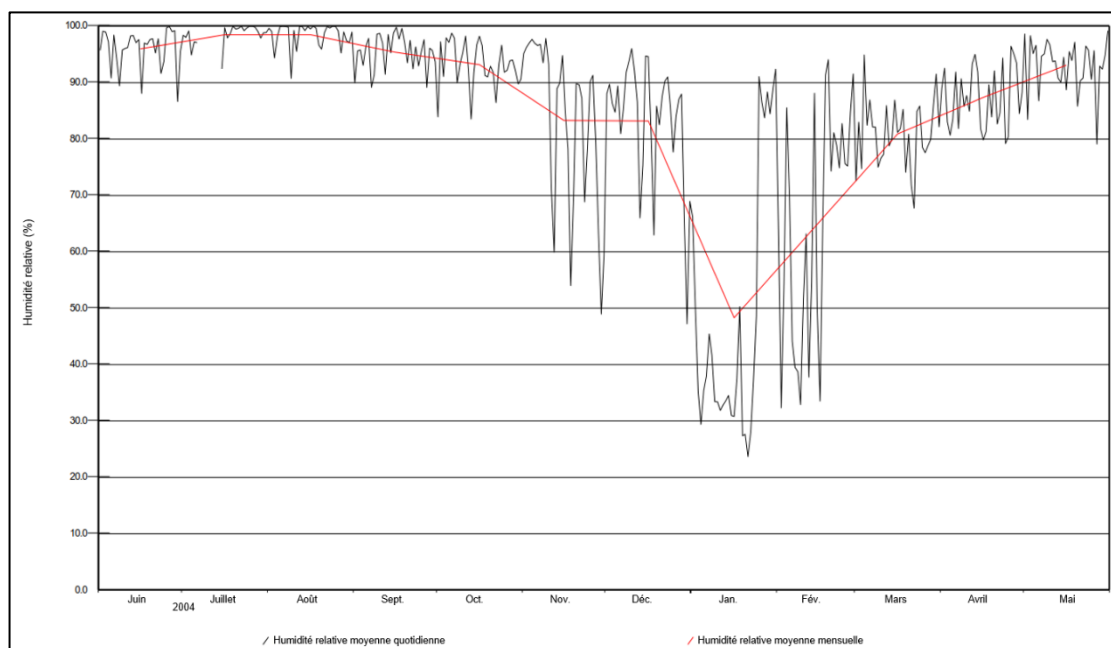


Figure 9-1 : humidité relative à Dabatini, juin 2004 - mai 2005

L'humidité relative diurne varie en réponse aux variations de température diurnes. La Figure 9-2 montre la variation diurne de l'humidité relative pour des jours types de la saison humide et sèche. Le 22 juillet 2007, l'air est resté proche de la saturation tout au long de la période de 24 heures. En revanche, le 15 janvier 2008, l'humidité relative a varié de 50 à 60 % la nuit et le matin, quand les températures auraient été relativement basses, pour tomber après 11 heures à environ 30 à 35 % tandis que les températures augmentaient l'après-midi et le soir. Le fait que l'humidité relative soit demeurée basse après 19:00 heures reflète la faible teneur en humidité de l'air.

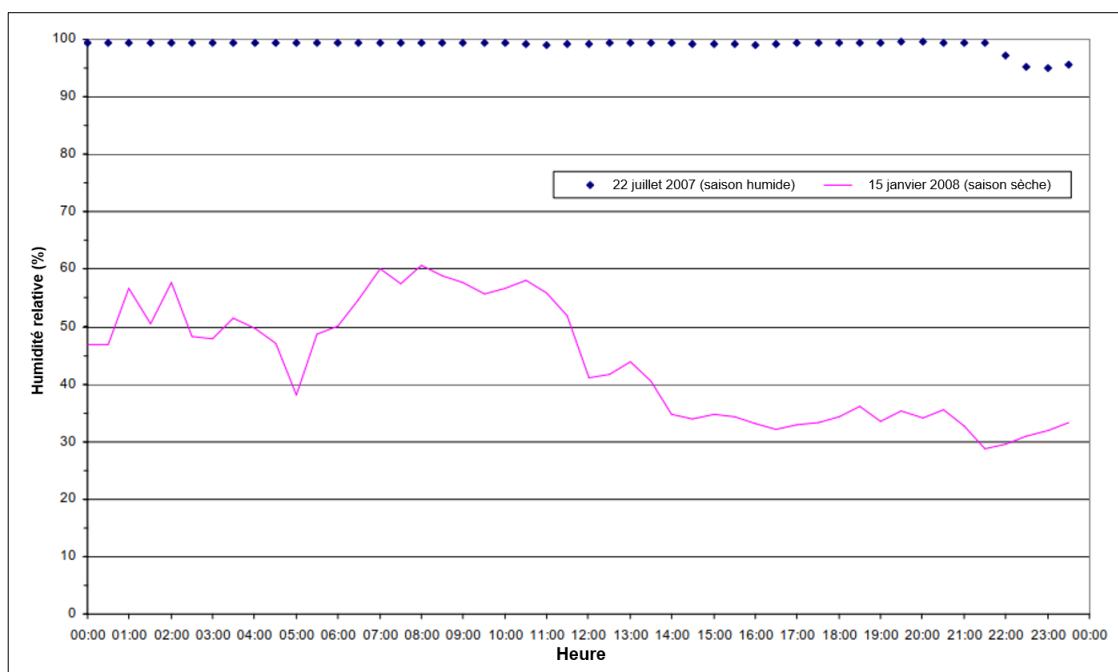


Figure 9-2 : variation diurne de l'humidité relative en saison humide et sèche à Dabatini

Le Tableau 9-1 présente les données récapitulatives de l'humidité relative enregistrées par les stations météorologiques automatiques.

Tableau 9-1 : données récapitulatives de l'humidité relative (% de saturation)

	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Ann.
Station météo automatique de l'aéroport de Beyla (mai 2010 - novembre 2021)													
Moyenne mensuelle	48.0	50.0	67.7	78.4	82.2	86.6	88.3	89.4	88.5	82.9	75.4	58.4	74.6
Maxi. quotidien	99.0	97.6	99.2	98.4	99.3	99.5	100.0	100.0	100.0	100.0	99.9	100.0	100.0
Mini. quotidien	9.9	10.1	11.6	23.7	40.7	48.6	52.0	57.5	51.8	23.4	20.4	15.5	9.9
n	10	9	9	8	9	9	9	8	9	9	9	9	
Station météo automatique de Dabatini (décembre 2001 - décembre 2015)													
Moyenne mensuelle	36.9	52.2	71.0	82.2	89.7	94.8	97.5	98.7	96.9	94.9	83.2	51.8	79.2
Maxi. quotidien	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Mini. quotidien	9.6	11.1	13.5	11.6	41.7	51.2	50.6	62.1	60.5	58.2	32.9	12.6	9.6
n	9	11	12	9	8	10	7	9	9	9	8	11	
Station météo automatique de Fokou ouest (août 2007 - décembre 2012)													
Moyenne mensuelle	38.8	56.6	75.9	84.5	88.9	91.2	91.3	92.8	87.3	78.8	72.3	60.0	76.5
Maxi. quotidien	98.2	98.8	99.3	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.9	100.0	99.0	100.0
Mini. quotidien	10.8	10.1	11.7	15.2	46.7	55.1	34.1	40.7	19.5	12.2	13.6	12.7	10.1
n	4	5	4	3	4	4	4	5	5	6	6	5	
Station météo automatique de Mafindou (août 2007 - juillet 2012)													
Moyenne mensuelle	38.9	53.7	73.8	80.2	86.0	89.1	91.3	92.2	90.7	88.1	79.5	59.7	76.9
Maxi. quotidien	100.0	99.3	99.5	99.6	93.9	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Mini. quotidien	7.2	8.6	10.5	13.3	45.9	47.1	42.4	56.6	53.5	44.7	21.3	11.4	7.2
n	5	5	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	
Station météo automatique de Mandou (septembre 2007 - juin 2012)													
Moyenne mensuelle	35.6	52.6	73.1	80.3	85.4	88.2	89.3	90.6	89.3	87.1	76.9	54.3	75.2
Maxi. quotidien	95.7	98.4	98.3	98.6	98.5	99.2	99.2	99.3	99.4	99.3	99.4	98.5	99.4
Mini. quotidien	8.8	7.0	13.1	23.8	46.5	45.7	40.0	60.0	46.5	37.7	21.6	11.6	7.0
n	5	5	5	5	5	5	4	4	5	4	5	4	
Station météo automatique d'Ouéléba (juillet 2007 - mai 2013)													
Moyenne mensuelle	33.0	50.5	73.9	79.7	85.3	89.1	93.0	94.5	92.6	87.7	73.3	45.6	74.8
Maxi. quotidien	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	98.8	99.4	99.4	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Mini. quotidien	11.4	9.6	13.4	11.4	39.9	53.1	68.6	50.4	55.0	45.1	24.2	14.0	9.6
n	6	6	5	5	5	4	4	5	6	6	6	6	

n = nombre de mois de relevés.

10 ÉVAPORATION

L'évaporation provient des surfaces aquatiques ouvertes, des surfaces foncières nues, de l'eau interceptée par la végétation et des stomates végétaux (appelée évapotranspiration). L'évaporation peut soit se mesurer directement à l'aide d'un bac évaporatoire, soit être estimée indirectement par calcul à l'aide de données météorologiques. Aucune mesure directe de l'évaporation n'a été effectuée sur le site du projet. On s'est plutôt appuyé sur l'estimation de l'évaporation à l'aide des données météorologiques enregistrées par les stations météorologiques automatiques. Deux indices de l'évaporation estimée sont présentés ici :

- Évapotranspiration des cultures de référence : ET_0 (taux potentiel d'évaporation d'une végétation basse via les stomates, calculé à partir de données météorologiques, en supposant que la végétation n'est pas en manque d'eau et transpire à un taux maximum régulé par des facteurs météorologiques, en particulier l'énergie fournie par le rayonnement solaire et les caractéristiques aérodynamiques, par ex. la vitesse du vent).
- Évaporation provenant d'une surface aquatique libre : E_0 (cette valeur se calcule également à partir de facteurs météorologiques, et est supposée être régulée par ceux-ci).

L' ET_0 a été calculée à l'aide de la méthode de Penman-Monteith (Allen et coll., 1998). L' E_0 a été calculée à l'aide de l'équation de Penman (1948). Toutes deux s'appuient sur les données des stations météorologiques. Les méthodes sont détaillées à l'annexe B.

La Figure 10-1 montre la variation journalière des valeurs de ET_0 et E_0 calculées à partir des données de la station météorologique automatique de Dabatini. Les valeurs quotidiennes de l'ETP varient de maxima de 5 à 8 mm/j en saison sèche à 1 à 2 mm/j en saison humide. Les estimations de l'évaporation aquatique libre sont toujours plus grandes que les estimations de l'évapotranspiration potentielle en raison de l'absence d'estimation de la résistance stomatique à l'évaporation. Les valeurs quotidiennes de l' E_0 en saison sèche atteignent des valeurs élevées de 10-15 mm/j (250 mm par mois). Les vitesses de vent élevées enregistrées à Dabatini (et Ouéléba) en sont responsables.

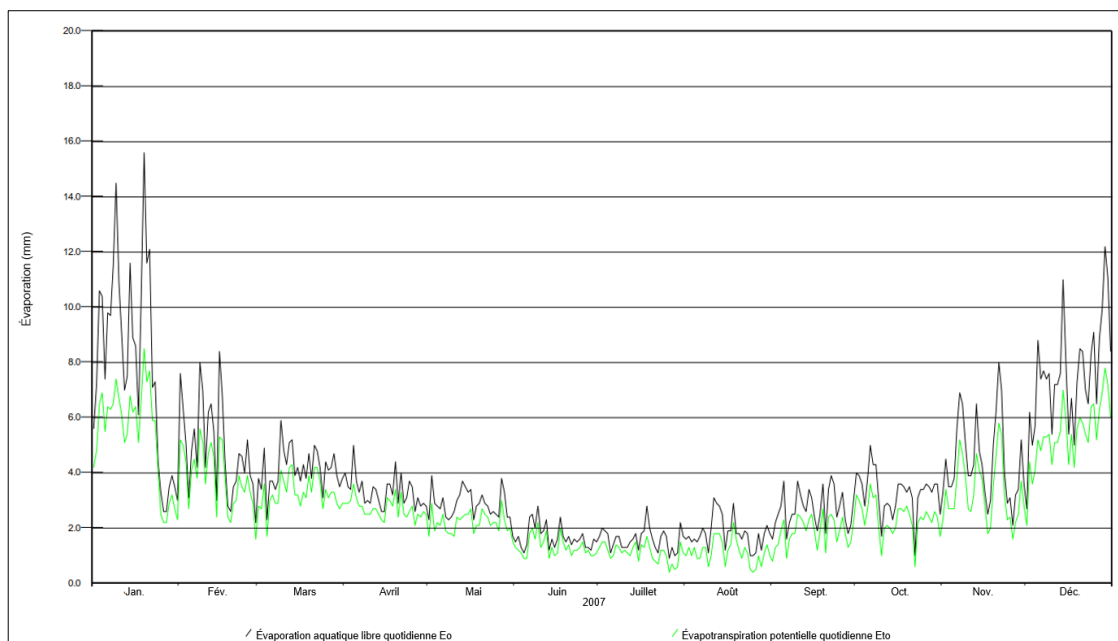


Figure 10-1 : évapotranspiration potentielle et évaporation aquatique libre quotidiennes à Dabatini, 2007

Le Tableau 10-1 présente les données récapitulatives de l'évaporation calculées d'après les données enregistrées par les stations météorologiques automatiques, et la Figure 10-2 présente les relevés quotidiens continus de janvier 2007 à juin 2012.

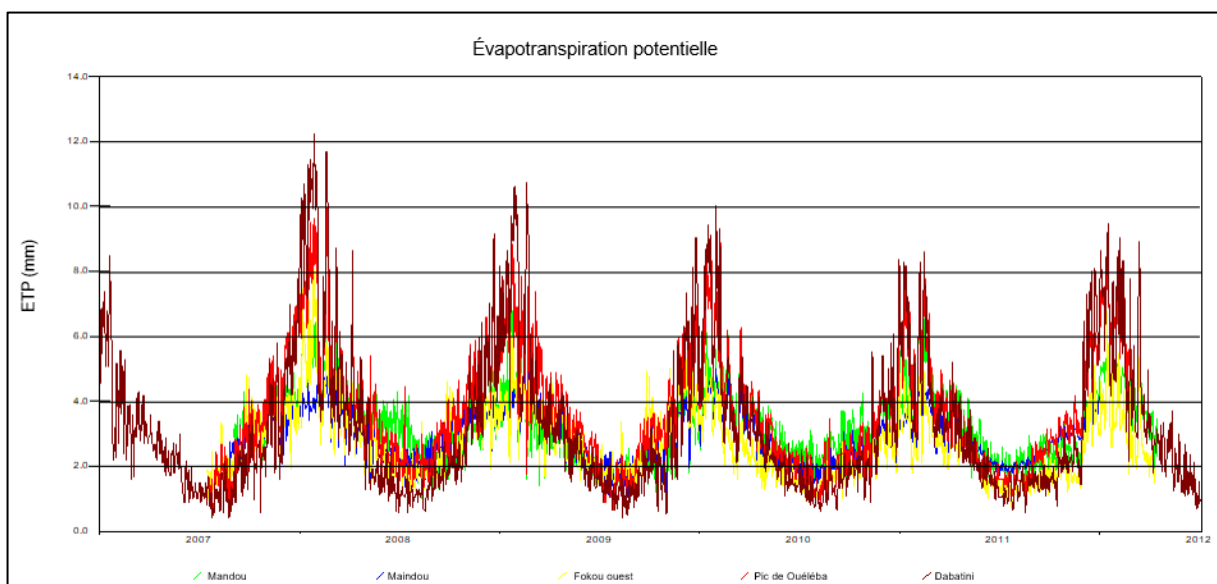


Figure 10-2 : évapotranspiration potentielle quotidienne à toutes les stations météorologiques, de janvier 2007 à juin 2012

La Figure 10-3 montre les relations entre altitude et valeurs annuelles moyennes de l'ETP, et les variables météorologiques qui contribuent au calcul de l'ETP. Il existe une corrélation positive raisonnable entre ETP et altitude. Cela reflète la forte corrélation positive entre vitesse annuelle moyenne du vent et altitude. Il existe une forte corrélation négative entre température et altitude, qui régule l'ETP en saison humide (voir ci-dessous).

Tableau 10-1 : données récapitulatives de l'évaporation (mm)

	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Ann.
Station météo automatique de Dabatini (janvier 2007 - juin 2012)													
ET _o mensuelle moyenne	219.9	159.0	119.6	93.6	71.4	48.8	40.4	40.9	54.3	69.4	102.9	181.0	1201
E _o mensuelle moyenne	338.5	222.3	156.5	123.0	93.0	62.4	53.2	55.2	71.0	91.4	130.1	240.7	1637
ET _o quot. moyenne	7.1	5.7	3.9	3.1	2.3	1.6	1.3	1.3	1,8	2,2	3.4	5.8	
E _o quot. moyenne	10.9	7.9	5.0	4.1	3.0	2,1	1.7	1,8	2.4	2.9	4.3	7.8	
n	6	6	6	6	6	6	5	5	5	5	5	5	
Station météo automatique de Fokou ouest (août 2007 - mars 2012)													
ET _o mensuelle moyenne	130.3	106.0	95.3	85.5	74.6	56.8	46.5	52.8	65.5	82.3	89.6	108.7	994
E _o mensuelle moyenne	138.7	109.9	98.3	89.1	78.2	59.1	48.3	55.5	68.7	86.3	93.4	112.2	1038
ET _o quot. moyenne	4.2	3.8	3.1	2.9	2.4	1.9	1.5	1.7	2,2	2.7	3.0	3.5	
E _o quot. moyenne	4.5	3.9	3.2	3.0	2.5	2.0	1.6	1,8	2.3	2.8	3.1	3.6	
n	5	5	5	4	4	4	4	5	5	5	5	5	
Station météo automatique de Mafindou (janvier 2007 - décembre 2011)													
ET _o mensuelle moyenne	116.8	114.1	109.3	96.9	82.3	65.0	59.3	61.8	72.5	87.6	92.6	106.3	1065
E _o mensuelle moyenne	120.3	117.7	112.8	101.0	85.9	67.8	62.7	65.5	76.2	91.8	95.4	108.5	1105
ET _o quot. moyenne	3.8	3.9	3.5	3.2	2.7	2,2	1.9	2.0	2.4	2.8	3.1	3.4	
E _o quot. moyenne	3.9	4.1	3.6	3.4	2.8	2.3	2.0	2,1	2.5	3.0	3.2	3.5	
n	4	4	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	
Station météo automatique de Mandou (janvier 2007 - mars 2012)													
ET _o mensuelle moyenne	146.2	127.6	119.3	104.0	91.7	74.1	69.4	68.5	74.9	82.6	89.5	120.8	1169
E _o mensuelle moyenne	157.2	134.6	125.9	110.7	98.2	79.8	75.9	74.4	80.0	86.7	93.1	125.5	1242
ET _o quot. moyenne	4.7	4.6	3.8	3.5	3.0	2.5	2,2	2,2	2.5	2.7	3.0	3.9	
E _o quot. moyenne	5.1	4,8	4.1	3.7	3.2	2.7	2.4	2.4	2.7	2.8	3.1	4.0	
n	5	5	5	4	4	4	4	4	5	5	5	5	
Station météo automatique d'Ouéléba (juillet 2007 - février 2012)													
ET _o mensuelle moyenne	207.7	163.4	136.1	112.0	90.8	68.2	53.2	54.3	73.6	94.3	117.9	161.6	1333
E _o mensuelle moyenne	265.3	198.4	163.2	133.8	108.1	82.8	70.7	78.2	94.0	110.7	134.8	188.1	1628
ET _o quot. moyenne	6.7	5.8	4.4	3.7	2.9	2.3	1.7	1,8	2.5	3.0	3.9	5.2	
E _o quot. moyenne	8.9	7.1	5.3	4.5	3.5	2.8	2.3	2.5	3.1	3.6	4.5	6,1	
n	5	5	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	

n = nombre de mois de relevés.

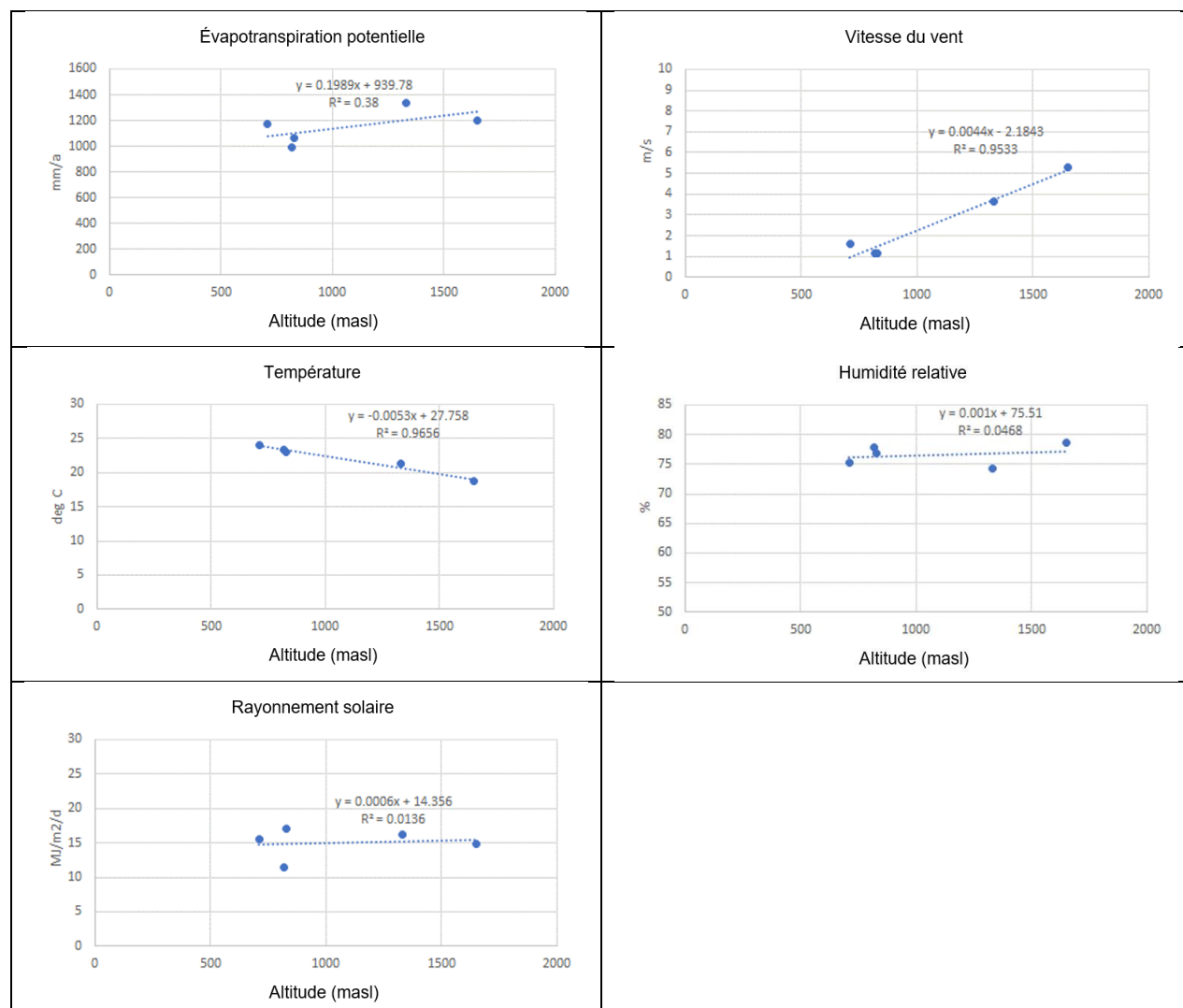


Figure 10-3 : relation entre altitude et ETP et variables des composantes, 2007-2011

La Figure 10-4 montre la répartition de l'ETP mensuelle moyenne et les variables météorologiques qui contribuent au calcul de l'ETP.

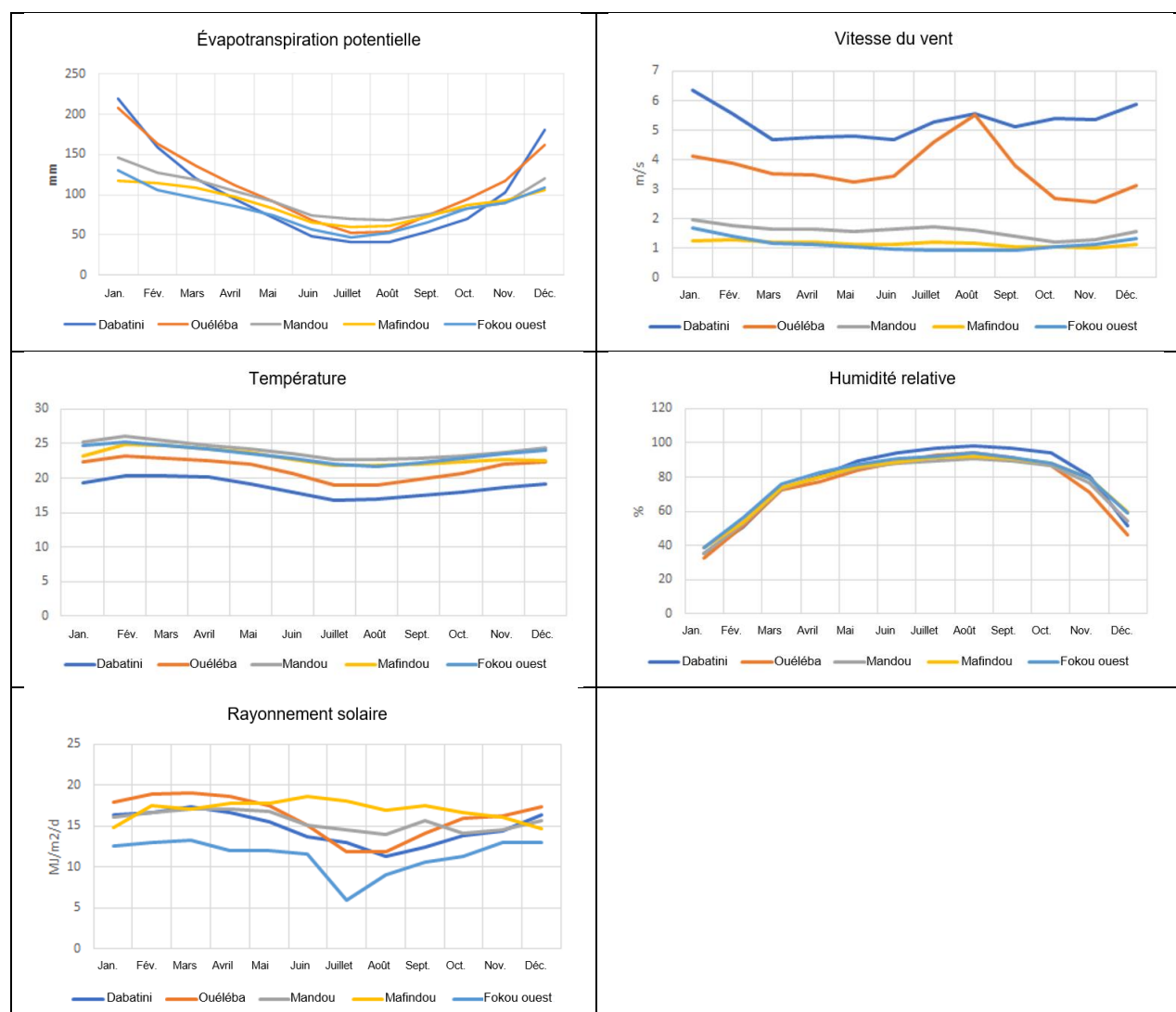


Figure 10-4 : répartition mensuelle de l'ETP et des variables des composantes, 2007-2011

Toutes les stations ont une ETP similaire entre avril et octobre (saison humide). Pendant la saison humide, à la plupart des stations, la température est la variable clé régulant l'ETP. À Fokou West, c'est le rayonnement solaire relativement faible, en raison du brouillard et des nuages, qui régule l'ETP en saison humide. Le rayonnement solaire est relativement faible toute l'année à Fokou ouest ; on sait que les conditions de brouillard persistent sur la forêt côté sud-ouest du Pic de Fon pendant la saison sèche (la transpiration forestière est la source de cette humidité atmosphérique qui est maintenue sous le vent de la crête, par rapport à l'Harmattan du nord-est, par des rotors éoliens verticaux [Met Office, 2008]).

Les stations de Dabatini et d'Ouéléba (hautes terres) ont une ETP relativement élevée en saison sèche en raison des conditions plus venteuses en altitude (Figure 10-3). Mandou, Fokou ouest et Mafindou (stations de plaine) ont une ETP plus faible en saison sèche. Aux fins de l'évaluation de la répartition spatiale de l'ETP dans l'ensemble du projet, on conclut que l'ETP peut être quadrillée en fonction des zones d'altitude. Afin de tenir compte de l'ETP relativement faible à basse altitude, de l'ETP plus élevée sur le plateau d'Ouéléba et de l'ETP plus faible à haute altitude sur le pic de Fon (Figure 10-3), trois zones d'ETP avec des relevés représentatifs de l'ETP respectifs sont proposées (Tableau 10-2).

Tableau 10-2 : zones d'altitude proposées pour le quadrillage de l'ETP

Zone d'ETP	Plage d'altitudes (masl)	Relevé représentatif de l'ETP
Zone 1	> 1500	Dabatini
Zone 2	1 200 – 1 500	Ouéléba
Zone 3	< 1200	Mandou

11 PRECIPITATIONS

La présente section traite des formes de précipitations sur le site du projet, des mécanismes de précipitations, de la répartition des précipitations, de la variabilité des précipitations, de la variabilité diurne, de l'intensité des précipitations et de la survenue d'orages.

11.1 Formes de précipitations

Les précipitations sur le site du projet se produisent sous forme de brouillard, de grêle et de pluie.

La présence de brouillard est liée à l'humidité et à la température de l'air. Le brouillard se forme lorsque la température de l'air tombe à la température du point de rosée. À la température du point de rosée, l'air est saturé de vapeur d'eau, et toute baisse supplémentaire de la température provoque la condensation de la vapeur d'eau en fines gouttelettes d'eau.

Il n'existe aucune observation systématique du brouillard sur les monts Ouéléba ou Pic de Fon. En mai 2007, il a été demandé aux observateurs des pluviomètres manuels des villages environnant la chaîne de commencer à tenir un registre de la survenue de brouillard entre 16:00 et 8:00 heures (heures auxquelles ils ont observé des précipitations). La Figure 11-1 montre la survenue mensuelle de brouillard dans les camps de Canga est et Ouéléba en 2007. Le registre d'Ouéléba est incomplet. La Figure 8-3 suggère néanmoins que le brouillard est plus fréquent à Ouéléba qu'à Canga est.

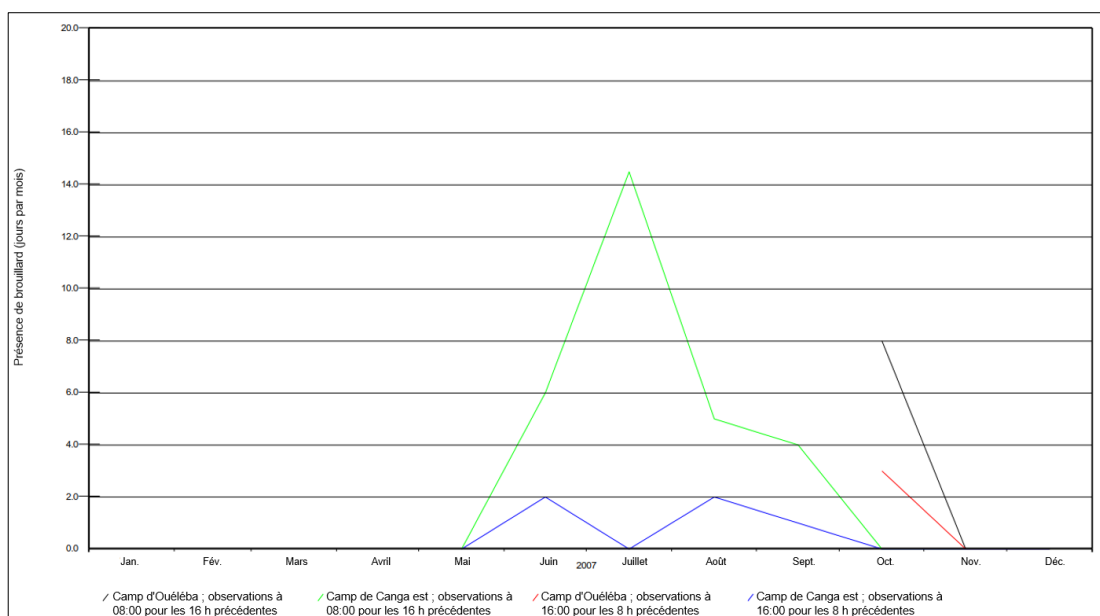


Figure 11-1 : survenue de brouillard dans les camps de Canga est et Ouéléba

Le brouillard est un phénomène courant sur le côté ouest de l'Ouéléba et du Pic de Fon la plupart des matins en saison humide. Il a tendance à remonter la pente ouest le matin, à se propager par-dessus la crête et à descendre la pente est, en se dissipant à mesure que l'air se réchauffe au fil de sa descente. Le brouillard du côté ouest de la chaîne se dissipe généralement l'après-midi, hormis si d'épais nuages maintiennent des températures basses.

Une inversion thermique se forme souvent au petit matin en saison humide à la base du versant est de l'Ouéléba et du Pic de Fon. Cela provoque la formation de brouillard dans les parties les plus basses du côté est de la chaîne de l'Ouéléba et du Pic de Fon. À mesure que les températures augmentent, l'inversion s'élève et le brouillard monte, en causant temporairement des conditions de brouillard dans le camp de Canga est. La Figure 8-3 indique que le brouillard à Canga est et à Ouéléba est plus fréquent entre 16:00 and 08:00 heures qu'entre 08:00 and 16:00 heures. Les températures du point de rosée sont généralement dépassées entre 08:00 et 16:00 heures.

Bien que le brouillard nuise à la visibilité, il est également important pour la végétation. Lorsque l'eau se condense sur le feuillage, elle réduit la transpiration de l'eau via les stomates foliaires et la nécessité d'absorber de l'eau via le système racinaire. Jusqu'à présent, les tentatives de mesure, sur le site du projet, des quantités approximatives d'eau que le brouillard peut fournir aux plantes n'ont pas abouti.

La grêle est une forme occasionnelle de précipitation à Simandou. Sa présence indique des températures en altitude inférieures à zéro. Des grêlons de 10 mm de diamètre ont été observés aux camps de Canga Ouéléba. Aucun registre officiel de la survenue de grêle n'a été tenu.

Les pluies constituent la principale forme de précipitations sur le site du projet. Le reste de la discussion porte sur les pluies.

11.2 Mécanismes des précipitations pluvieuses

Les principaux mécanismes de génération de précipitations pluvieuses sur le site du projet sont les suivants :

- En saison sèche : convection localisée avec de l'humidité apportée par de brèves incursions d'air humide provenant du sud. L'UKMO a suggéré que l'humidité provenant de la forêt à l'ouest de la chaîne était une source possible. Cependant, la présence de brouillard et de pluie n'ayant été observée que lors d'incursions d'air humide, la forêt est considérée comme peu susceptible de fournir à elle seule une humidité suffisante. On a observé que les nuages résultant de la convection durant la saison sèche se formaient de préférence sur la chaîne du Simandou.
- En saison humide : les lignes de grains et les ondes d'est qui traversent le pays vers l'ouest et la convection locale causent des précipitations sur la chaîne de Simandou. Les précipitations sont également causées par l'ascension forcée de l'air humide de la mousson sur la crête depuis l'ouest et le sud-ouest quand l'air de la mousson est relativement profond.

Fullwood (2008) présente une analyse plus détaillée des mécanismes des précipitations pluvieuses.

11.3 Répartition pluviométrique

La Figure 2-3 montre la répartition spatiale générale des précipitations annuelles moyennes à long terme estimées pour la période 2002-2020, d'après les registres comblés et étendus (section 2.2). Les zones de fortes pluies sont situées au-dessus des monts Ouéléba et Pic de Fon, et centrées sur les pentes orientées à l'ouest (vent de mousson). Les pluies annuelles moyennes sur la crête d'Ouéléba sont de l'ordre de 1900 à 2000 mm, et, sur la crête du Pic de Fon, de 2000 à 2300 mm.

Les régimes spatiaux des pluies émergent également sur une base mensuelle. La Figure 11-2 montre les séries chronologiques pluviométriques mensuelles de la période 2007-2013, quand les relevés pluviométriques observés étaient les plus nombreux, en distinguant relevés observés (en rouge) et relevés comblés (en bleu). Il existe des schémas temporels clairs entre pluviomètres voisins, par exemple entre les pluviomètres Whisky 5, Whisky 6 et Pic de Ouéléba sur Ouéléba, et entre les pluviomètres Whisky 1, -2, -3 et Whisky 4 sur Pic de Fon.

La Figure 11-3 présente également les régimes spatiaux du cycle annuel de saison humide et saison sèche sur la zone du projet. De décembre à février, tous les pluviomètres de la montagne et de la plaine à l'est et à l'ouest enregistrent en moyenne des précipitations mensuelles comprises entre 0 et 100 mm. En mars, des averses localisées surviennent, et un certain nombre de pluviomètres à la fois en montagne et en plaine enregistrent des précipitations allant de 100 à 200 mm. Vers avril-mai, les averses ont couvert la majeure partie de la zone du projet, et la plupart des pluviomètres enregistrent une pluviosité mensuelle moyenne de 100 à 200 mm. Les pluies augmentent de mai à août, la plupart des pluviomètres situés à l'ouest de la crête et dessus enregistrant des totaux mensuels plus élevés avant les pluviomètres du côté est. Les précipitations mensuelles moyennes les plus élevées, de 600 à 700 mm, sont enregistrées sur la crête du Pic de Fon en août et à quelques endroits du côté ouest. La saison humide s'estompe de septembre à novembre, mais les précipitations mensuelles les plus élevées continuent d'être enregistrées sur la crête et sur le versant ouest. En novembre, les conditions de la saison sèche sont rétablies sur la majeure partie de la zone du projet, seuls quelques pluviomètres côté ouest enregistrant des précipitations mensuelles légèrement plus élevées que le reste. L'orographie et la provenance sud-ouest des vents pluvio-gènes exercent une régulation importante sur la dynamique saisonnière des précipitations pluvieuses dans la zone du projet.

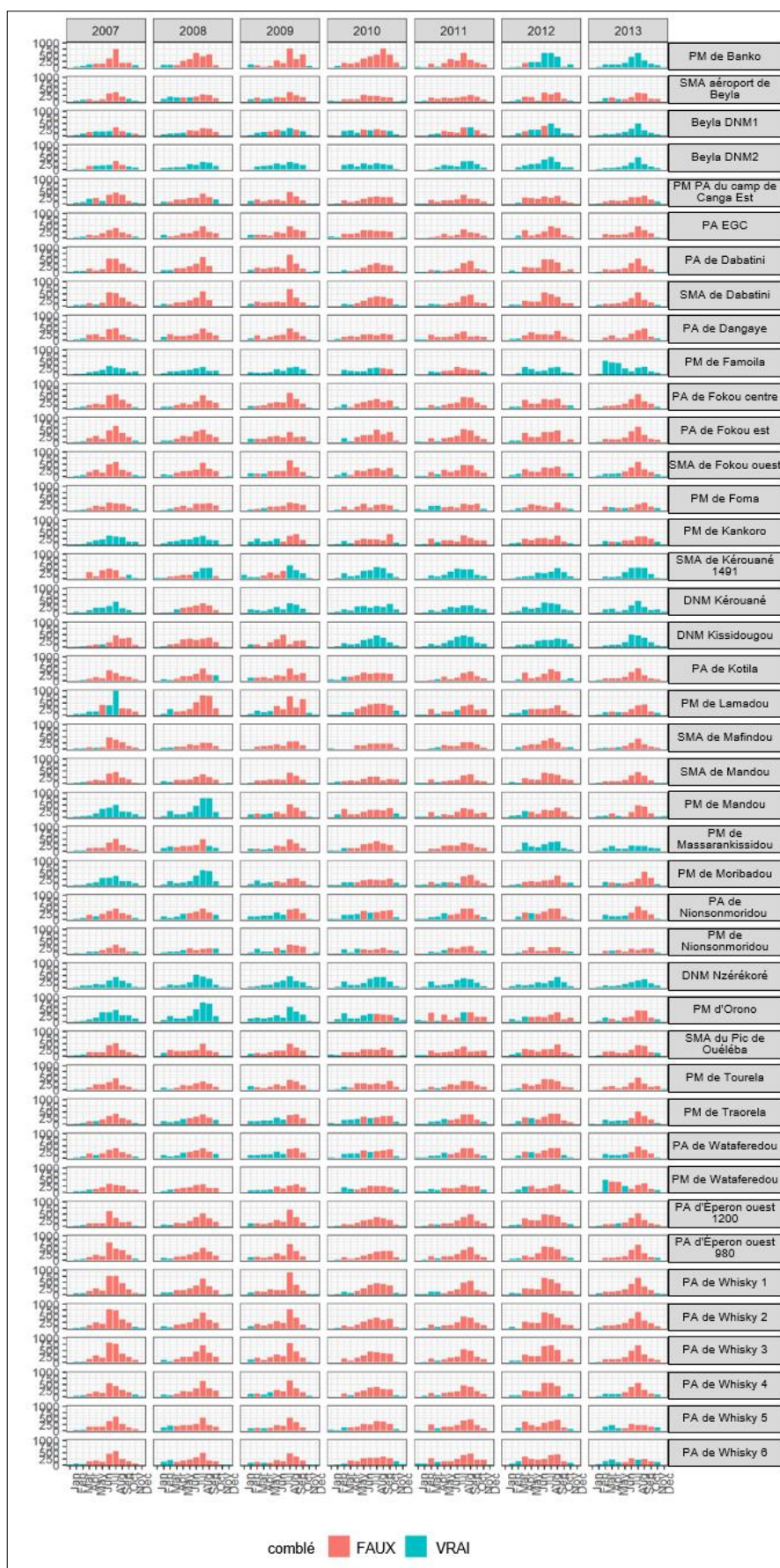


Figure 11-2 : séries chronologiques pluviométriques mensuelles comblées, 2007-2013

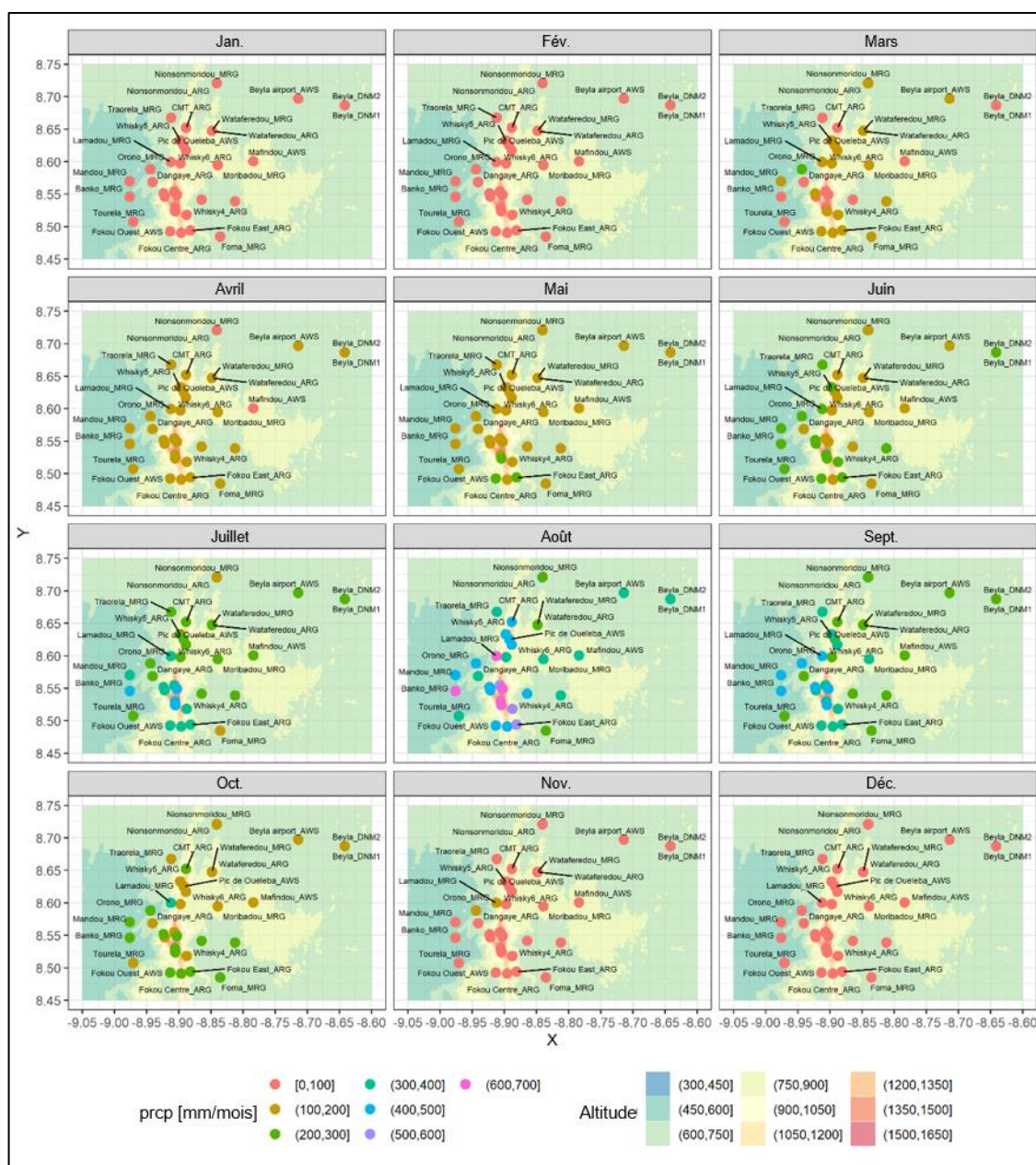


Figure 11-3 : dynamique des précipitations saisonnières moyennes sur la zone du projet

Au jour le jour, les précipitations à Simandou sont souvent générées par des processus convectifs. Une caractéristique des pluies convectives est leur grande variabilité spatiale, avec de gros écarts de relevés souvent constatés sur des pluviomètres voisins. L'analyse des données pluviométriques quotidiennes (annexe C) a révélé une relation relativement faible entre précipitations et altitude ; les données montrent néanmoins des précipitations élevées sur la crête par rapport à la plaine à l'est et à l'ouest. Une relation perceptible entre précipitations et distance de la côte (ou longitude) a également été mise en évidence, ce qui confirme l'observation régionale du déclin des précipitations du sud-ouest au nord-est.

L'absence de corrélation entre pluviométrie et altitude et la grande variabilité spatiale de la pluviométrie ont conduit à penser que les différents pluviomètres pouvaient être considérés comme représentatifs de leur position dans le paysage, et de la notion de « zones d'influence ». Aux fins de la modélisation des eaux souterraines et de leur recharge (SRK, 2022a), il a fallu calculer les précipitations locales au quotidien à l'aide du relevé pluviométrique comblé quotidien de 2002-2020. Comme alternative aux polygones de Thiessen, qui ne sont utiles que pour calculer les précipitations locales sur terrain relativement plat, des « zones d'influence » sur lesquelles chaque pluviomètre a été considéré comme représentatif dans le terrain montagneux de Simandou ont été tracées. L'interprétation des zones pluviales a été étayée par les constats de l'analyse typologique présentée à l'annexe C. La Figure 2-3 montre la zone d'influence de chaque pluviomètre, les symboles des pluviomètres étant codés en couleur, en l'occurrence en fonction de leurs précipitations annuelles moyennes à long terme. Comme la topographie comprend une crête, les zones d'influence des pluviomètres sont largement alignées parallèlement à la topographie, et sur la crête, elles la divisent en composants tels que pentes orientées à l'ouest, ligne de crête et pentes orientées à l'est. On estime que cette approche se traduit par une représentation raisonnable de la répartition spatiale des précipitations aux fins de la modélisation, car elle préserve les caractéristiques de précipitations convectives constatées dans les données brutes. On a observé que l'interpolation spatiale entre les stations qui était nécessaire pour produire un véritable ensemble de données quadrillées lissait les variations temporelles des précipitations et créait un apport pluvieux temporellement non représentatif.

11.4 Variabilité pluviométrique

La Figure 11-4 montre les relevés des précipitations mensuelles et annuelles à Canga est. En moyenne, 93 % des précipitations annuelles à Canga est tombent au cours de la période de huit mois s'étendant du 1er mars au 31 octobre.

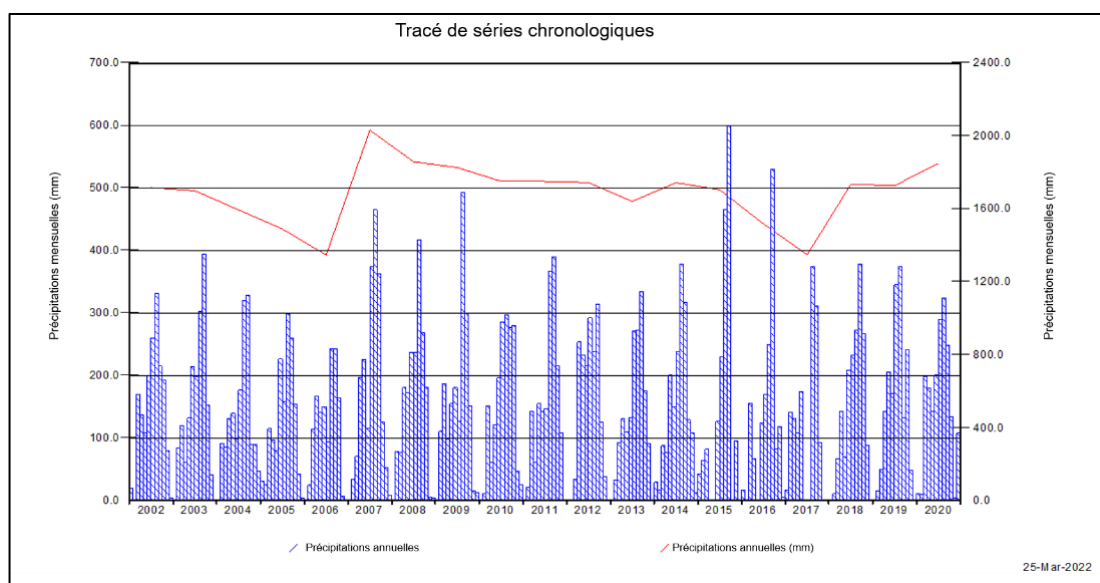


Figure 11-4 : précipitations mensuelles et annuelles à Canga est, 2002-2020

Les précipitations peuvent varier d'une année sur l'autre. Les précipitations à Canga est ont atteint 1346 mm en 2006 et 2030 mm en 2007, ce qui représente des anomalies de -23 % et 17 % par rapport à la moyenne annuelle de 1739 mm sur 19 ans.

Le Tableau 11-1 résume les statistiques pluviométriques mensuelles observées et indique les précipitations maximums quotidiennes enregistrées par les stations météorologiques automatiques à long terme sur le site du projet. Lorsqu'il y avait des lacunes dans les relevés observés, celles-ci ont été comblées par corrélation avec d'autres stations. Il est à noter que les précipitations annuelles moyennes de certains pluviomètres de la figure 2.3 diffèrent de celles du Tableau 11-1 car les relevés mensuels des stations ayant des relevés courts ont été réétendus à janvier 2002 par corrélation avec d'autres stations sur site dont les relevés remontent à janvier 2002.

Tableau 11-1 : données récapitulatives des précipitations observées (mm)

	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Ann.
Station météo automatique de l'aéroport de Beyla (mai 2010 - avril 2017)													
Moyenne mensuelle	6,1	41.7	68.2	137.5	147.9	153.3	191.1	214.5	285.5	111.7	61.9	0.0	1419.4
Maxi. mensuel	12.6	94.6	156.4	199.2	189.6	275.0	223.0	233.8	408.0	192.4	80.4	0.0	408.0
Mini. mensuel	0.0	0.0	17.2	101.6	97.0	39.0	154.2	195.0	189.6	49.6	42.6	0.0	0.0
Maxi. quotidien ¹	9.2	33.2	40.2	49.2	50.8	46.2	43.2	47.0	56.4	33.2	46.0	0.0	56.4
n	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
Pluviomètre quotidien de Canga est (janvier 2002 - avril 2021)													
Moyenne mensuelle	8.5	40.1	115.8	126.1	150.7	171.4	229.0	340.9	326.2	163.9	56.7	12.0	1741.3
Maxi. mensuel	42.2	141.4	198.4	253.0	232.7	236.7	374.5	492.2	599.4	279.9	117.9	107.4	599.4
Mini. mensuel	0.0	0.0	34.3	60.5	69.3	98.0	93.4	237.8	214.5	81.9	0.0	0.0	0.0
Maxi. quotidien ¹	40.2	63.8	84.8	64.4	66.5	88.9	85.1	93.9	313.5	75.7	54.8	80.4	313.5
n	20	20	20	19	17	18	18	19	19	18	19	19	
Station météo automatique de Dabatini (décembre 2001 - février 2010)													
Moyenne mensuelle	76.6	54.0	134.2	132.8	121.6	192.4	284.1	540.5	306.5	99.8	33.9	28.8	2006.1
Maxi. mensuel	339.8	92.8	274.4	151.2	168.0	245.0	368.3	704.1	347.5	171.9	66.5	81.9	704.1
Mini. mensuel	2,2	7.0	50.0	122.2	63.0	101.4	146.1	314.6	246.3	0.0	0.2	0.0	0.0
Maxi. quotidien ¹	178.7	39.8	135.6	53.6	37.3	71.6	99.9	102.3	69.5	23.6	21.7	25.6	178.7
n	6	7	7	4	4	4	3	4	4	4	4	7	
Station météo automatique de Fokou ouest (février 2007 - juillet 2012)													
Moyenne mensuelle	6.9	56.2	101.9	172.9	232.3	206.5	322.6	474.6	367.1	230.4	59.4	6.0	2236.8
Maxi. mensuel	24.6	129.0	156.8	289.5	283.6	229.8	502.0	599.8	458.2	283.4	140.8	19.8	599.8
Mini. mensuel	0.0	6,2	53.0	68.4	203.5	156.3	174.0	352.2	271.6	189.8	3.6	0.0	0.0
Maxi. quotidien ¹	14.8	63.4	50.1	69.9	52.3	71.6	82.6	99.8	86.7	67.0	35.4	12.8	99.8
n	4	6	5	4	5	5	4	3	3	4	5	4	
Station météo automatique de Mafindou (décembre 2001 - juillet 2012)													
Moyenne mensuelle	10.4	25.7	79.2	98.1	121.6	165.7	207.7	262.3	279.6	148.7	52.1	17.2	1468.3
Maxi. mensuel	40,5	60.7	251.8	220.4	167.2	217.1	350.4	344.3	396.9	265.5	104.3	123.9	396.9
Mini. mensuel	0.0	1.3	0.0	2.4	50.3	81.1	114.6	198.1	101.5	71.4	1,2	0,6	0.0

	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Ann.
Maxi. quotidien ¹	37.6	29.6	43.2	74.0	41.9	44.1	72.4	91.6	68.7	58.6	36.2	49.5	91.6
n	10	10	10	8	6	7	7	7	9	9	7	8	
Station météo automatique de Mandou (décembre 2001 - juillet 2013)													
Moyenne mensuelle	6.9	40.2	98.4	103.1	98.1	164.1	287.7	424.3	328.3	172.4	85.5	10.4	1819.4
Maxi. mensuel	26.1	95.4	186.4	149.9	156.2	281.4	528.4	699.8	788.4	381.8	323.2	39.4	788.4
Mini. mensuel	0.0	4.1	0.2	40.2	26.0	17.8	129.2	260.2	98.5	101.4	1,1	0.0	0.0
Maxi. quotidien ¹	24.0	35.0	48.5	41.5	26.4	97.9	185.9	94.3	65.6	54.1	50.3	28.6	185.9
n	12	12	10	8	9	9	10	8	10	9	9	10	
Station météo automatique d'Ouéléba (juillet 2007 - janvier 2014)													
Moyenne mensuelle	18.5	64.0	183.3	172.1	151.0	188.8	242.4	409.4	319.7	181.5	70.3	8.3	1967.5
Maxi. mensuel	61.8	135.8	242.8	295.2	192.0	257.4	279.8	518.2	464.7	235.2	213.2	36.0	518.2
Mini. mensuel	0.0	28.0	134.0	66.4	116.7	168.5	172.4	230.8	169.3	136.6	3.8	0.2	0.0
Maxi. quotidien ¹	60.8	82.2	84.0	59.0	32.8	83.4	69.6	82.4	61.2	81.8	67.7	33.2	84.0
n	7	6	5	6	6	4	4	5	5	6	7	5	

n = nombre de mois de relevés. Les lacunes des relevés ont été comblées par corrélation avec d'autres stations.

1 = la journée pluviométrique commence à 09:00 heures

11.5 Variabilité diurne

Les précipitations sont variables à l'échelle diurne sur le site du projet. La Figure 11-5 montre le pourcentage de précipitations enregistrées chaque demi-heure de la journée pour Dabatini et pour le pluviomètre du centre de Fokou situé sur la crête de la chaîne, à l'extrémité sud du site du Pic de Fon.

Les précipitations sont réparties de façon relativement uniforme toute au long de la journée pendant la saison humide. Pendant la saison sèche, il y a des pics de précipitations entre 09:00 et 10:30 heures et entre 15:00 et 19:30 heures.

À l'extrémité sud du site du Pic de Fon, les précipitations de la saison humide sont également réparties tout au long de la journée, mais il tombe davantage de pluie de 13:00 heures à 01:30 heure. La variation diurne est très marquée pendant la saison sèche, avec de nets pics de précipitations entre 01:00 et 02:30 heures et entre 15:00 et 18:00 heures, selon le moment de la convection.

11.6 Intensités pluviométriques

Les précipitations sur le site du projet peuvent être intenses, résultat de l'activité convective et des orages. À titre d'exemple, pour les tempêtes dont la durée s'échelonne de 0,5 à 72 heures, le Tableau 11-2 recense les cinq précipitations les plus importantes enregistrées pour chaque durée par les stations de la zone du projet. La chute journalière la plus élevée jamais enregistrée est de 208 mm au pluviomètre automatique Whisky 1, le 6 août 2007. Le Tableau 11-2 suggère que les précipitations maximums ont surtout lieu en juillet ou en août, mois les plus humides de l'année, mais peuvent aussi survenir en dehors de cette période. Les pluies à forte intensité surviennent tant sur les terres hautes qu'en plaine. Certains signes indiquent que les intensités élevées ne se produisent que pendant de brèves périodes en plaine, alors qu'elles peuvent perdurer plus longtemps sur les terres hautes.

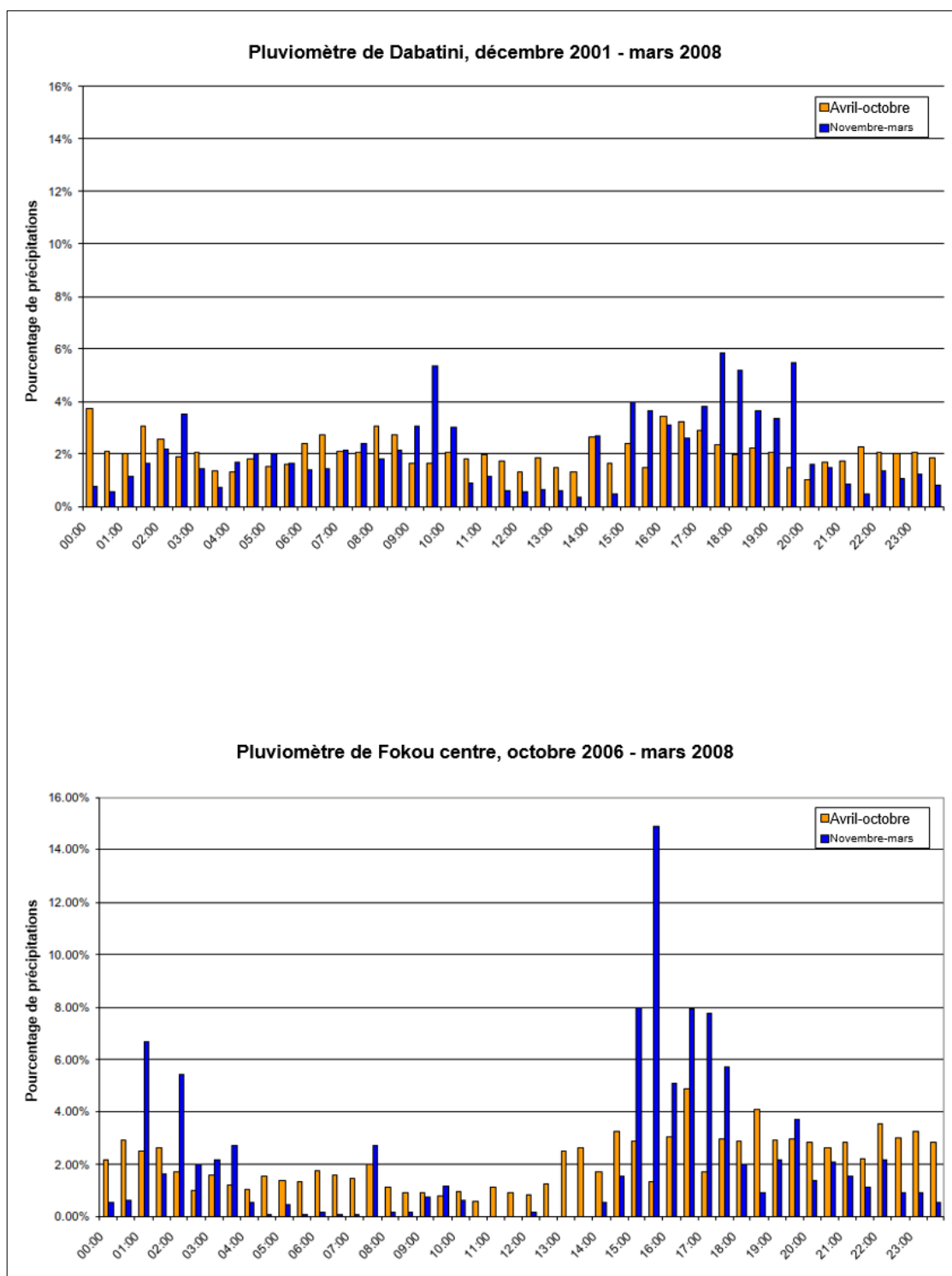


Figure 11-5 : variation diurne des précipitations sur le Pic de Fon

Tableau 11-2 : profondeurs et intensités pluviométriques maximums enregistrées sur le site du projet, 2002-2011

Durée des précipitations	Station	Date	Heure de fin	Précipitations (mm)	Intensité (mm/h)
30 min.	SMA de Mandou	03/08/11	02:00	57.4	114.8
	PA de Fokou est	04/05/10	18:30	51.6	103.2
	PA de Whisky 1	05/08/07	23:00	47	94
	PA de Whisky 2	10/03/09	19:00	45.2	90.4
	PA de Whisky 5	21/03/08	18:00	42.6	85.2
Une heure	PA de Fokou est	05/08/07	23:00	79.6	79.6
	SMA de Mandou	03/08/11	02:30	74.2	74.2
	PA de Whisky 5	21/03/08	18:00	68	68
	PA de Whisky 6	21/03/08	18:00	67	67
	SMA du Pic de Ouéléba	13/10/10	19:30	66	66
6 heures	SMA de Mandou	08/07/03	23:30	178.6	29.77
	PA de Whisky 1	06/08/07	02:00	168.3	28.05
	PA de Fokou est	06/08/07	02:00	144.6	24.1
	PA de Whisky 3	22/07/07	00:00	130.2	21.7
	PA de Fokou central	27/07/08	21:00	115.7	19.28
12 heures	SMA de Mandou	09/07/03	05:30	181.7	15.14
	PA de Whisky 1	06/08/07	08:30	173.3	14.44
	PA de Fokou est	06/08/07	08:30	150.6	12.55
	PA de Whisky 3	22/07/07	06:00	136.8	11.4
	PA de Fokou central	27/07/08	23:30	121.1	10.09
24 heures	PA de Whisky 1	06/08/07	20:00	208	8.67
	SMA de Mandou	09/07/03	17:30	196.7	8.2
	PA de Whisky 3	22/07/07	16:30	185.7	7.74
	PA de Fokou est	06/08/07	20:30	173	7.21
	PA de Whisky 2	06/08/07	20:00	151	6.29
48 heures	PA de Whisky 1	06/08/07	20:00	225.2	4.69
	SMA de Mandou	05/08/11	00:00	220.2	4.59
	PA de Whisky 3	23/07/07	14:30	198.9	4.14
	PA de Fokou est	07/08/07	18:00	192	4
	PA de Whisky 2	23/07/07	13:30	168.5	3.51
72 heures	SMA de Mandou	05/08/11	19:30	304	4.22
	PA de Whisky 3	30/07/07	13:30	245.5	3.41
	PA de Whisky 1	08/08/07	09h30	240.5	3.34
	PA de Whisky 2	30/07/07	13:30	223.3	3.1
	PA de Fokou est	08/08/07	17:00	215.4	2.99

Les profondeurs et intensités pluviométriques orageuses recommandées pour la conception technique sur le site minier sont indiquées à la section 2.11.

11.7 Orages

Les relevés des orages ont commencé en mai 2007. La Figure 11-6 montre la variation saisonnière et diurne du nombre d'orages enregistrés à Canga est. L'activité orageuse maximum a lieu entre 16:00 et 08:00 heures, comme pour les précipitations (figure 2.23). Le pic d'activité pendant ces heures se produit en juillet, avec un pic secondaire en novembre. Des orages éclatent également au cours de la période de 08:00 à 16:00 heures. Le pic d'activité pendant ces heures se produit en juin, avec un pic secondaire en septembre.

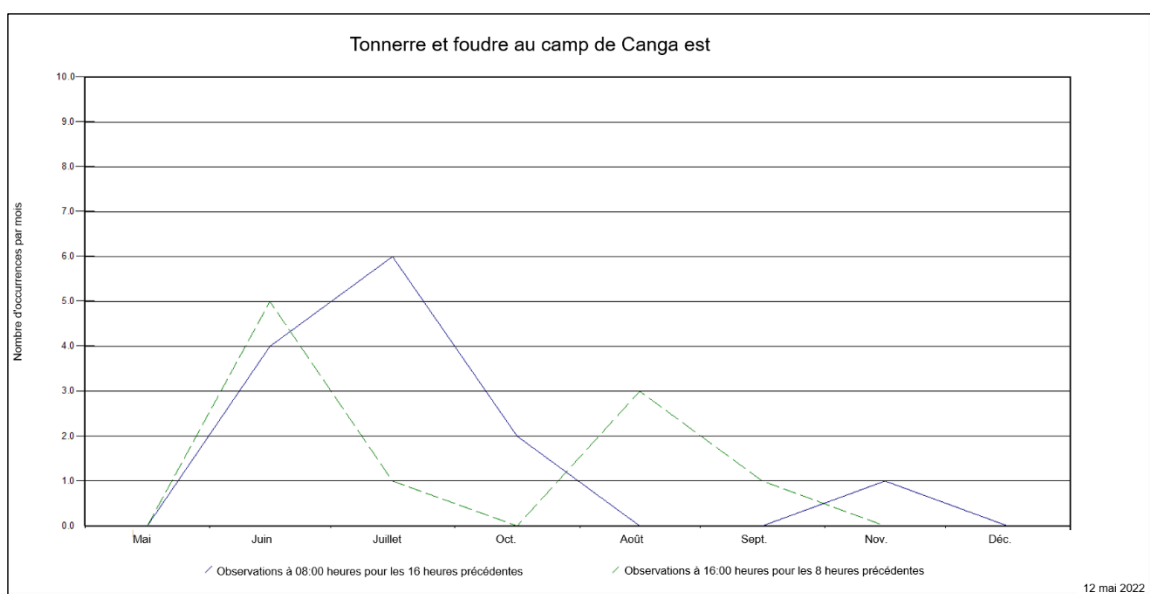


Figure 11-6 : orages enregistrés à Canga est, 2007

12 COURBES NOMINALES DE PROFONDEUR-DUREE-FREQUENCE PLUVIOMETRIQUES

Les courbes de profondeur-durée-fréquence (PDF) pluviométriques présentées dans le rapport DE de SWS (SWS, 2012) ont été mises à jour par SRK, 2022b.

Le Tableau 12-1 et le Tableau 12-2 indiquent les intensités pluviométriques nominales pour les orages d'une durée allant jusqu'à 24 heures, et de 2 jours à 30 jours, respectivement¹. Les intensités pluviométriques se fondent sur l'analyse des relevés historiques et nécessitent des ajustements pour tenir compte du changement climatique. Les courbes et tableaux DDF présentés ci-dessous correspondent aux stations pluviométriques du « groupe 1 » qui sont représentatives des positions de crête du Pic de Fon, où l'on recense des précipitations plus intenses. Un deuxième ensemble de courbes DDF (« groupe 2 ») a également été élaboré pour Ouéléba et les zones de basse altitude, et se trouve dans SRK, 2022b.

Tableau 12-1 : intensités pluviométriques nominales pour les durées allant jusqu'à 24 heures

Durée/périodicité de l'orage	10 min	15 min	30 min	1 h	3 h	6 h	12 h	15 h	18 h	24 h
mm/h										
2	201	149	89	53	23	14	8.2	7	6,1	4.9
5	280	199	117	71	33	20	13	11	9.5	7.8
10	329	231	135	83	39	24	15	13	12	9.7
20	377	263	154	94	45	29	18	16	14	12
25	397	277	162	99	47	30	19	16	15	12
50	459	319	186	114	54	34	22	19	17	14
100	521	361	210	128	61	38	24	21	19	15
200	582	403	234	143	67	42	27	23	20	17
500	663	459	266	162	76	48	30	26	23	19

Tableau 12-2 : intensités pluviométriques nominales pour les durées allant de 2 à 30 jours

Durée/périodicité de l'orage	2 jours	3 jours	5 jours	7 jours	14 jours	21 jours	30 jours
mm/h							
2	2.8	2,1	1.6	1.4	1,1	0.95	0.84
5	3.8	3.1	2.5	2,2	1,8	1.5	1.4
10	4.7	3.9	3.2	2.8	2.3	2	1,8
20	5,5	4.7	3.9	3.4	2.8	2.4	2,2
25	5.8	4.9	4.1	3.6	2.9	2.6	2.3
50	6.7	5.7	4.7	4.2	3.4	3	2.7
100	7.5	6,4	5.4	4,8	3.9	3.4	3.1
200	8.4	7.2	6	5.4	4.3	3.9	3.5
500	9.5	8.1	6.9	6,2	5	4.4	4

Le Tableau 12-3 et le Tableau 12-4 indiquent les profondeurs pluviométriques nominales pour les orages d'une durée allant jusqu'à 24 heures, et de 2 jours à 30 jours, respectivement.

¹ La dérivation des tableaux IDF est présenté dans SRK, 2022b. Mine de Simandou 2022 ; analyse de l'intensité et de la profondeur-durée-fréquence pluviométriques.

Tableau 12-3 : profondeurs pluviométriques nominales pour les durées allant jusqu'à 24 heures

Durée/périodicité de l'orage	10 min	15 min	30 min	1 h	3 h	6 h	12 h	15 h	18 h	24 h
	mm									
2	33	37	44	53	70	83	99	105	110	118
5	47	50	58	71	98	121	150	161	170	186
10	55	58	68	83	117	147	185	199	211	233
20	63	66	77	94	135	171	218	235	250	277
25	66	69	81	99	142	179	228	246	262	289
50	77	80	93	114	162	205	259	280	298	329
100	87	90	105	128	182	230	290	313	333	368
200	97	101	117	143	202	255	321	347	369	406
500	110	115	133	162	229	287	362	391	415	458

Tableau 12-4 : profondeurs pluviométriques nominales pour les durées allant de 2 à 30 jours

Durée/périodicité de l'orage	2 jours	3 jours	5 jours	7 jours	14 jours	21 jours	30 jours
	mm						
2	133	149	194	237	367	480	608
5	180	221	299	371	589	776	992
10	224	279	383	477	761	1007	1289
20	266	335	463	578	927	1227	1574
25	279	353	488	610	979	1297	1664
50	321	407	566	709	1141	1513	1943
100	361	461	643	807	1301	1727	2219
200	402	515	720	905	1461	1941	2495
500	455	586	822	1034	1672	2222	2858

La Figure 12-1 et la Figure 12-2 présentent les courbes intensité-durée-fréquence (IDF) adaptées aux données du Tableau 12-5 et du Tableau 12-6 pour les orages d'une durée allant jusqu'à 24 heures, et de 2 jours à 30 jours, respectivement.

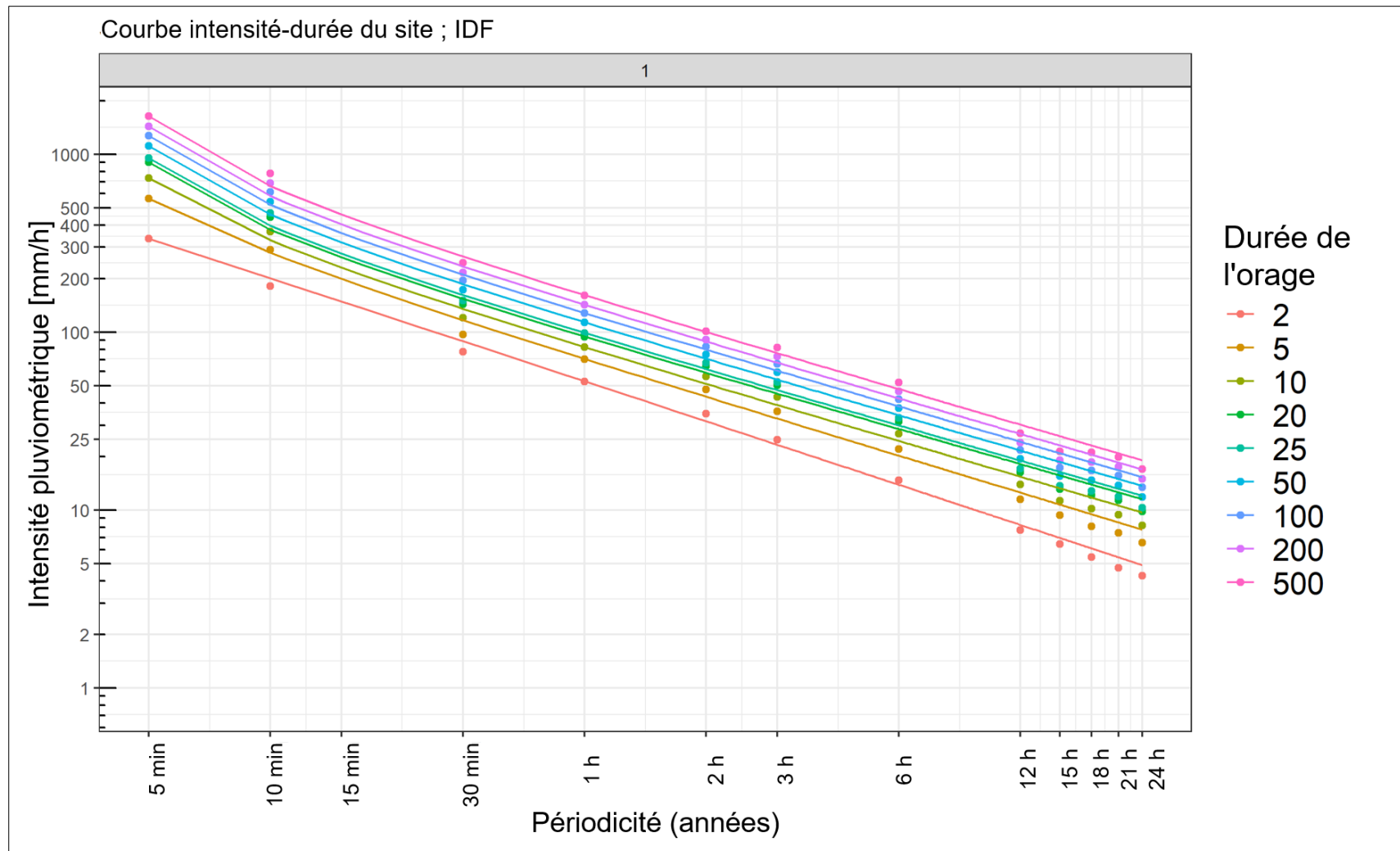


Figure 12-1 : courbes IDF pluviométriques nominales pour les durées allant jusqu'à 24 heures

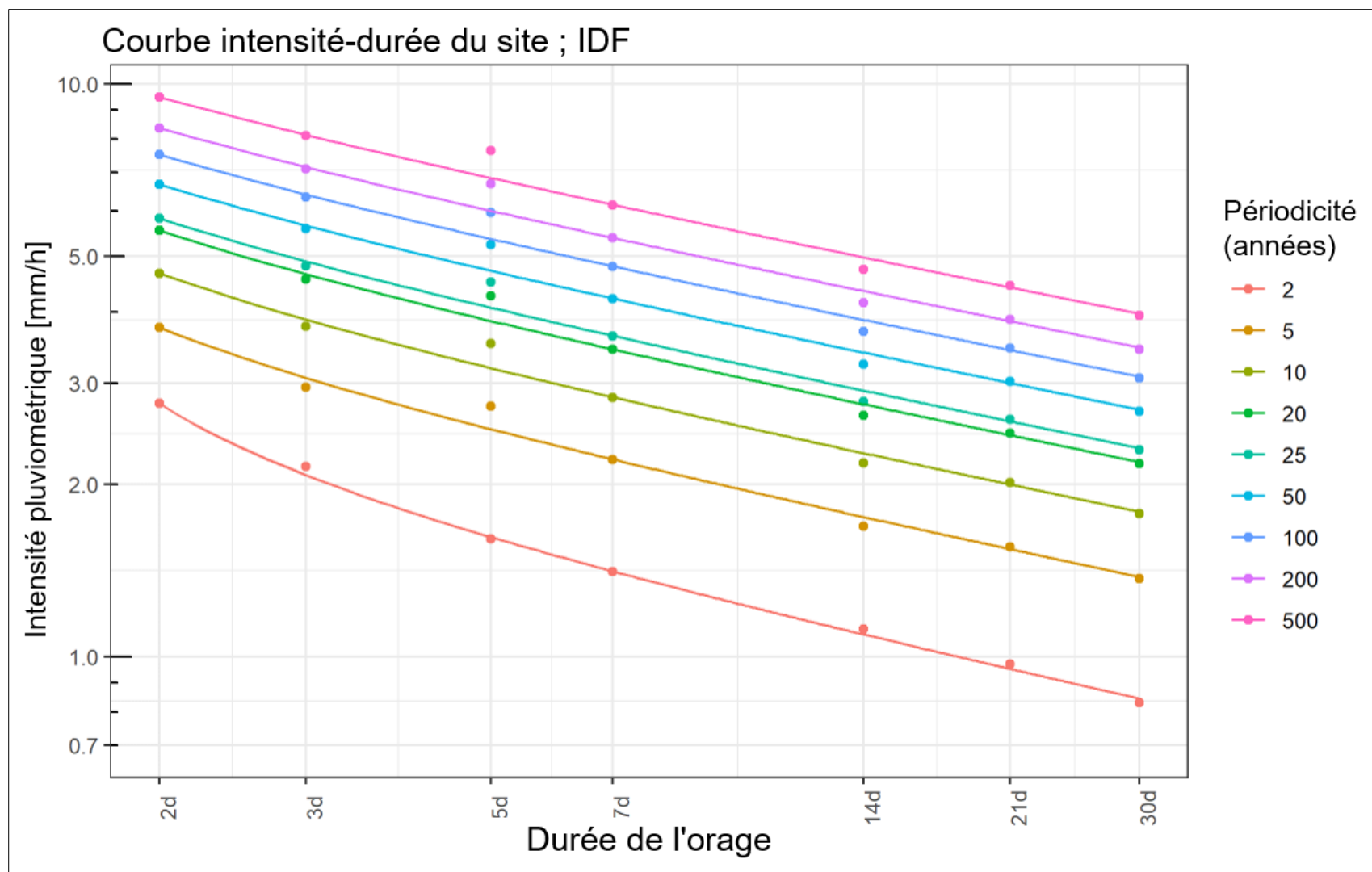


Figure 12-2 : courbes IDF pluviométriques nominales pour les durées allant de 2 à 30 jours

Là où les durées ou périodicités des orages diffèrent de celles figurant dans le tableau, les intensités pluviométriques nominales sont estimées d'après l'équation suivante.

$$i = \frac{a}{(T + b)^c}$$

Sachant que T représente la durée de l'orage en heures. Les valeurs des paramètres a, b et c sont indiquées dans le Tableau 12-5 et le Tableau 12-6 pour les orages d'une durée allant jusqu'à 24 heures, et de 2 jours à 30 jours, respectivement.

Tableau 12-5 : paramètres des courbes IDF pour les durées allant jusqu'à 24 heures

Périodicité (années)	a	b	c
2	53.04	0.002252	0.7488
5	68.96	-0,03634	0.6874
10	79.86	-0,04807	0.6637
20	91.16	-0,0536	0.6512
25	95.69	-0,05377	0.6523
50	109.7	-0,05418	0.6552
100	123.6	-0,05448	0.6574
200	137.4	-0,0547	0.6592
500	155.7	-0,05492	0.6612

Tableau 12-6 : paramètres des courbes IDF pour les durées allant de 2 à 30 jours

Périodicité (années)	a	b	c
2	6.654	-31,95	0.3158
5	9.901	-23,06	0.3013
10	12.45	-20,54	0.2961
20	14.94	-18,65	0.2933
25	15.73	-18,14	0.2926
50	18.18	-16,75	0.291
100	20.63	-15,61	0.2899
200	23.08	-14,66	0.2891
500	26.31	-13,62	0.2883

13 JOURS DE PLUIE

Les jours de fortes pluies sont susceptibles de perturber les activités minières. Le Tableau 13-1 résume la survenue de fortes pluies d'une durée d'une heure enregistrées au pluviomètre Whisky 1 sur le Pic de Fon sur la période de 2006 à 2011. Ces informations peuvent servir à estimer la durée totale des perturbations si on table sur une hypothèse du seuil de précipitations à partir duquel les activités sont perturbées.

Tableau 13-1 : périodes de précipitations d'une durée d'une heure au pluviomètre
Whisky 1 du Pic de Fon

Année	Nombre de périodes d'une heure avec précipitations égales/supérieures à				Durée maxi. (heures) des orages égaux/supérieurs à			
	2,5 mm	5 mm	10 mm	25 mm	2,5 mm	5 mm	10 mm	25 mm
2006	158	81	33	4	6	3	2	1
2007	254	150	75	16	10	7	4	4
2008	246	130	53	8	6	5	2	2
2009	192	100	56	14	6	4	3	2
2010	225	129	56	7	4	4	3	2
2011	173	94	39	9	5	4	3	2
Moyenne	209	115	55	9	6	4	3	2
Maxi.	254	150	75	16	10	7	4	4
Mini.	158	81	33	4	4	3	2	1

14 ÉVALUATION DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

14.1 Climat historique ; tendances observées

On a ici fait appel à des moyennes mobiles et à la régression linéaire pour détecter le changement sur une échelle décennale et à long terme respectivement. Figure 14-1 et la Figure 14-2 montrent les relevés annuels des précipitations et températures à Beyla, Kérouané, Kissidougou, Macenta et Nzérékoré. En général, les registres des relevés sont trop courts pour en tirer des déductions valables sur le changement climatique. On peut toutefois effectuer les observations suivantes.

Le registre des précipitations de Beyla compte deux parties, toutes deux trop courtes pour étayer une tendance à long terme fiable. Le registre des précipitations de Kérouané date de 1956 et, bien qu'il y manque des relevés, il suggère une tendance baissière à long terme des précipitations. C'est ce que suggèrent également les registres plus complets de Kissidougou et de Nzérékoré, qui montrent une tendance baissière des précipitations à long terme des années 1930 à nos jours. La tendance est la plus marquée à Kissidougou, et comparable à celle de Kérouané. Ces observations sont conformes aux conclusions du MEEF (2018), qui a constaté dans le sud-est de la Guinée une diminution des précipitations annuelles de -1,8 % entre les périodes de 1961-1990 et 1981-2010.

Les moyennes mobiles décennales appliquées aux registres pluviométriques indiquent qu'un changement cyclique se déroule sur une échelle décennale, et qu'il existe des similitudes entre les stations. Les périodes de pluies plus abondantes à Beyla vont des années 1930 à la fin des années 1940, et du début au milieu des années 1950. Une période de précipitations plus faibles a commencé à la fin des années 1950, et s'est poursuivie dans les années 1960. Il y a une rupture dans le registre de 1963 à 1981. Les années 1980 semblent avoir été une période de faibles précipitations à Beyla. Toutefois, depuis 1990 environ, les précipitations à Beyla semblent avoir augmenté. Ces régimes se reproduisent à Kissidougou, dont le registre à long terme montre une tendance baissière depuis les années 1960 jusqu'au début des années 1990, année où les précipitations ont augmenté. Ces régimes ont également été observées par Gauthier et al. (1998) et Balme et al. (2006), dont les études ont porté sur une plus vaste région de l'Afrique de l'Ouest. Les cinq premières années du 21^e siècle semblent être une période de pluies croissantes. On peut à l'avenir s'attendre à des cycles pluviométriques.

Les registres annuels des températures à Beyla et Kérouané sont trop incomplets pour indiquer des tendances. Les registres de Nzérékoré et Kissidougou indiquent une tendance haussière progressive à long terme des températures annuelles moyennes, maximums moyennes et minimums moyennes. Les autres facteurs étant égaux, de telles tendances témoigneraient d'une tendance vers une évaporation plus élevée.

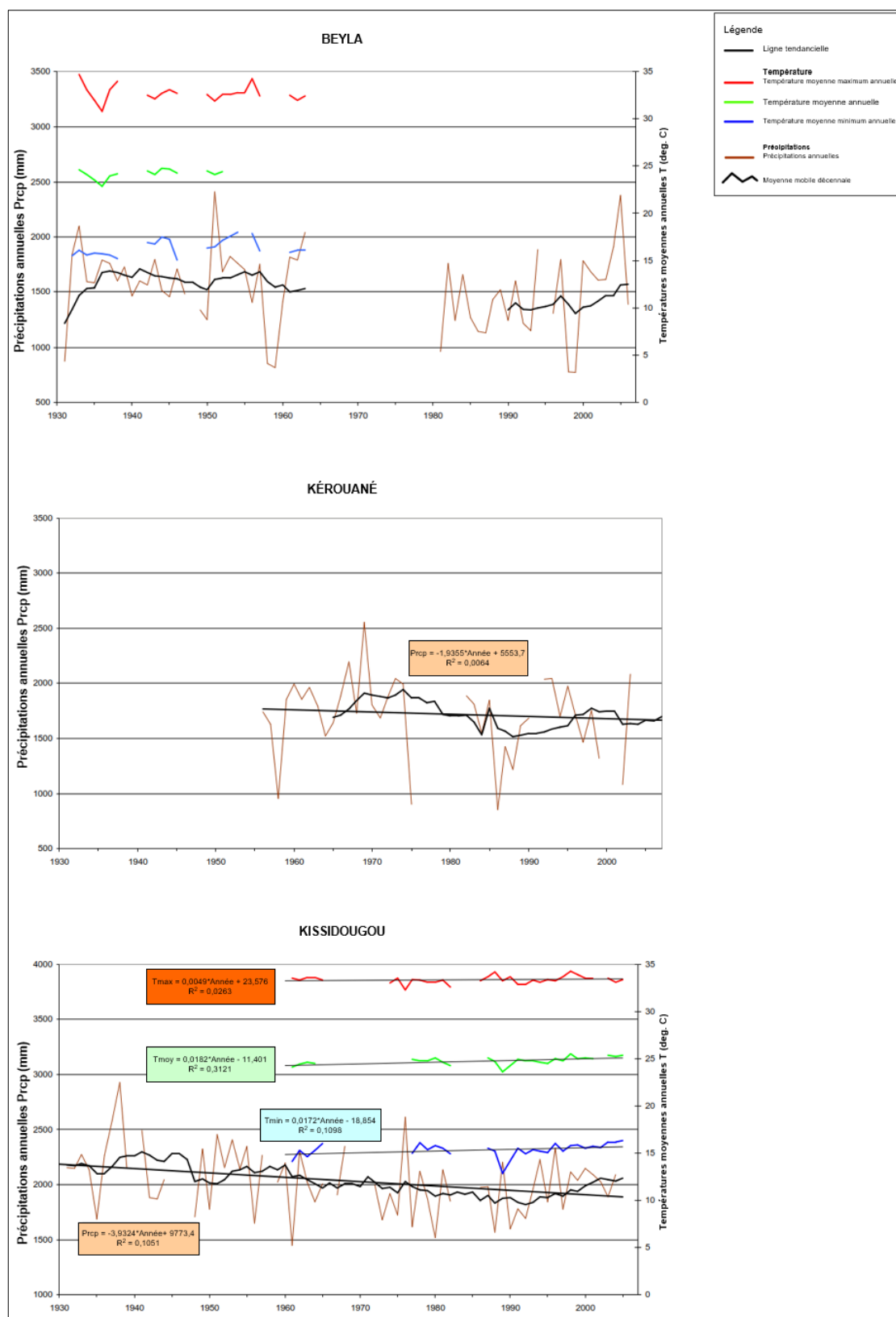


Figure 14-1 : tendances des températures et précipitations en Guinée du sud-est 1

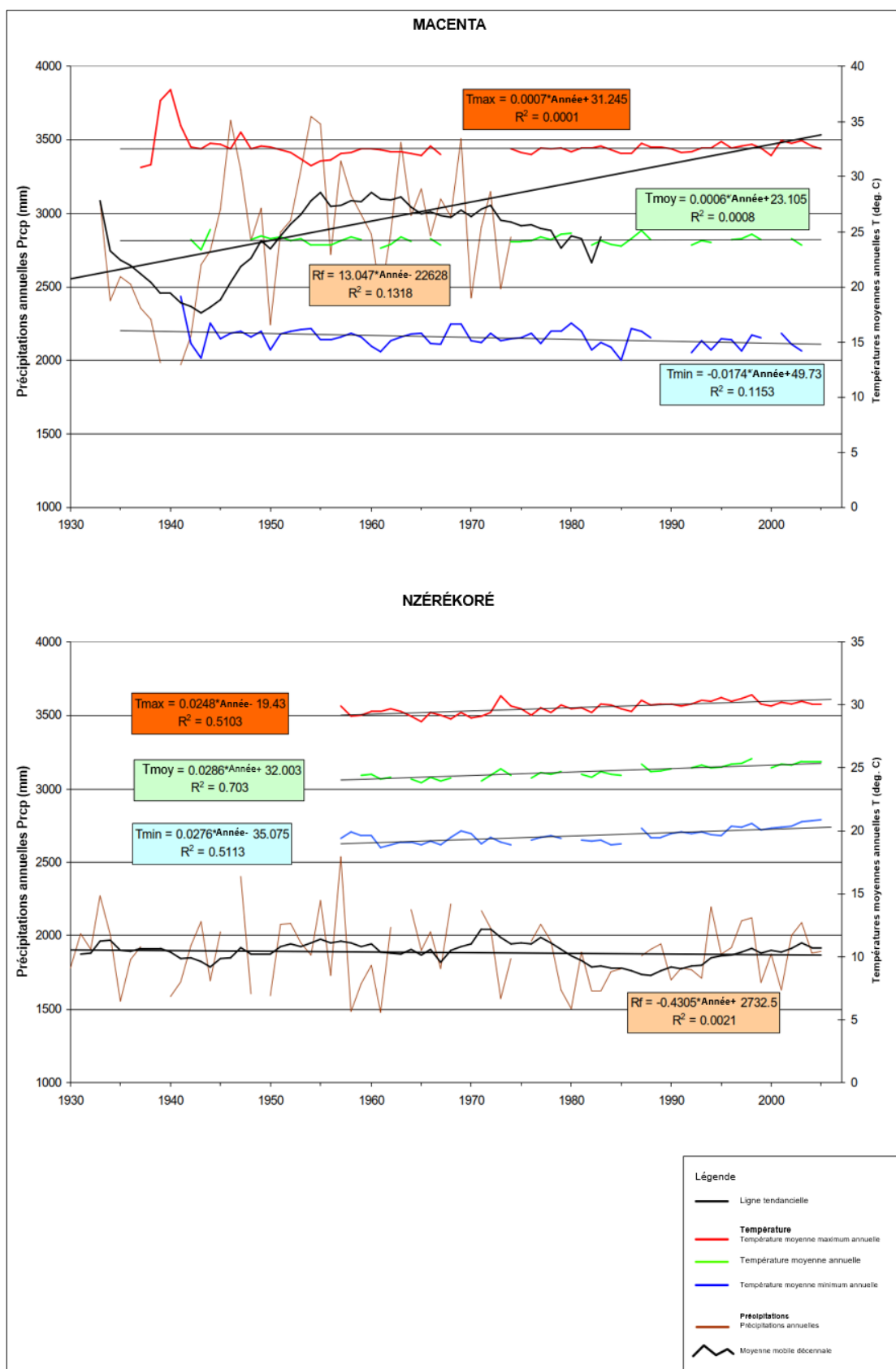


Figure 14-2 : Tendances des températures et précipitations en Guinée du sud-est 2

14.2 Climat historique ; orages brefs, changements multidécennaux

Les modèles climatiques quadrillés (ou réanalyse climatique) sont des modèles climatiques planétaires qui combinent les observations locales disponibles dans les stations météorologiques, les ballons météorologiques et les relevés aéronautiques avec les modèles météorologiques physiques actuels. Généralement, les modèles climatiques quadrillés couvrent le globe entier, de la surface de la Terre jusqu'à bien au-dessus de la stratosphère, des conditions historiques aux conditions actuelles. Comme indicateur à long terme des précipitations du site, on a utilisé les précipitations horaires du modèle climatique quadrillé ERA-5.

Le modèle ERA-5 est la cinquième génération de la réanalyse atmosphérique du climat mondial publiée par le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT, 2021). Le modèle ERA-5 comprend des données infra-journalières de 1950 à aujourd'hui (2021) pour le monde sur la base d'une résolution de $0,25^\circ$ ($\sim 25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$). Même si les informations provenant de l'ERA5 sont géographiquement « grossières » par rapport aux besoins escomptés du site, cette source peut servir d'indicateur des précipitations du site de 1950 à aujourd'hui (2021).

La Figure 14-3 présente les précipitations quotidiennes de périodes de 15 à 20 ans, où on ne peut observer aucun changement apparent de l'amplitude quotidienne des années 1950 aux années 2010.

Dans un examen plus approfondi, la Figure 14-4 montre une IDF étendue pour les orages d'une durée d'une heure à 30 jours/720 heures. Pour les relevés pluviométriques horaires, une analyse de fréquence a été effectuée sur les relevés groupés des périodicités de 2 à 100 ans. Ces courbes IDF atypiques sont exclusivement présentées à titre d'approximation historique (à ne pas utiliser pour la conception du génie civil) ; ces intensités résultantes ont été divisées par périodicité (par graphique carré), et les valeurs sont représentées sous forme de quatre lignes colorées pour les périodes de 1950 à 2020. Ce graphique compare les orages brefs et met en évidence le décalage d'intensité respectif sur des périodes multidécennales.

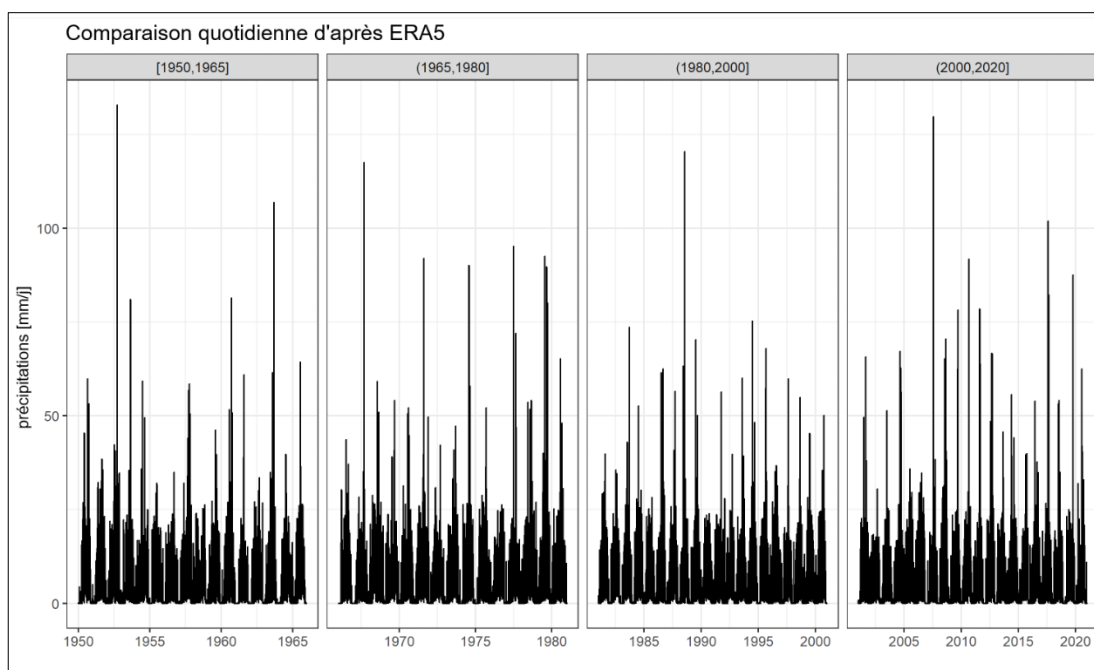


Figure 14-3 : précipitations journalières du site d'après le modèle ERA5 (utilisées comme indicateur) de 1950 à 2020

Sur cette figure, les lignes colorées montrent une concordance sur toutes les périodes, les lignes se superposant, sauf pour la période allant de 1980 à 2000 ; cette période présente en effet des valeurs plus faibles pour les intensités orageuses d'une heure à 30 jours dans la plupart des périodicités. Pour les périodicités plus faibles (de 2 à 10 ans), la plupart des intensités tendent à suivre les mêmes points et lignes, la dispersion augmentant juste sur les périodicités plus élevées (de 50 à 100 ans) et les orages d'une durée dépassant 4 jours (100 heures).

D'après cet examen, la dernière période pluviométrique, de 2000 à 2020, est cohérente et de même ampleur que les autres par le passé, puis les registres pluviométriques de 2000 à 2020 (majorité des relevés du site) peuvent être considérés comme représentatifs du site en termes d'événements historiques à long terme.

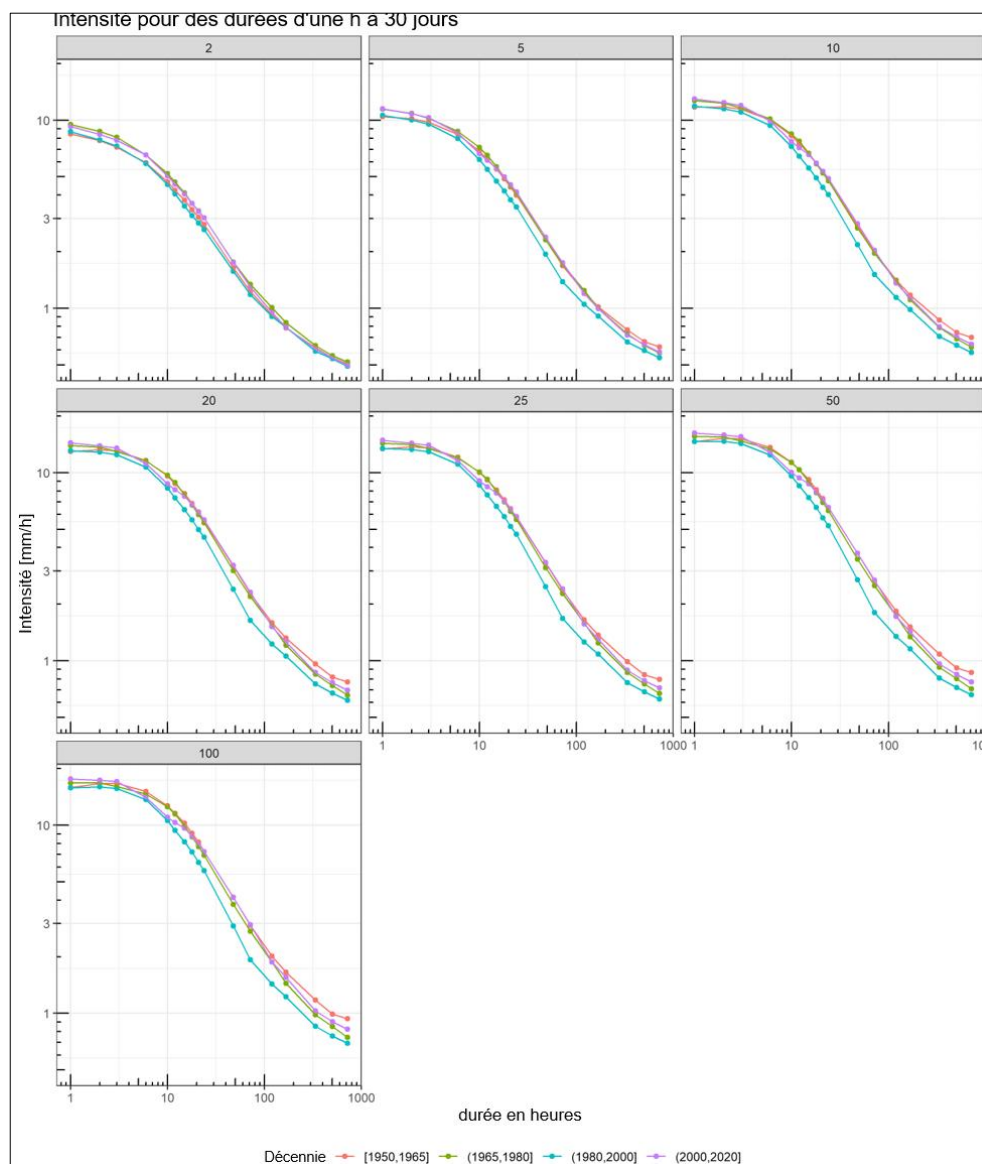


Figure 14-4 : courbes intensité-durée-fréquence d'après le modèle ERA5, informations présentées pour des durées d'une heure à 30 jours (720 h) pour des périodicités de 2 à 100 ans, périodes historiques représentées en lignes colorées.
Graphique à utiliser uniquement pour le contexte historique (ne pas utiliser en conception de génie civil).

14.3 Projections climatiques

Cette section examine les évaluations du changement climatique futur réalisées par le Ministère de l'Environnement, des Eaux et Forêts (MEEF, 2019) guinéen (actuellement Ministère de l'Environnement et du Développement durable) et par Rio Tinto (SRK, 2022).

MEEF (2019) : la stratégie nationale d'adaptation au changement climatique et plan d'action a évalué un ensemble de 40 modèles de circulation globale du CMIP5² et prédit des changements de températures et de précipitations à l'échelle nationale. La Figure 14-5 montre l'anomalie prévue de la température de l'air en Guinée d'ici 2100, et la Figure 14-6 l'anomalie prévue des précipitations annuelles moyennes.

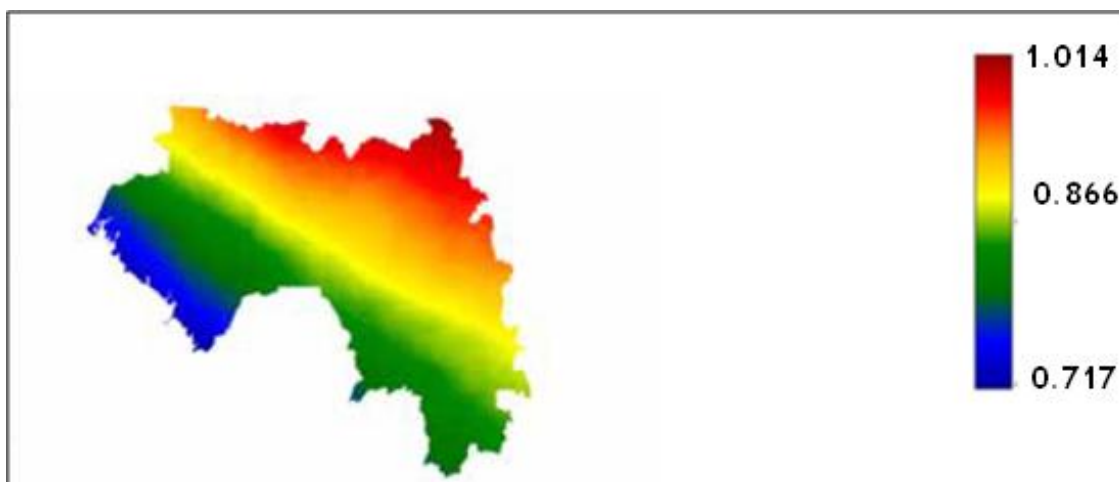


Figure 14-5 : anomalie de la température de l'air (°C) en Guinée d'ici 2100 (MEEF 2019)

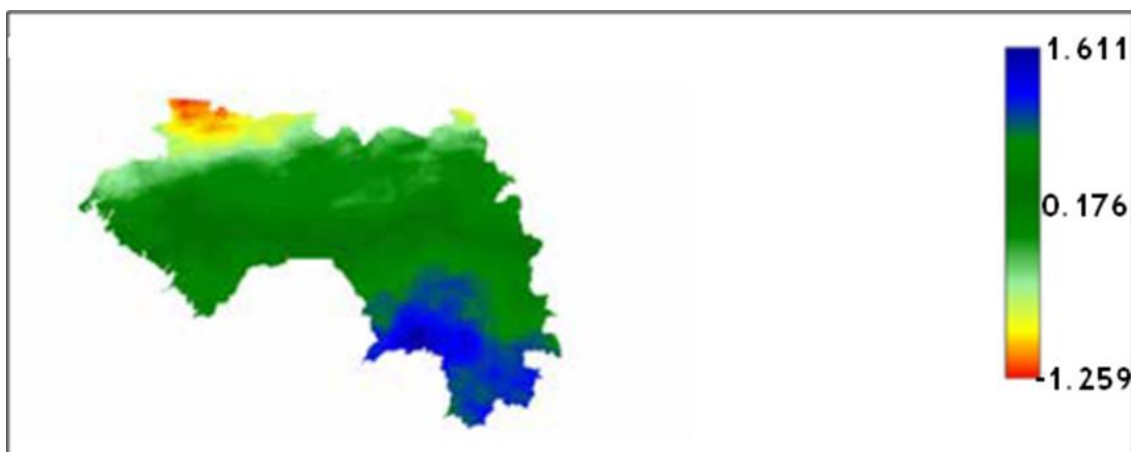


Figure 14-6 : anomalie des précipitations annuelles moyennes (%) pour la Guinée d'ici 2100 (MEEF 2019)

Le Tableau 14-1 présente les anomalies prévues de la température de l'air et des précipitations dues au changement climatique pour le RCP4.5 dans le cadre du CMIP5 pour des périodes allant jusqu'à 2100.

² CMIP5 : projet d'intercomparaison des modèles climatiques 5 dans le cadre du rapport d'évaluation 4 (RE4) du GIEC

Tableau 14-1 : changements prévus à l'échelle nationale de la température de l'air et des précipitations annuelles en Guinée par rapport à la référence de 1961-1990 pour le RCP4.5 (MEEF 2019)

Période	Température de l'air	Précipitations totales
2020	+0,5 à +0,7°C	+0,4 à +0,6 %
2030	+0,7 à +1,0°C	+0,6 à +0,8 %
2050	+1,1 à +1,5°C	+1,3 à +1,6 %
2075	+1,4 à +2,0°C	+1,3 à +1,6 %
2100	+1,4 à +2,0°C	+1,2 à +1,5 %

À l'échelle nationale, d'ici aux années 2030, la température de l'air devrait augmenter de 0,7 à 1,0°C, et les précipitations annuelles de 0,6 à 0,8 %. D'ici 2075, la température de l'air devrait augmenter d'1,4 à 2,0°C, et les précipitations annuelles d'1,3 à 1,6% (MEEF, 2019).

Dans une analyse portant spécifiquement sur la localité de la mine de Simandou et utilisant les informations disponibles dans le sixième rapport d'évaluation (Masson-Demotte et al., 2021) du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), le rendu de 35 modèles climatiques mondiaux (MCM), qui font partie de l'ensemble de données NEX-GDDP de la NASA, a été analysé (SRK, 2022). Les changements futurs ont été évalués pour deux des quatre scénarios d'émissions de gaz à effet de serre de « niveau 1 »³ dits « scénarios socio-économiques partagés » (SSP) : SSP2-4.5 and SSP5-8.5⁴. Deux tranches chronologiques ont été prises en compte : 2021-2049 (les « années 2030 »), pendant que le site de Simandou sera opérationnel, et 2070-2099 (les « années 2080 »), où la mine est susceptible d'en être à ses dernières années d'exploitation et premières années de fermeture. La Figure 14-6 résume les constats de l'évaluation, qui impliquait d'identifier les anomalies ou écarts entre les conditions futures prévues et la période de référence historique modélisée de 1981 à 2014.

³ Le niveau 1 est désigné comme regroupant les scénarios du 21^e siècle, et a été considéré avec la plus haute priorité dans la conception expérimentale dans le cadre des scénarios socio-économiques partagés - profils représentatifs d'évolution de concentration (SSP-RCP) (O'Neill et al., 2016).

⁴ Le scénario SSP2-4.5 représente une trajectoire sociétale mondiale du type « milieu de la route », avec des niveaux d'émissions et de forçage radiatif moyens d'ici la fin du 21^e siècle. Le SSP5-8.5 représente un scénario de développement alimenté par les combustibles fossiles, avec des niveaux d'émissions « en statu quo » et de forçage radiatif relativement élevés d'ici la fin du siècle. La définition des scénarios est expliquée plus en détail dans SRK (2022).

Tableau 14-2 : résumé des prévisions de changement climatique

Facteur climatique	Référence et prévisions fondées sur les scénarios socio-économiques partagés (SSP)	Prévisions des changements de paramètres par rapport à la période de référence (1981-2014)
Précipitations annuelles moyennes (PAM)	Référence : 1981 - 2014 SSP2-4,5 : 2020 - 2049 - 0.2 % SSP5-8,5 : 2020 - 2049 - 0.4 % SSP2-4,5 : 2070 - 2099 - 0.4 % SSP5-8,5 : 2070 - 2099 - 7.5 %	- Années 2030 : changement négligeable des PAM par rapport à la référence historique (MCG médians). - Années 2080 : baisse des PAM de 7,5 % maximum (MCG médians).
Température annuelle moyenne de l'air (TAMA)	Référence : 1981 - 2014 SSP2-4,5 : 2020 - 2049 +0.3 % SSP5-8,5 : 2020 - 2049 +0.7 % SSP2-4,5 : 2070 - 2099 +0.4 % SSP5-8,5 : 2070 - 2099 +1.3 %	- Années 2030 : hausse de la TAMA jusqu'à 0,7 % (ou 2,2°C) par rapport à la référence historique (MCG médians). - Années 2080 : hausse de la TAMA jusqu'à 1,3 % (ou 4,0°C) (MCG médians).
Précipitations quotidiennes maximums pour les phénomènes d'une périodicité décennale*	Référence : 1981 - 2014 SSP2-4,5 : 2020 - 2049 +15 % SSP5-8,5 : 2020 - 2049 +15 % SSP2-4,5 : 2070 - 2099 +20 % SSP5-8,5 : 2070 - 2099 +35 %	- Années 2030 : hausse des précipitations quotidiennes maximums jusqu'à 15%. - Années 2080 : hausse des précipitations quotidiennes maximums jusqu'à 35%.

Source : SRK (2022)

La température annuelle moyenne devrait augmenter jusqu'à 2,2°C (0,7 %) d'ici aux années 2030, et de 4,0°C (1,3 %) d'ici aux années 2080, selon le scénario d'émissions SSP5-8,5. Ces résultats sont globalement conformes à ceux du MEEF (2019).

Les précipitations annuelles moyennes devraient changer de façon négligeable d'ici aux années 2080 selon le scénario SSP2-4.5. Ces résultats sont eux aussi globalement conformes à ceux du MEEF (2019). Selon le scénario d'émissions plus élevées SSP5-8,5, les précipitations devraient diminuer jusqu'à 7,5 % d'ici aux années 2080.

Les précipitations quotidiennes maximums d'une périodicité décennale devraient augmenter jusqu'à 15 % d'ici aux années 2030, et jusqu'à 35 % d'ici aux années 2080, selon le scénario d'émissions SSP5-8.5. Les changements des précipitations orageuses n'ont pas été évalués par le MEEF (2019).

Ces études sont indépendantes des études de modélisation réalisées par le Met Office, qui a étudié l'impact de la réduction de la ligne de crête sur les précipitations locales (section 2.1 et chapitre 9 de l'EISE).

Pour et au nom de SRK Consulting (UK) Limited

Cette signature a été numérisée et l'auteur a autorisé son utilisation pour ce document particulier. La signature originale est conservée dans nos fichiers.

Dylan John
Consultant supérieur (gestion de projet)
SRK Consulting (UK) Limited

Cette signature a été numérisée et l'auteur a autorisé son utilisation pour ce document particulier. La signature originale est conservée dans nos fichiers.

Tony Rex
Consultant d'entreprise (hydrogéologie)
SRK Consulting (UK) Limited

Cette signature a été numérisée et l'auteur a autorisé son utilisation pour ce document particulier. La signature originale est conservée dans nos fichiers.

Victor Muñoz
Consultant principal (génie minier et
hydrotechnique)
SRK Consulting (UK) Limited

Peter Baur
Associé (hydrologue)
SRK Consulting (UK) Limited

Date de parution : 08 août 2022

RÉFÉRENCES

[CEPMET] Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme. 2021. Ensemble de données foncières ERA-5/ERA-5 (janvier 1979 à aujourd'hui). Extrait de <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. et Smith, M. 1998. Évapotranspiration des cultures. Recommandations pour le calcul des besoins hydriques des cultures. Rapport Irrigation et drainage 56, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome.

Balme, M. et al. 2006. Années sèches et années humides au Sahel : quo vadimus ? *Journal des sciences hydrologiques*, 51(2), 254-271.

Barry, A.B. et Sivakumar, M.V.K. 1997. Agroclimatologie de l'Afrique de l'Ouest : La Guinée. Rapport pour la Direction Nationale de la Météorologie, Conakry, par l'Institut International de Recherche sur les Cultures des Zones Tropicales Semi-Arides (ICRISAT) et le Centre Africain pour les Applications de la Météorologie au Développement (ACMAD).

Fullwood, J. 2008. Impact climatologique potentiel de l'exploitation minière dans les collines de Simandou. Phase 1 : mécanismes climatiques actuels. Rapport v0.2 à Water Management Consultants Ltd, 17 mars 2008, Met Office, Exeter, R.-U.

Fullwood, J. 2009. Étude climatologique de la région des collines de Simandou en Guinée. Phase 3 : Étude de modélisation numérique étendue des impacts de l'exploitation minière. Étape 1 : Sélection des études de cas Rapport V1.0 à Water Management Consultants Ltd, 16 février 2009, Met Office, Exeter, R.-U.

Gauthier, F. et al. 1998. Variabilité du régime pluviométrique de l'Afrique de l'Ouest non sahélienne entre 1959 et 1989. *Journal des sciences hydrologiques*, 43(6), 921-935.

Johnson, C. 2010. Collines de Simandou : étude de vérification de la modélisation à haute résolution. Rapport à Rio Tinto Iron Ore Atlantic Ltd (RTIOAL), 15 juillet 2010, Met Office, Exeter, Royaume-Uni.

Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J.B.R., Maycock, T.K., Waterfield, T., Yelekçi, Ö., Yu, R., Zhou, B. (éds.), 2021. Changement climatique 2021 : base de la science physique. Contribution du groupe de travail I au sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Cambridge University Press.

Ministère de l'Environnement, des Eaux et Forêts (MEEF), 2018. Seconde communication nationale à la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques. <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/GUINEA%20-%20SCN-1.pdf>

Ministère de l'Environnement, des Eaux et Forêts (MEEF), 2019. Stratégie nationale sur le changement climatique. <https://meef-guinee.org/wp-content/uploads/2021/05/Strategie-Nationale-sur-le-changement-climatique.pdf>

O'Neill, B.C., Tebaldi, C., van Vuuren, D.P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Lowe, J., Meehl, G.A., Moss, R., Riahi, K., Sanderson, B.M., 2016. Projet d'intercomparaison de modèles de scénarios (ScenarioMIP) du CMIP6. *Élaboration de modèles géoscientifiques* 9, 3461-3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>

Penman, H.L. 1948. Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass. *Proc. R. Soc London, Ser. A*, **193**, 120.

Rio Tinto, 2013. Étude d'impact social et environnemental de Simandou ; mine de Simandou - Volume 1 (février 2013). SIM-1000-G-REF-00001

SRK. 2022a. Évaluation du changement climatique de Simandou. I0016-0400-X-REP-00017_1 à Rio Tinto Iron Ore Atlantic Ltd, août 2022. SRK Consulting, Cardiff, R.-U.

SRK. 2022b. Analyse IDF de Simandou. I0016-0400-X-REP-00016_0 à Rio Tinto Iron Ore Atlantic Ltd, août 2022. SRK Consulting, Cardiff, R.-U.

Vosper, S. et Webster, S. 2008. Impact climatologique potentiel de l'exploitation minière dans les collines de Simandou. Phase 2 : modélisation numérique. Rapport à Water Management Consultants Ltd, 17 mars 2008, Met Office, Exeter, R.-U.

Webster, S., Perry, M., Vosper, S. 2008. Étude climatologique de la région des collines de Simandou en Guinée pour le projet de minerai de fer de Simandou. Phase 3 : étude de modélisation numérique étendue des impacts de l'exploitation minière. Étape 2a : rapport succinct, progrès sur 5 cas. Report V1.0 à Water Management Consultants Ltd, 24 décembre 2008, Met Office, Exeter, Royaume-Uni.

Webster, S., Vosper, S., Perry, M. 2009. Étude climatologique de la région des collines de Simandou en Guinée pour le projet de minerai de fer de Simandou. Phase 3 : étude de modélisation numérique étendue des impacts de l'exploitation minière. Étape 2b : rapport sur les résultats de 10 cas. Rapport V1.0 à Water Management Consultants Ltd, 27 février 2009, Met Office, Exeter, R.-U.

Webster, S., Vosper, S., Perry, M. 2009. Étude climatologique de la région des collines de Simandou en Guinée pour le projet de minerai de fer de Simandou. Phase 3 : étude de modélisation numérique étendue des impacts de l'exploitation minière. Étape 2c : rapport sur les résultats initiaux des essais brefs et mise à jour sur les tests d'une journée. Rapport V3.0 à Water Management Consultants Ltd, 21 mai 2009, Met Office, Exeter, R.-U.

Webster, S., Perry, M., Vosper, S. 2010. Étude climatologique de la région des collines de Simandou en Guinée pour le projet de minerai de fer de Simandou. Phase 3 : étude de modélisation numérique étendue des impacts de l'exploitation minière. Rapport final. Report v1.0 à Schlumberger Water Services, 13 janvier 2010, Met Office, Exeter, Royaume-Uni.

ANNEXE

A RAPPORT D'ÉTUDE DE VÉRIFICATION 2010 DU MET OFFICE

Chaîne de Simandou :

Étude de vérification de la modélisation haute résolution

À l'intention de : Rio Tinto Iron Ore Atlantic (RTIOAL)
Date : 15 juillet 2010
Auteur : Catrina Johnson



Préparé par : Catrina Johnson (Directrice, Scientific Consultancy)

Révisé par : Matthew Perry (Consultant scientifique)

John Fullwood (Consultant scientifique senior)

Autorisation pour émission de : Philip Beauvais (International Mining Business)

Table des matières

1. Introduction.....	2
2. Configuration du modèle	3
3. Vérification.....	4
3.1 Vitesse du vent	6
3.2 Température	10
3.3 Pression.....	14
4. Conclusion.....	16
Références	17

1. Introduction

Le Met Office a été chargé de la réalisation d'une étude climatologique pour le compte de Rio Tinto Iron Ore Atlantic Ltd (RTIOAL). L'objectif global de l'étude est l'évaluation de l'impact potentiel sur la climatologie locale des excavations minières dans la zone du Pic de Fon, dans les collines de Simandou, au sud-est de la Guinée.

La chaîne de Simandou forme une crête aux versants escarpés sur un axe nord-sud, qui franchit la frontière entre la Guinée Forestière humide, au sud, et la Haute Guinée plus sèche, au nord. La crête de Simandou s'étend sur environ 110 km de long et s'élève en moyenne à 1 100 m au-dessus du niveau de la mer (ASL), même si elle ne surplombe que d'environ 400 m le plateau environnant qui se trouve à peu près à 700 m d'altitude. Vers l'extrémité sud de la crête, aux environs du Pic de Fon, l'altitude augmente jusqu'à 1 650 m, environ 600-800 m au-dessus de la plaine environnante.

La 3ème phase de l'étude faisait intervenir des simulations numériques haute résolution d'événements météorologiques locaux dans toute la région de Simandou et la comparaison des résultats obtenus par l'orographie de contrôle (« intacte ») avec ceux obtenus par l'orographie « minière ». Ces résultats ont été présentés à l'atelier de la SFI, en juin 2009. La SFI s'est inquiétée de l'utilisation de ce concept novateur pour modéliser l'impact climatique potentiel d'activités minières et a réclamé d'autres vérifications des résultats du modèle. Ce rapport a l'intention de vérifier les résultats du modèle par rapport aux données enregistrées sur les sites de suivi installés et entretenus par Schlumberger Water Consultants, pour le compte de RTIOAL.

2. Configuration du modèle

Le Met Office Unified Model® (the MetUM) est le modèle de prévision opérationnel utilisé par le Met Office pour produire des prévisions météorologiques numériques au niveau régional et pour l'ensemble de la planète ; c'est le modèle qui a été utilisé pour la 3ème phase de l'étude climatologique. Les simulations numériques ont été réalisées sur des grilles imbriquées, la grille périphérique étant celle de la configuration mondiale du MetUM. Les domaines des zones intérieures délimitées, qui se focalisent progressivement sur la région de Simandou, ont des résolutions horizontales approximatives de 12 km, 4 km, 1 km et 333 m. L'emplacement et l'étendue des domaines intérieurs du modèle sont indiqués à la Figure 1.

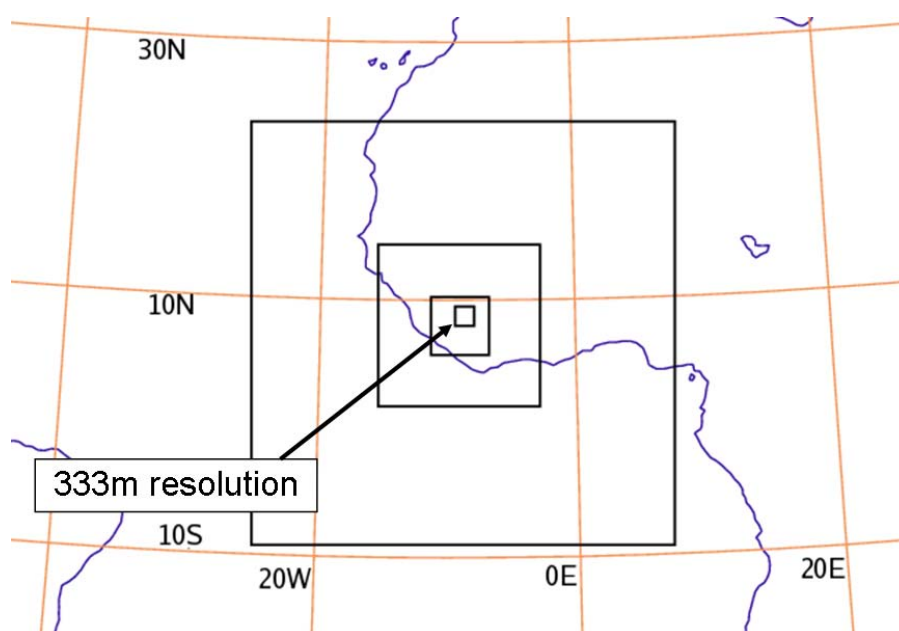


Figure 1 : Étendue et emplacement des domaines intérieurs du modèle. En partant du domaine périphérique, les rectangles montrent les limites des domaines de résolution de 12 km, 4 km, 1 km et 333 m.

Le modèle a été initialisé en utilisant l'analyse du modèle mondial de prévision CEPMMT (ECMWF, en anglais), dont la résolution horizontale est d'environ 30 km. Il importe donc de valider les résultats du modèle pour vérifier qu'il fournit une représentation réaliste de la météorologie locale de Simandou.

Le modèle a été exécuté deux fois pour chaque jour de l'étude de cas, une première fois avec une orographie intacte, et la seconde avec une orographie « minière ». Cette étude évalue la précision des résultats issus de l'exécution du modèle « intact », afin de renforcer la crédibilité du modèle en termes de capacités de simulation adéquate des conditions météorologiques dans toute la zone d'intérêt.

Une description complète de la technique de modélisation utilisée dans la 3ème phase est fournie par Vosper et Webster (2009).

3. Vérification

La Figure 2 montre l'emplacement des stations météo dans la chaîne de Simandou en 2007 et 2008. Les principales stations ayant enregistré tout un éventail de paramètres météorologiques sont Dabatini (1 650 m), Fokou Ouest (810 m), Mafindou (830 m), Mandou (710 m) et Pic de Oueléba (1 330 m). Nous avons également des données provenant de la station de Kérouané (1 450 m), située en dehors de la carte, au nord-ouest. Les observations faites dans ces stations servent à vérifier la précision des résultats obtenus par l'étude de modélisation haute résolution.

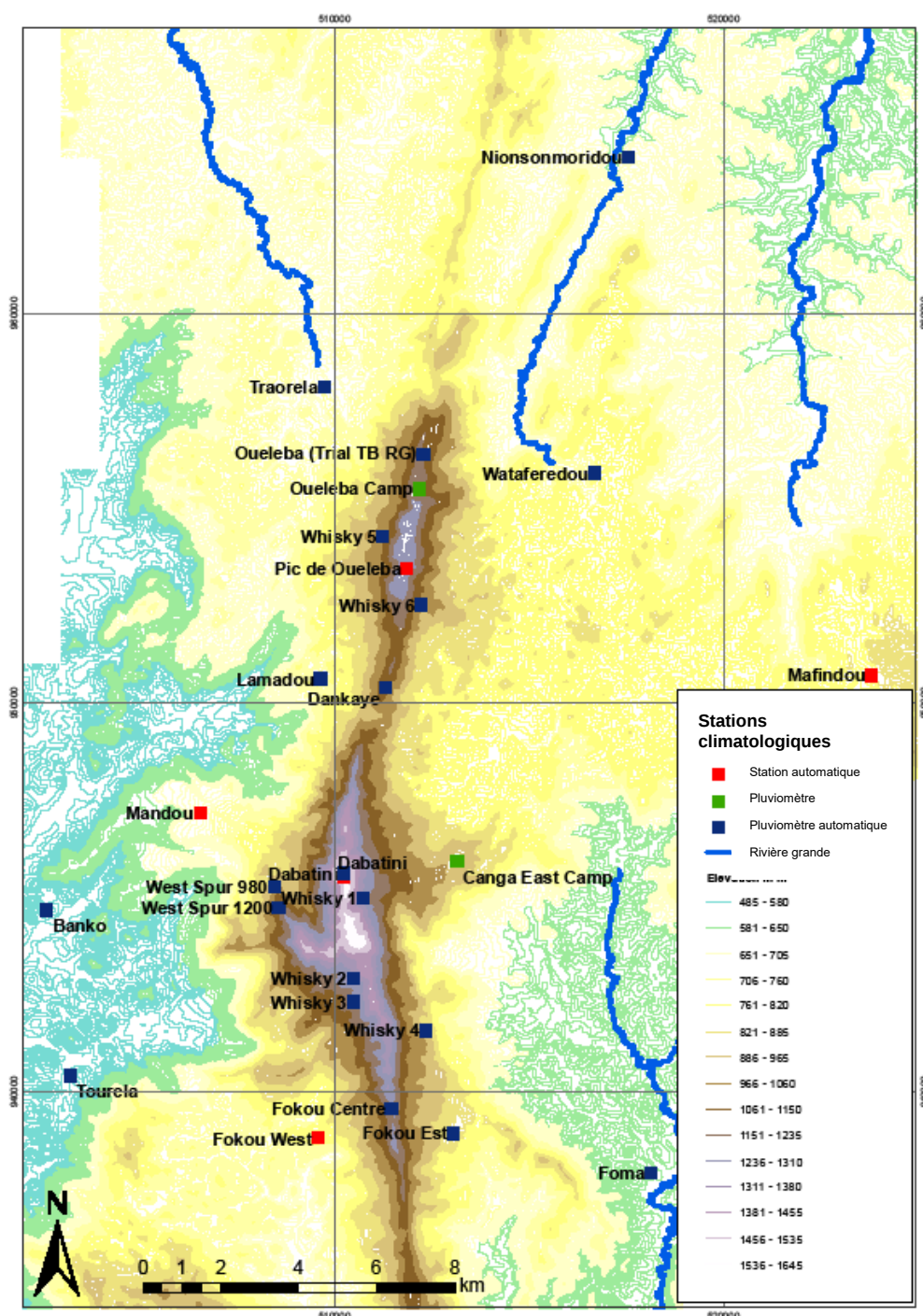


Figure 2 : Carte montrant l'emplacement des stations de suivi météo

Les éléments à l'étude sont la pression, la vitesse du vent et la température. 15 jours d'étude de cas ont été modélisés au total, mais tous les éléments n'étaient pas disponibles pour chaque jour dans chaque station. Le Tableau 1 donne une indication de la disponibilité des données.

Date	Station/Élément																	
	Dabatini			Fokou Ouest			Kérouané			Mafindou			Mandou			Pic de Ouéléba		
	Press.	Vent	Temp.	Press.	Vent	Temp.	Press.	Vent	Temp.	Press.	Vent	Temp.	Press.	Vent	Temp.	Press.	Vent	Temp.
06/05/07	x	x	x	x	x	x	o	x	x	o	o	x	o	o	o	x	x	x
05/08/07	x	o	o	o	o	o	o	o	o	x	o	x	x	o	x	o	o	o
22/09/07	x	o	o	o	o	o	o	o	o	x	o	x	x	o	o	o	o	o
01/12/07	x	o	o	o	o	o	o	o	o		o	x	x	o	x	o	o	o
08/02/08	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
26/02/08	x	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	x	x	o	o	o	o	o
27/02/08	x	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	x	x	o	o	o	o	o
28/02/08	x	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	x	x	o	o	o	o	o
20/10/07	x	o	o	o	o	o	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	o	o
29/07/07	x	o	o	o	o	o	o	o	o	x	o	x	x	o	x	o	o	o
01/02/07	x	x	x	x	x	x	x	x	x	o	o	x	o	o	o	x	x	x
02/07/07	x	x	x	x	x	x	o	o	o	o	o	x	o	o	o	x	x	x
06/06/07	x	x	x	x	x	x	o	x	x	o	o	x	o	o	o	x	x	x
08/08/07	x	o	o	o	o	o	o	o	o	x	o	x	x	o	x	o	o	o
27/10/07	x	o	o	o	o	o	o	o	o	x	o	x	x	o	o	o	o	o

Tableau 1 : Disponibilité des données météo

Le biais (ou différence) a été calculé pour chaque paramètre – vitesse du vent, température et pression atmosphérique - en soustrayant la valeur observée de la valeur modélisée. La moyenne de ces valeurs a ensuite été calculée pour toutes les périodes disponibles à chaque station. Cela a donné une mesure de la différence entre les valeurs observées et les valeurs modélisées pour l'ensemble de la période.

L'écart-type a ensuite été calculé pour les différences entre les valeurs observées et les valeurs modélisées pour chacun des trois paramètres. Il montre l'ampleur de la variation par rapport à la différence « moyenne » (valeur moyenne ou prévue/budgétée). Un écart-type faible indique que les points de données ont tendance à être régulièrement proches de la valeur moyenne, alors qu'un écart-type élevé indique que les données varient fortement et sont réparties sur une gamme de valeurs étendue.

L'erreur quadratique moyenne (RMSE) a été calculée à partir des différences entre les valeurs observées et les valeurs modélisées pour chacun des trois paramètres. La RMSE est donc la racine carrée de la moyenne du carré de la différence (ou erreur). Des RMSE de faible valeur indiquent une meilleure adéquation. La RMSE permet de mesurer la précision de la réponse prévue par le modèle. Elle représente le critère le plus important d'adéquation, si le principal objet de ce modèle repose sur la prévision, ce qui est le cas dans cette étude.

3.1 Vitesse du vent

Globalement, le biais varie sur les six sites, comme le montre le Tableau 2. Les sites de haute altitude (Dabatini, Kérouané et Pic de Ouéléba) présentent un biais négatif, tandis que les sites de basse altitude ont un biais positif. Cependant, les chiffres concordent bien, le biais le plus important étant à Dabatini, où la vitesse moyenne du vent est supérieure de 1,6 m/s dans le modèle par rapport aux observations. Les observations étaient disponibles à intervalles de 30 minutes.

Emplacement	Nombre	Biais (m/s)	Écart -type (m/s)	RMSE (m/s)
Dabatini	423	-1,6	4,3	4,5
Fokou Ouest	423	0,1	1,1	1,1
Kérouané	423	-1,3	5,4	5,6
Mafindou	540	1,0	1,4	1,7
Mandou	539	0,1	1,3	1,3
Pic de Ouéléba	423	-0,6	3,8	3,8

Tableau 2 : Résumé des statistiques des différences de vitesse du vent à 30 minutes d'intervalle entre les observations et la modélisation haute résolution.

La Figure 3 illustre les résultats des observations et de la modélisation dans trois sites de haute altitude pour un jour donné. On peut constater que le modèle a tendance à sous-estimer la vitesse du vent au Pic de Ouéléba et à Dabatini, bien que les chiffres soient mieux alignés en fin de période. Ce n'est pas le cas à Kérouané, où la vitesse du vent est surestimée par le modèle sur quasiment toute la période.

Dans les stations de basse altitude pour la même période (Figure 4), on peut voir que le modèle surestime en général la vitesse du vent, mais avec des écarts plus réduits. C'est ce que montrent les valeurs d'écart-type et d'erreur quadratique moyenne, qui sont plus élevées dans le cas des sites de haute altitude.

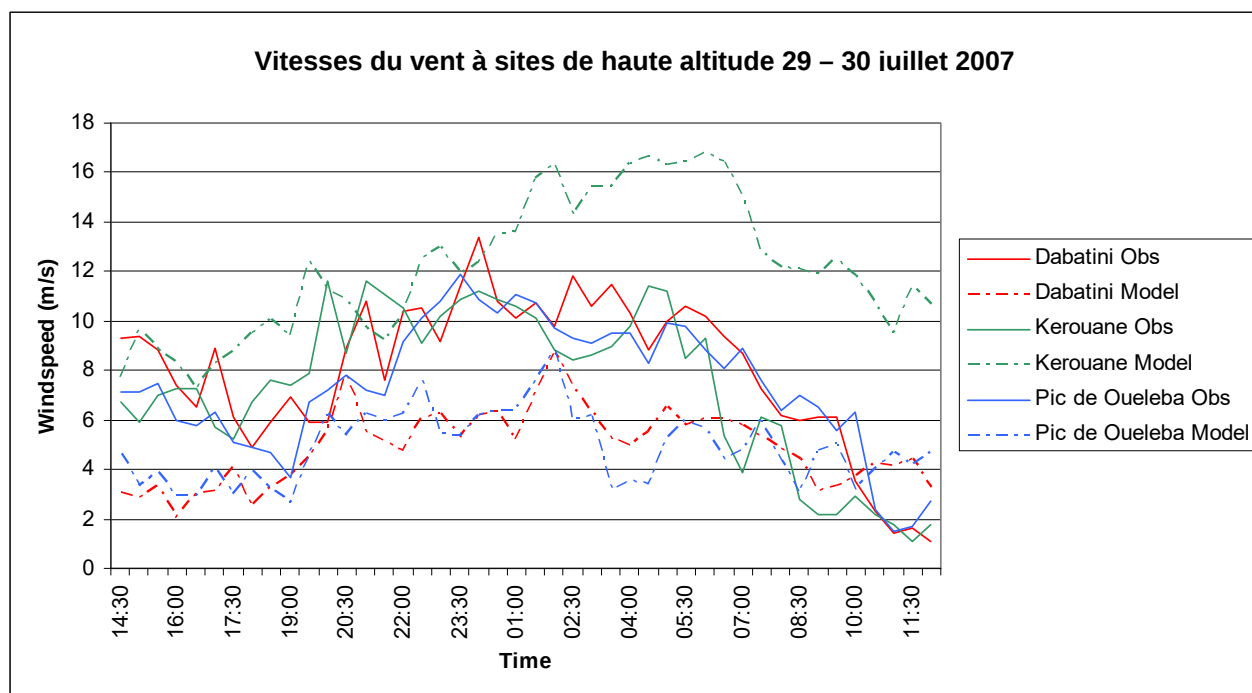


Figure 3 : Comparaison des vitesses du vent du modèle avec les observations des sites de haute altitude, du 29 au 30 juillet 2007.

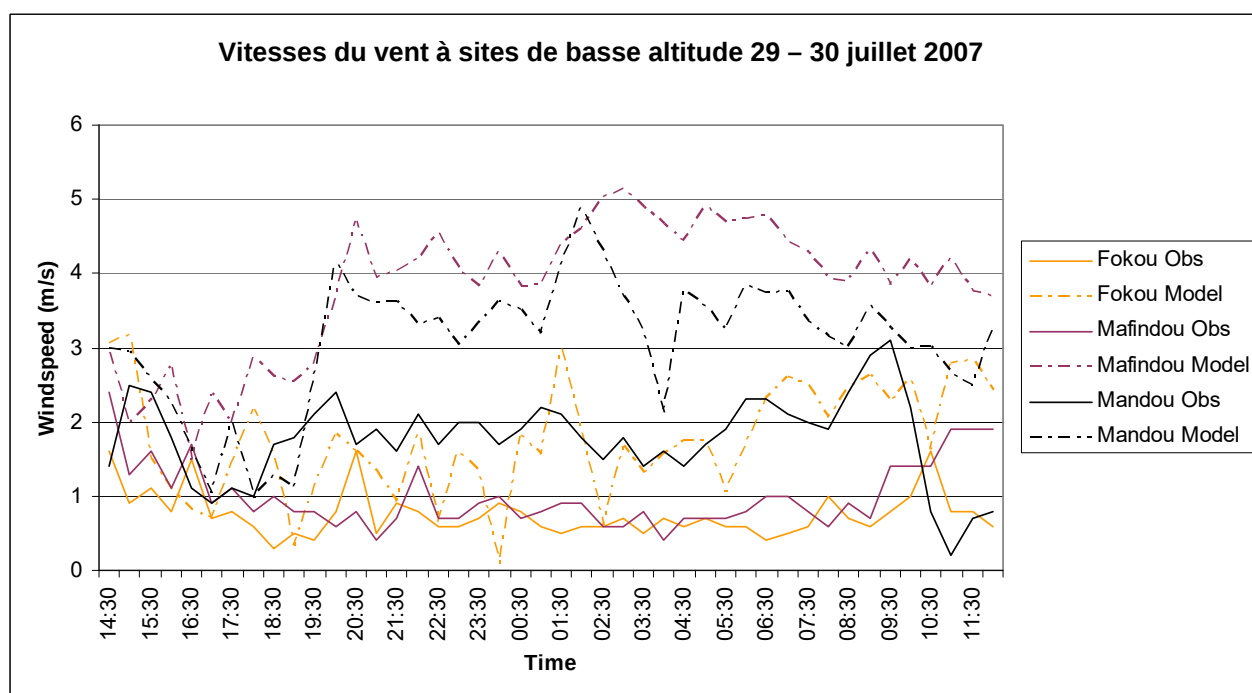


Figure 4 : Comparaison des vitesses du vent du modèle avec les observations des sites de basse altitude, du 29 au 30 juillet 2007.

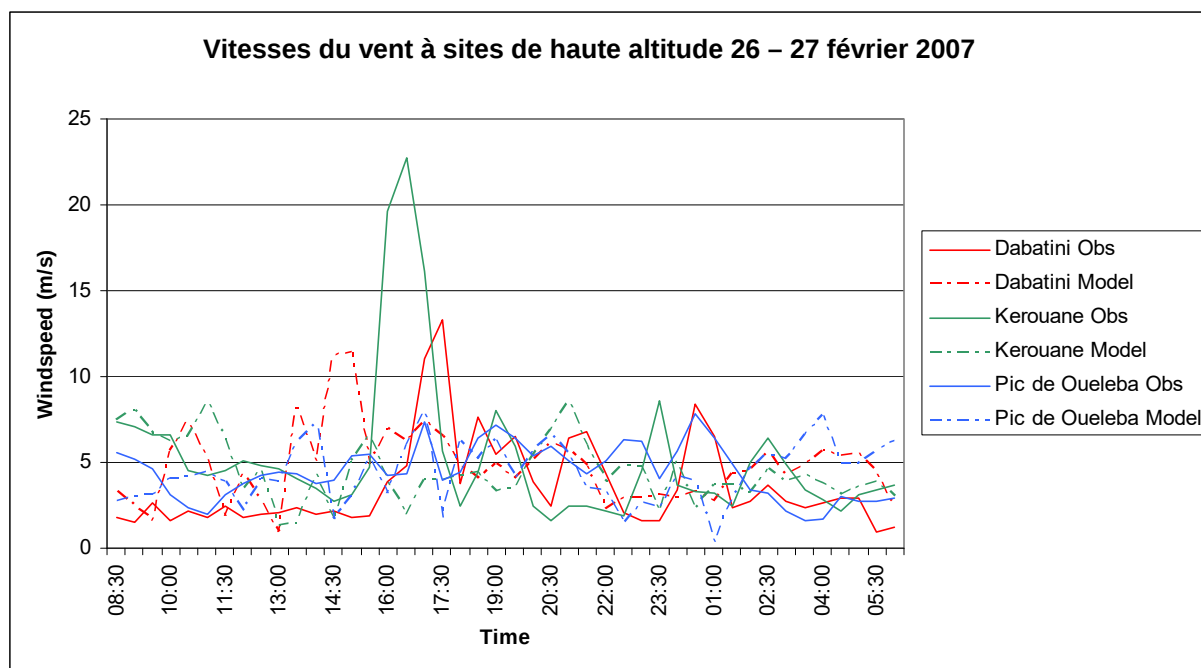


Figure 5 : Comparaison des vitesses du vent du modèle avec les observations des sites de haute altitude, du 26 au 27 février 2008.

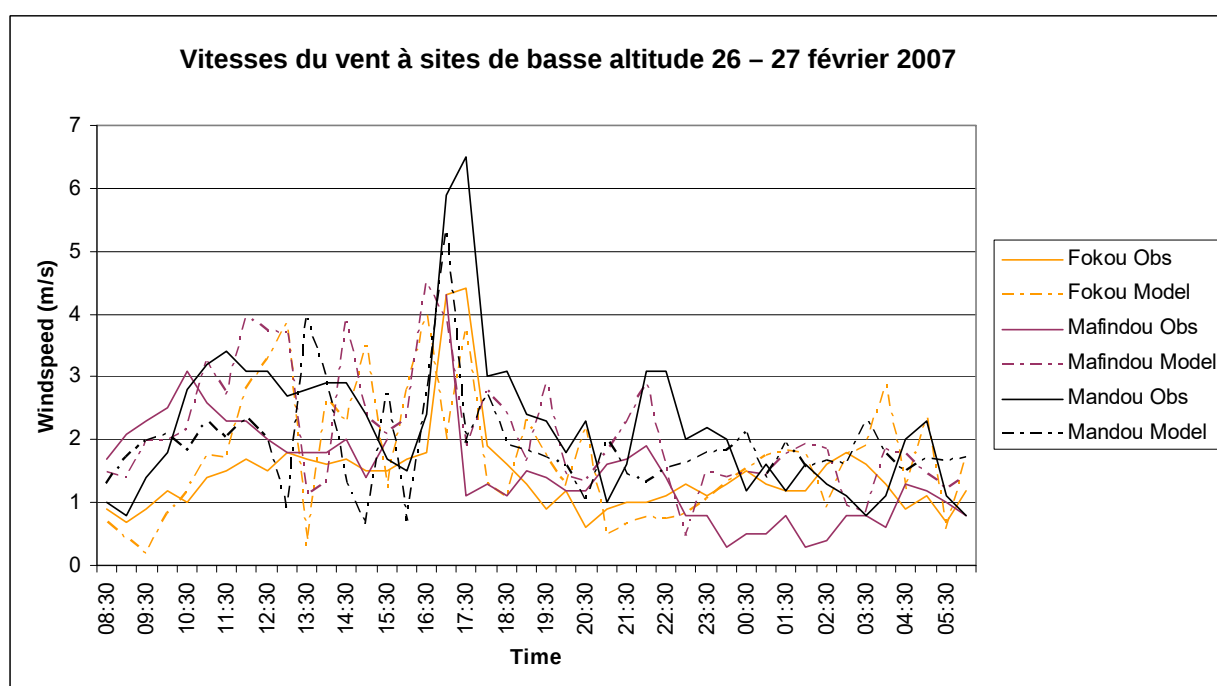


Figure 6 : Comparaison des vitesses du vent du modèle avec les observations des sites de basse altitude, du 26 au 27 février 2008.

Les Figures 5 et 6 montrent les vitesses du vent du modèle et des observations, là encore sur les sites de haute et basse altitudes, mais pour une autre période. Dans ce cas précis, les vitesses du vent dans le modèle se rapprochent plus des valeurs observées, bien qu'on ne retrouve pas le pic de vitesse très élevé du vent à Kérouané dans le modèle.

Vitesses du vent (m/s)	Dabatini		Fokou Ouest		Kérouané		Mafindou		Mandou		Pic de Ouéléba	
	Obs.	Modèle	Obs.	Modèle	Obs.	Modèle	Obs.	Modèle	Obs.	Modèle	Obs.	Modèle
0-2	5,2	5,2	86,8	82,5	4,0	14,2	78,7	51,8	64,0	61,4	12,3	9,5
2-4	17,5	22,2	11,3	16,6	20,6	28,8	20,4	36,7	33,6	35,1	23,7	28,4
4-6	18,4	33,8	1,9	0,7	15,1	11,3	0,9	11,3	1,7	3,5	25,3	31,4
6-8	20,1	21,0	0,0	0,2	18,9	12,8	0,0	0,2	0,5	0,0	15,8	19,8
8-10	14,9	9,5	0,0	0,0	11,8	8,3	0,0	0,0	0,0	0,0	11,8	7,8
> 10	23,9	8,3	0,0	0,0	29,6	24,6	0,0	0,0	0,2	0,0	11,1	3,1

Tableau 3 : Fréquences des vitesses du vent (%), en comparant le modèle et les observations des six sites.

Dans le Tableau 3, on voit que la distribution des vitesses du vent concorde globalement. Le modèle a tendance à sous-représenter les vitesses de vent élevées à Dabatini et au Pic de Ouéléba, qui sont des sites de haute altitude. Pour les sites de basse altitude, comme Fokou Ouest, on a un fort pourcentage de vitesses faibles du vent, dans les observations comme dans le modèle. Ceci renforce la crédibilité du modèle en termes de capacités de simulation satisfaisante des caractéristiques locales, vu la variation des distributions de fréquence sur les six sites.

3.2 Température

Il existe un léger biais des températures atmosphériques dans le modèle par rapport aux observations des six sites, les valeurs du modèle étant légèrement supérieures (Tableau 4).

Emplacement	Nombre	Biais (°C)	Écart-type (°C)	RMSE (°C)
Dabatini	423	0,9	1,8	2,0
Fokou Ouest	423	1,4	2,3	2,7
Kérouané	423	1,4	2,4	2,7
Mafindou	-	-	-	-
Mandou	379	1,5	2,5	2,9
Pic de Oueleba	423	0,1	2,3	2,3

Tableau 4 : Résumé des différences statistiques de température atmosphérique à 30 minutes d'intervalle entre les observations et la modélisation haute résolution.

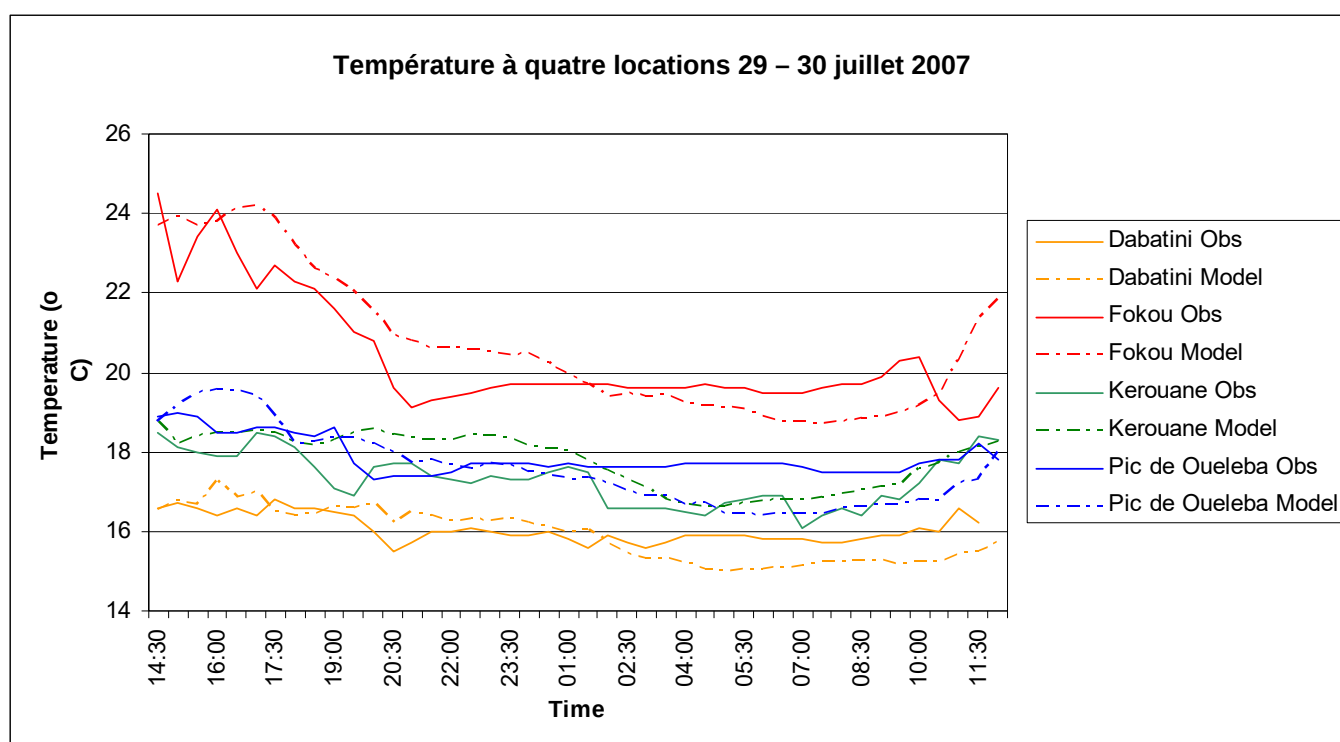


Figure 7 : Comparaison entre les températures du modèle et les observations sur quatre sites, du 29 au 30 juillet 2007.

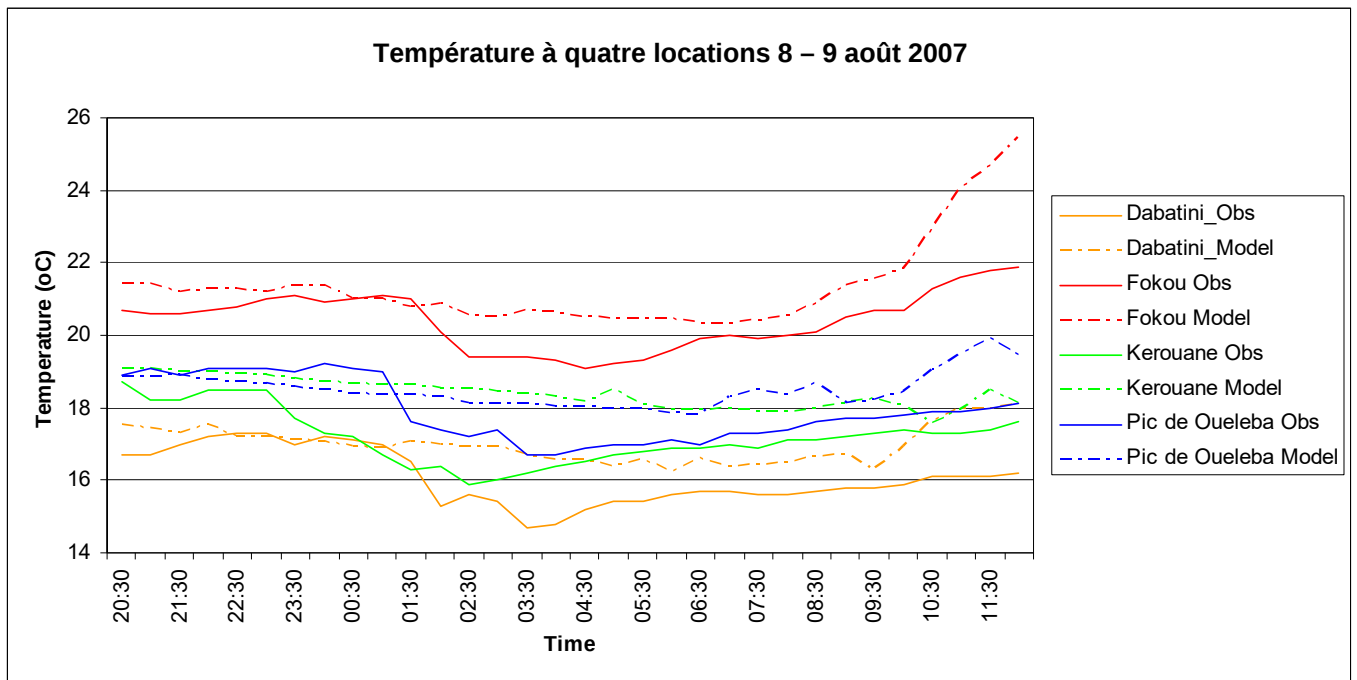


Figure 8 : Comparaison entre les températures du modèle et les observations sur quatre sites, du 8 au 9 août 2007.

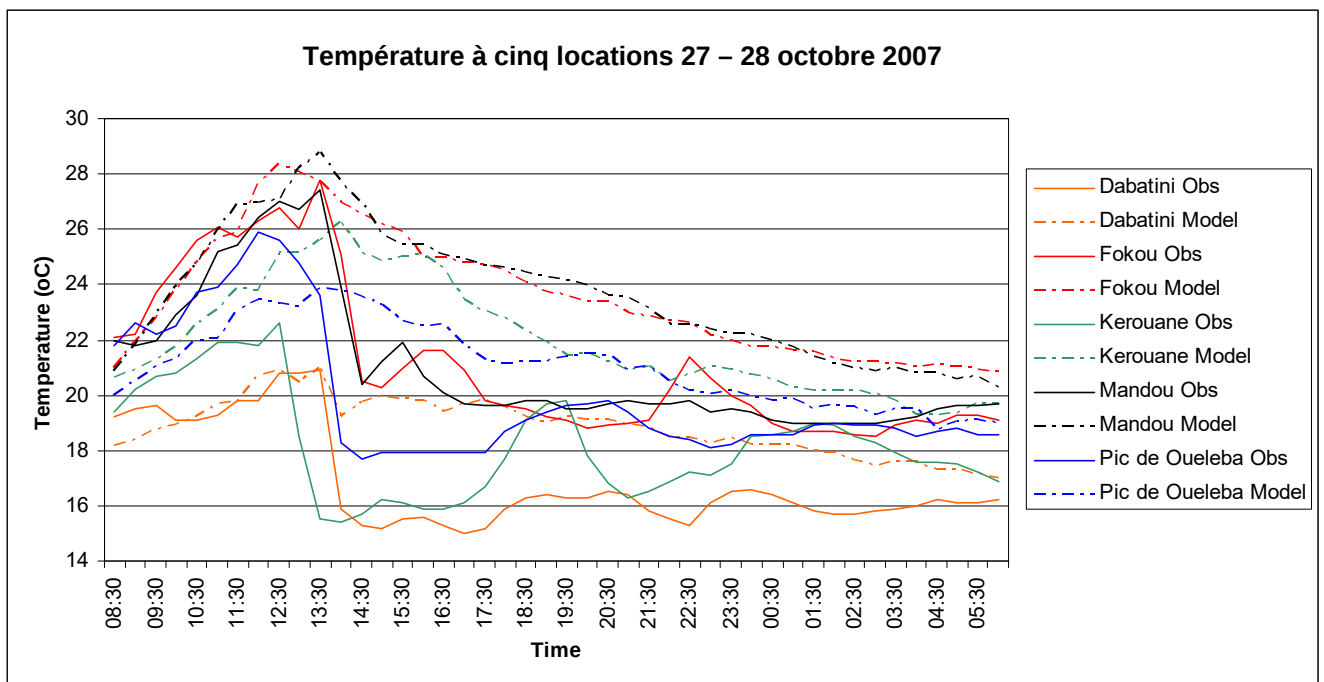


Figure 9 : Comparaison entre les températures du modèle et les observations sur cinq sites, du 27 au 28 octobre 2007.

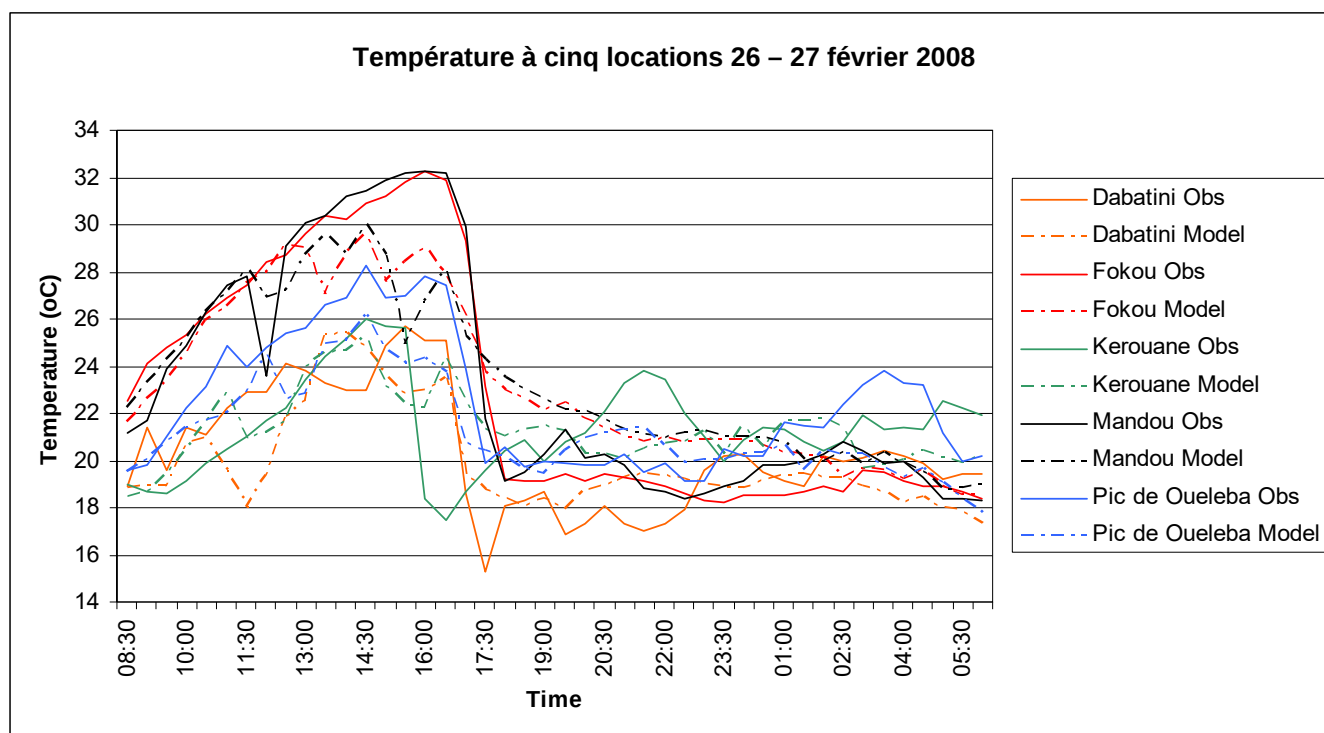


Figure 10 : Comparaison entre les températures du modèle et les observations sur cinq sites, du 26 au 27 février 2008.

Les séries horaires de températures pour quatre études de cas d'un jour sont présentées dans les Figures 7 à 10. Dans la période du 29 au 30 juillet 2007 (Figure 7), les températures observées et celles du modèle concordent étroitement sur les quatre sites pendant toute la période. Le modèle a tendance à légèrement surestimer la température du 8 au 9 août 2007 (Figure 8). Le modèle reproduit correctement la hausse de température dans la matinée du 27 octobre 2007, comme indiqué à la Figure 9. Toutefois, les valeurs modélisées chutent progressivement alors que dans les observations elles chutent brusquement ; les valeurs sont donc surestimées pour la durée de la période restante. La modélisation des pics et des baisses marquées de températures est plus satisfaisante pour la période du 26 au 27 février 2008, comme indiqué dans la Figure 10.

Le modèle a donc tendance à surestimer la température, comme on le voit aux biais positifs en évidence dans le Tableau 4, mais il parvient à reproduire les pics de température.

Gamme de températures (°C)	Dabatini		Fokou Ouest		Kérouané		Mafindou		Mandou		Pic de Ouéléba	
	Obs.	Modèle	Obs.	Modèle	Obs.	Modèle	Obs.	Modèle	Obs.	Modèle	Obs.	Modèle
< 16	30,0	12,8	0,0	0,0	8,0	0,0	-	-	0,0	0,0	0,0	0,5
16-19	47,3	55,8	15,6	2,4	51,1	39,5	-	-	9,0	0,8	44,7	33,3
19-22	18,7	26,9	51,8	45,9	30,7	37,6	-	-	56,7	38,0	32,9	43,8
22-25	3,3	4,0	16,3	28,4	8,5	13,9	-	-	13,5	29,0	14,4	21,5
25-28	0,7	0,5	10,6	13,9	1,7	7,3	-	-	10,5	19,8	7,8	0,9
>28	0,0	0,0	5,7	9,4	0,0	1,7	-	-	10,3	12,4	0,2	0,0

Tableau 5 : Fréquences des températures (%), en comparant le modèle et les observations des six sites.

On observe dans le Tableau 5 que les distributions de températures pour les observations et les valeurs du modèle suivent un schéma très similaire sur les six sites. Les principales différences sont une légère sous-représentation des basses températures et une sur-représentation des températures élevées dans le modèle, en corrélation avec le biais positif. Pour les stations montrant une fréquence élevée de faibles températures observées, comme Dabatini, le modèle présente une distribution similaire. Ceci confirme là encore la capacité du modèle à simuler les variations spatiales sur toute la zone, en prenant en compte les différences d'orographie. C'était la principale différence obtenue par modélisation entre la simulation « intacte » et la simulation « minière » dans l'étude de 3ème phase.

3.3 Pression

Le modèle de pression donnait des résultats à 20 minutes d'intervalle, alors que les observations étaient réalisées une fois par heure ; le nombre de points de vérification était donc inférieur comparé à ceux de la température et de la vitesse du vent.

Il a fallu appliquer un facteur de correction aux données modélisées en sortie, qui correspondaient à la pression au niveau moyen de la mer. Un facteur de réduction de la pression de 1 mbar par hausse de 30 pieds de hauteur a été appliqué (Meteorological Glossary, 1991).

Des petits biais de pression sont manifestes sur la plupart des sites (Tableau 6), les résultats du modèle étant systématiquement inférieurs à ceux des observations. Les écarts légèrement plus importants constatés à Kérouané et au Pic de Ouléba pourraient être dus au facteur de correction et ne pas représenter de différence réelle. C'est ce qu'indique le petit écart-type sur les deux sites, qui laisse également penser que les variations temporelles de pression sont modélisées correctement.

Emplacement	Nombre	Biais (mbar)	Écart -type (mbar)	RMSE (mbar)
Dabatini	-	-	-	-
Fokou Ouest	220	-0,6	0,9	1,1
Kérouané	259	-5,1	1,5	5,3
Mafindou	175	-1,5	1,5	2,1
Mandou	85	-1,8	1,3	2,2
Pic de Oueleba	196	-3,5	1,2	3,3

Tableau 6 : Résumé des différences statistiques de pression entre les observations et la modélisation haute résolution.

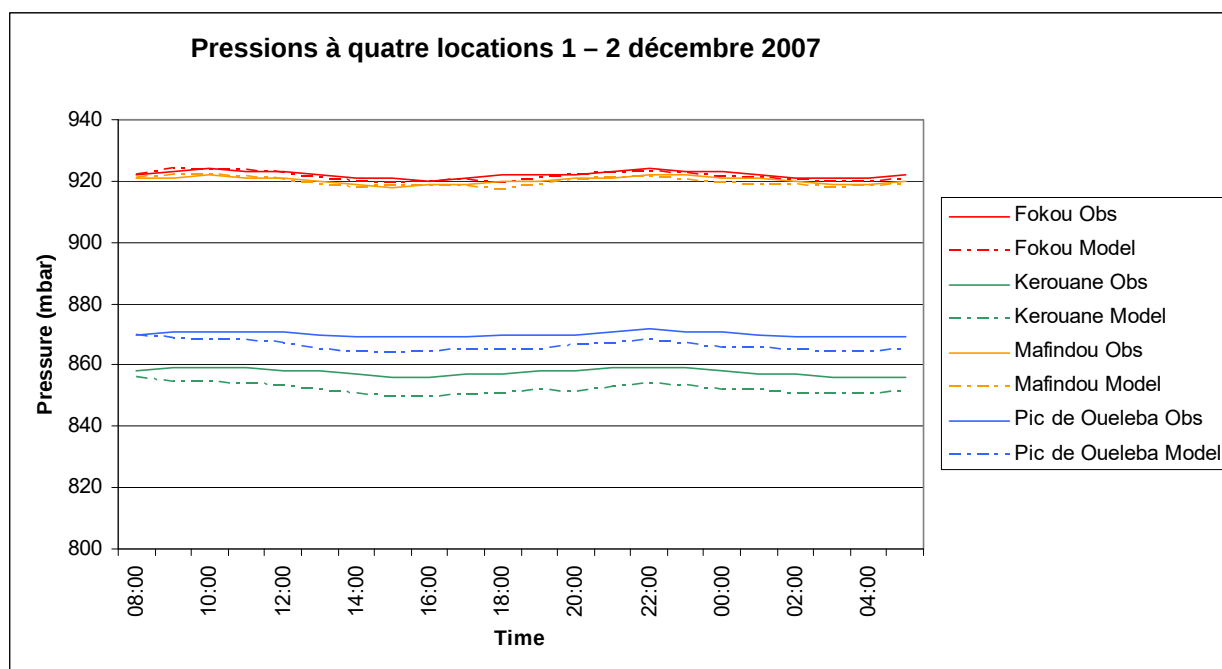


Figure 11 : Comparaison des pressions entre le modèle et les observations de quatre sites, du 1^{er} au 2 décembre 2007

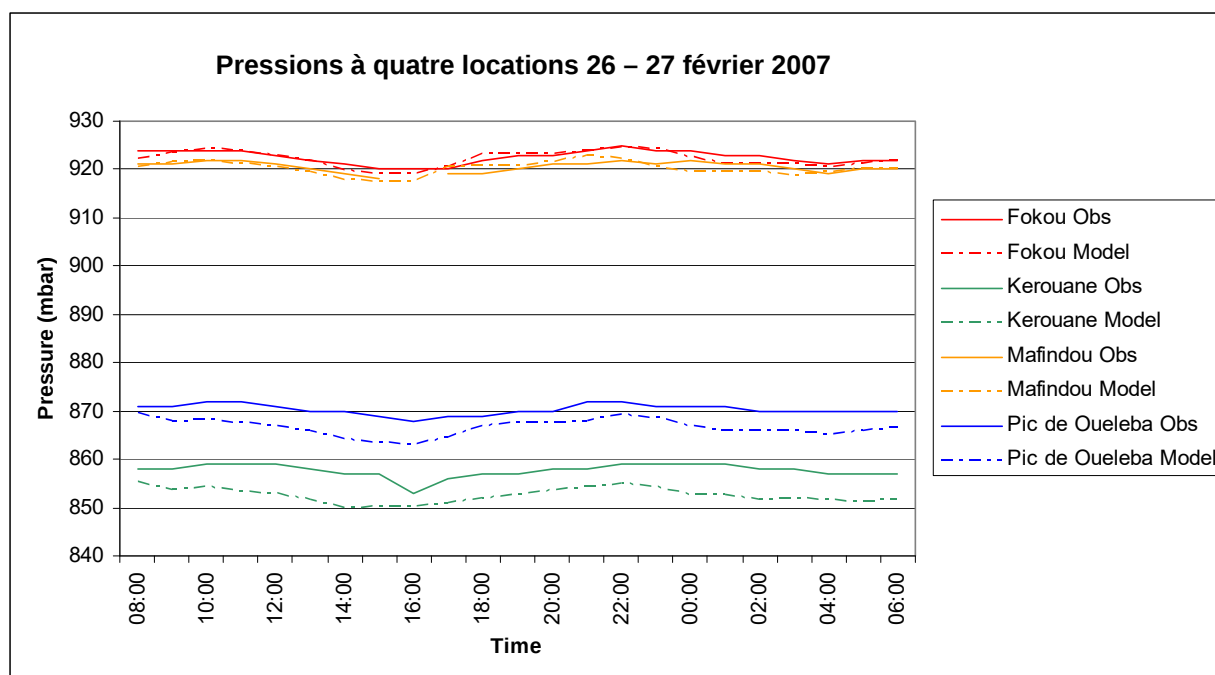


Figure 12 : Comparaison entre les pressions du modèle et les observations de quatre sites, du 26 au 27 février 2008.

La capacité du modèle à simuler la pression est démontrée aux Figures 11 et 12, dans lesquelles on observe que les pressions du modèle et des observations sont très proches à Fokou et à Mafindou. La courbe d'évolution est correctement simulée au Pic de Ouéléba et à Kérouané, ce qui confirme le fait que les différences ne sont probablement pas réelles, mais dues au facteur de correction.

4. Conclusion

L'une des mesures ressortissant de l'atelier de la SFI était la nécessité pour la SFI et Rio Tinto de se mettre d'accord sur une déclaration concernant la précision du modèle et la situation relative à l'étalonnage. Rio Tinto a été chargée de rédiger une déclaration préliminaire. Cette déclaration se basera sur le présent rapport.

Les résultats présentés dans ce rapport illustrent la puissance de la modélisation haute résolution pour la connaissance de la climatologie d'une zone locale. Les variations spatiales dues à la forme unique de l'orographie sont clairement visibles dans les résultats du modèle. Le modèle haute résolution de 333 m est capable de prendre en compte les caractéristiques locales, comme les différences d'altitude entre les six stations de suivi. Les modèles de résolution inférieure, à 1 km ou 4 km, ne permettent pas d'obtenir une précision comparable.

Ces résultats concordent globalement avec l'étude de vérification réalisée pour une étude haute résolution de la baie de Weymouth, R.-U., Perry et al. (2010). Cette étude prouvait les capacités du MetUM en termes de simulation de caractéristiques locales à une résolution fine, au Royaume-Uni.

La vérification des résultats du modèle a été réalisée au moyen d'observations à intervalles d'une heure et d'une demi-heure, dans six stations de la chaîne de Simandou. L'objectif de l'étude principale (3ème phase) était de simuler les conditions météorologiques actuelles et post-minières afin d'évaluer l'impact potentiel des activités minières sur la région. Cette étude a montré que le modèle était capable de simuler correctement les conditions actuelles, avec seulement un petit biais dans la moyenne de la plupart des variables climatiques. Les distributions de fréquence pour la température et la vitesse du vent concordaient généralement sur les six sites. Ceci renforce la crédibilité du modèle en termes de capacités de simulation des changements possibles résultant des activités minières dans la zone, étant donné que le changement majeur interviendra dans les hauteurs de la crête proprement dite.

Références

Meteorological Glossary (1991), Meteorological Office, Met O 985

Perry, M., Wang, C. et Kitchen, K. (2010) : Local Climatology Tool pilot study. High resolution modelling of Weymouth Bay. Met Office, Exeter.

Vosper, S., et Webster, S. (2009) : Étude climatologique de la chaîne de Simandou en Guinée - 3ème phase : Extended Numerical Modelling Study of Potential Impacts of Mining. Rapport du Met Office préparé pour Water Management Consultants.

ANNEXE

B MÉTHODOLOGIE DE L'ETP ET EO

APPENDIX B

Methodology used for estimation of potential evapotranspiration and open water evaporation

1 Calculation of Reference Crop Evapotranspiration (ET_o)

The FAO have adopted the Penman-Monteith combination method as the standard calculation in estimating Reference crop evapotranspiration ET_o. The Penman-Monteith equation includes a number of climatic variables that are calculated from standard climate data.

The equations shown below are those set out in FAO irrigation and drainage paper 56 and have been used in the calculation of ET_o for Simandou. Many of the following equations and descriptions are extracts from the FAO 56 paper (Allen et al, 1998).

Penman-Monteith equation

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

where

- ET_o = reference evapotranspiration [mm day⁻¹]
R_n = net radiation at the crop surface [MJ m⁻² day⁻¹]
G = soil heat flux density [MJ m⁻² day⁻¹]
T = mean daily air temperature at 2 m height [°C]
u₂ = wind speed at 2 m height [m s⁻¹]
e_s = saturation vapour pressure [kPa]
e_a = actual vapour pressure [kPa]
e_s - e_a = saturation vapour pressure deficit [kPa]
Δ = slope vapour pressure curve [kPa °C⁻¹]
γ = psychrometric constant [kPa °C⁻¹].

The reference evapotranspiration, ET_o, provides a standard to which:

- evapotranspiration at different periods of the year or in other regions can be compared
- evapotranspiration of other crops can be related.

The equation uses standard climatological records of solar radiation (sunshine), air temperature, humidity and wind speed. To ensure the integrity of computations, the weather measurements should be made at 2 m (or converted to that height) above an extensive surface of green grass, shading the ground and not short of water.

Psychrometric constant (γ)

The psychrometric constant, γ, is given by:

$$\gamma = \frac{c_p P}{\epsilon \lambda} = 0.665 \times 10^{-3} P$$

where

- γ = psychrometric constant [kPa °C⁻¹]
- P = atmospheric pressure [kPa]
- λ = latent heat of vaporization, 2.45 [MJ kg⁻¹]
- c_p = specific heat at constant pressure, 1.013 10⁻³ [MJ kg⁻¹ °C⁻¹]
- ε = ratio molecular weight of water vapour/dry air = 0.622.

The psychrometric constant is kept constant for each location.

Mean saturation vapour pressure (e_s)

As saturation vapour pressure is related to air temperature, it can be calculated from the air temperature. The relationship is expressed by:

$$e^o(T) = 0.6108 \exp \left[\frac{17.27T}{T + 237.3} \right]$$

where

- $e^o(T)$ = saturation vapour pressure at the air temperature T [kPa]
- T = air temperature [°C]
- $\exp[...]$ = 2.7183 (base of natural logarithm) raised to the power [...].

Due to the non-linearity of the above equation, the mean saturation vapour pressure should be computed as the mean between the saturation vapour pressure at the mean daily maximum and minimum air temperatures for that period:

$$e_s = \frac{e^o(T_{max}) + e^o(T_{min})}{2}$$

Using mean air temperature instead of daily minimum and maximum temperatures results in lower estimates for the mean saturation vapour pressure. The corresponding vapour pressure deficit (a parameter expressing the evaporating power of the atmosphere) will also be smaller and the result will be some underestimation of the reference crop evapotranspiration. Therefore, the mean saturation vapour pressure should be calculated as the mean between the saturation vapour pressure at both the daily maximum and minimum air temperature.

Slope of saturation vapour pressure curve (Δ)

For the calculation of evapotranspiration, the slope of the relationship between saturation vapour pressure and temperature, Δ , is required. The slope of the curve at a given temperature is given by.

$$\Delta = \frac{4098 \left[0.6108 \exp \left(\frac{17.27T}{T + 237.3} \right) \right]}{(T + 237.3)^2}$$

where

- Δ = slope of saturation vapour pressure curve at air temperature T [kPa °C⁻¹]
- T = air temperature [°C]
- $\exp[...]$ = 2.7183 (base of natural logarithm) raised to the power [...].

Actual vapour pressure (e_a) derived from relative humidity data

The actual vapour pressure can also be calculated from the relative humidity. Depending on the availability of the humidity data, different equations should be used.

For $RH_{\max}$ and $RH_{\min}$:

$$e_a = \frac{e^\circ(T_{\min}) \frac{RH_{\max}}{100} + e^\circ(T_{\max}) \frac{RH_{\min}}{100}}{2}$$

where

e_a = actual vapour pressure [kPa]

$e^\circ(T_{\min})$ = saturation vapour pressure at daily minimum temperature [kPa]

$e^\circ(T_{\max})$ = saturation vapour pressure at daily maximum temperature [kPa]

$RH_{\max}$ = maximum relative humidity [%]

$RH_{\min}$ = minimum relative humidity [%].

For periods of a week, ten days or a month, $RH_{\max}$ and $RH_{\min}$ are obtained by dividing the sum of the daily values by the number of days in that period.

Vapour pressure deficit ($e_s - e_a$)

The vapour pressure deficit is the difference between the saturation (e_s) and actual vapour pressure (e_a) for a given time period.

Extraterrestrial radiation for daily periods (R_a)

The extraterrestrial radiation, R_a , for each day of the year and for different latitudes can be estimated from the solar constant, the solar declination and the time of the year by:

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)]$$

where

R_a = extraterrestrial radiation [$\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$]

G_{sc} = solar constant = $0.0820 \text{ MJ m}^{-2} \text{min}^{-1}$

d_r = inverse relative distance Earth-Sun

ω_s = sunset hour angle [rad]

φ = latitude [rad]

δ = solar declination [rad].

Inverse relative distance Earth-Sun (d_r)

$$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi J}{365}\right)$$

where

J = number of the day in the year between 1 (1 January) and 365 or 366 (31 December).

Solar declination (δ)

$$\delta = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi}{365}J - 1.39\right)$$

The sunset hour angle (ω_s)

$$\omega_s = \arccos [-\tan(\varphi) \tan(\delta)]$$

where

φ = latitude [rad]

δ = solar declination [rad].

Daylight hours (N)

The daylight hours, N , are given by:

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s$$

where ω_s is the sunset hour angle in radians

Solar radiation (R_s) (Solar radiation is measured at Simandou)

If the solar radiation, R_s , is not measured, it can be calculated with the Angstrom formula which relates solar radiation to extraterrestrial radiation and relative sunshine duration:

$$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N}\right) R_a$$

where

R_s = solar or shortwave radiation [$\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$]

n = actual duration of sunshine [hour]

N = maximum possible duration of sunshine or daylight hours [hour]

n/N = relative sunshine duration [-]

R_a = extraterrestrial radiation [$\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$]

a_s = regression constant, expressing the fraction of extraterrestrial radiation reaching the earth on overcast days ($n = 0$)

$a_s + b_s$ = fraction of extraterrestrial radiation reaching the earth on clear days ($n = N$).

Where no actual solar radiation data are available and no calibration has been carried out for improved a_s and b_s parameters, the values $a_s = 0.25$ and $b_s = 0.50$ are recommended.

Clear-sky solar radiation (R_{so})

The calculation of the clear-sky radiation, R_{so} , when $n = N$, is required for computing net longwave radiation.

- For near sea level or when calibrated values for a_s and b_s are available:

$$R_{so} = (a_s + b_s) R_a$$

where

R_{so} = clear-sky solar radiation [$\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$]
 $a_s + b_s$ = fraction of extraterrestrial radiation reaching the earth on clear-sky days ($n = N$).

• When calibrated values for a_s and b_s are not available:

$$R_{so} = (0.75 + 2 \cdot 10^{-5} z) R_a$$

where z = station elevation above sea level [m].

Net solar or net shortwave radiation (R_{ns})

The net shortwave radiation resulting from the balance between incoming and reflected solar radiation is given by:

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s$$

where

R_{ns} = net solar or shortwave radiation [$\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$]

α = albedo or canopy reflection coefficient, which is 0.23 for the hypothetical grass reference crop [dimensionless]

R_s = the incoming solar radiation [$\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$].

Net longwave radiation (R_{nl})

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{\max, K}^4 + T_{\min, K}^4}{2} \right] \left(0.34 - 0.14 \sqrt{e_a} \right) \left(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right)$$

where

R_{nl} = net outgoing longwave radiation [$\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$]
 σ = Stefan-Boltzmann constant [$4.903 \cdot 10^{-9} \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$]
 $T_{\max, K}$ = maximum absolute temperature during the 24-hour period [$K = ^\circ\text{C} + 273.16$]
 $T_{\min, K}$ = minimum absolute temperature during the 24-hour period [$K = ^\circ\text{C} + 273.16$]
 e_a = actual vapour pressure [kPa]
 R_s/R_{so} = relative shortwave radiation (limited to ≤ 1.0)
 R_s = measured or calculated solar radiation [$\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$]
 R_{so} = calculated clear-sky radiation [$\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$].

Net radiation (R_n)

The net radiation (R_n) is the difference between the incoming net shortwave radiation (R_{ns}) and the outgoing net longwave radiation (R_{nl}):

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

Soil heat flux (G)

$$G = c_s \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta t} \Delta z$$

where

- G = soil heat flux [$\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$]
- c_s = soil heat capacity [$\text{MJ m}^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$]
- T_i = air temperature at time i [$^\circ\text{C}$]
- T_{i-1} = air temperature at time i-1 [$^\circ\text{C}$]
- Δt = length of time interval [day]
- Δz = effective soil depth [m].

For day and ten-day periods:

As the magnitude of the day or ten-day soil heat flux beneath the grass reference surface is relatively small, it may be ignored and thus:

$$G_{\text{day}} \approx 0$$

2 Calculation of Open Water Evaporation (E_o)

Penman derived the so-called 'combination' equation (due to the combination of an energy balance and aerodynamic formula) that can be used to provide estimates of evaporation from an open water surface of assumed limitless extent (Penman, 1948).

Penman (1948) equation (E_o)

$$E_o = \frac{\Delta(R_n - G) / \lambda + \gamma E_a}{\Delta + \gamma}$$

where

- E_o = open water evaporation rate (mm d^{-1})
- Δ = slope of saturation vapour pressure curve at air temperature T [$\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$]
- R_n = net radiation (W/m^2)
- γ = psychrometric constant [$\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$]
- λ = latent heat of vaporization, 2.45 [MJ kg^{-1}]
- E_a = isothermal evaporation rate (mm d^{-1}).

Isothermal evaporation rate (E_a)

$$E_a = \frac{\frac{\varepsilon p_a}{P} 86,400(e^o - e_a)}{r_a}$$

where

- E_a = Isothermal evaporation rate (mm d^{-1})
- ε = mole fraction of water in air (0.622)
- p_a = density of moist air (kg/m^3)

P = atmospheric pressure in kPa
 $(e^o - e_a)$ = vapour pressure deficit (kPa)
 r_a = aerodynamic diffusion resistance (s/m).

Aerodynamic diffusion resistance (r_a)

$$r_a = \frac{208}{U_z}$$

where

r_a = Aerodynamic diffusion resistance (s/m)
 U_z = wind speed at the measurement height z above the surface (m/s).

3 References

Allen RG , Pereira LS, Raes D, Smith M 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper 56, Food and Agriculture of the United Nations, Rome.

Penman H L 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc. London, Ser. A* **193** 120

ANNEXE

C ÉTUDE QUADRILLÉE DES PRÉCIPITATIONS

APPROACHES TO GRIDDED RAINFALL DATASET GENERATION AT SIMANDOU

C.1 INTRODUCTION

SRK Consulting (UK) Limited (SRK) has investigated approaches to generating a representative gridded rainfall dataset for the Simandou mine site in Guinea. The aim was to generate a dataset for use in historic and predictive surface and groundwater modelling, and rainfall inputs to the hydraulic modelling of the Upper Miya catchment.

This memorandum reviews the site data used in the analysis and then presents the approaches (correlation with physiographic parameters, cluster analysis and climate model datasets) that were investigated in order to develop a gridded precipitation dataset for the project area. The limitations of each method are discussed that led to the adoption of the alternative approach (which is described in the Climate Baseline reports).

C.2 Available Information

The site rainfall data used in this analysis was collected at 28 stations across the project area - 6 automatic weather stations (AWS), 10 manual rain gauges (MRG) and 12 automatic rain gauges (ARG). The position of all monitoring stations used in the analysis is displayed in Figure C1.

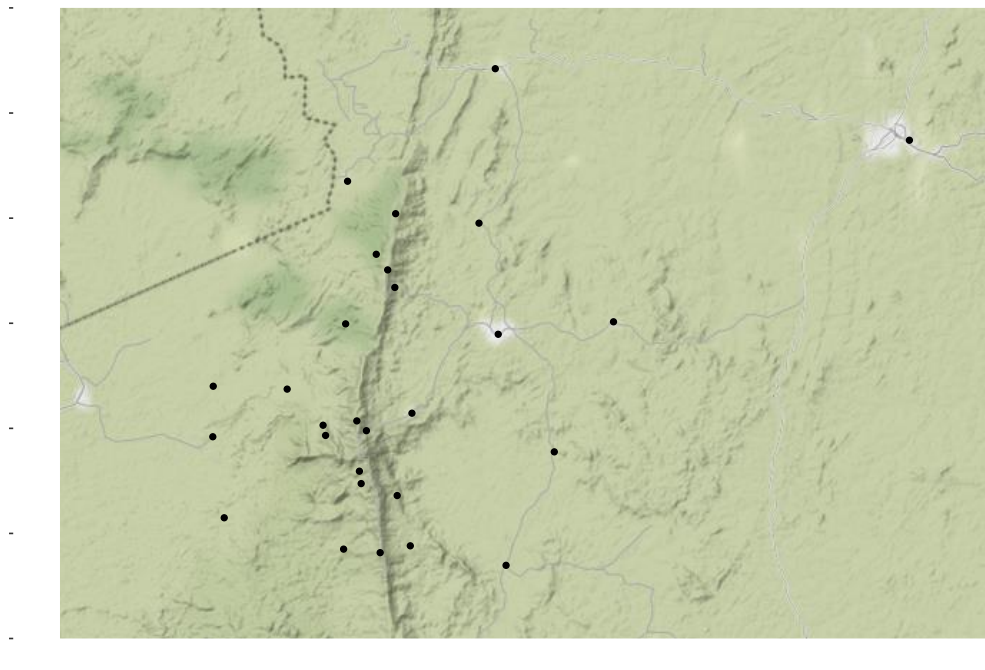


Figure C1: Geographical Location of Simandou Climate Monitoring Stations

The completeness of site records is variable between monitoring stations. Records are available from 1981 to 2014, depending on station (Figure C 2). However, the most complete station data sets are available between the years of 2007 to 2012 (Figure C3). For the purpose of the analysis described herein, data in the range of 2007 to 2012 was used.

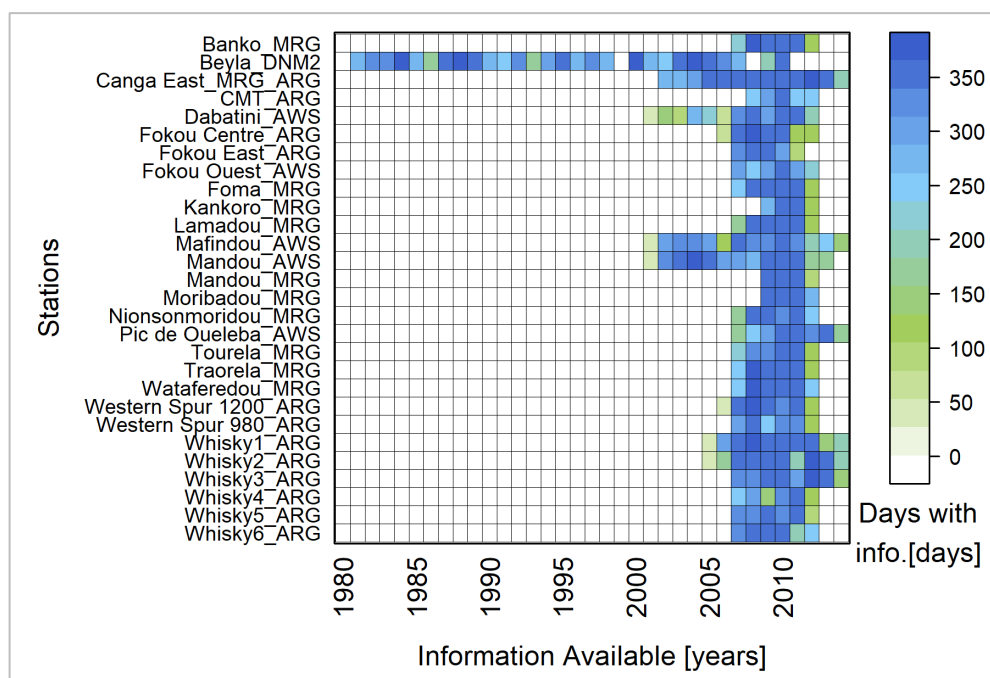


Figure C 2: Total Available Site Data for Simandou Climate Analysis



Figure C3: Site Rainfall Data– 2007 to 2012

C.3 Review and Analysis of geographic Parameters

C.3.1 Parameter Review

Initially, correlations were sought between mean annual rainfall at each station and a number of physiographic variables, as these could be useful for generating a gridded dataset. Nine general parameters were obtained to describe each monitoring station. These parameters were complemented with parameters associated with the geographic and topographic position of the stations; these parameters are described in Table C 1 and Table C 2 respectively.

Table C 1: Geographical Parameter Summary

Name	Summary	Description
Ann	Mean annual precipitation	Yearly average precipitation depth (in mm) for all available site records
X	Longitude	The East-West position of a point of interest in degrees
Y	Latitude	The North-South position of a point of interest in degrees
Elev	Elevation	The elevation of a point of interest in meters above sea level
Coast	Distance to coastline	Straight-line distance (in km) from closest point on the Atlantic coastline to the point of interest
Slope	Slope	Slope of ground at a point of interest based on Shuttle Radar Topography Mission data
Aspect	Aspect	The compass direction (azimuth) that a terrain surface faces, based on Shuttle Radar Topography Mission data
TWI	Topographic wetness index	A quantifiable metric that describes the impact of upstream contributing slope and slope at a point of interest on hydrologic processes.
Ann_adj	Adjusted mean annual precipitation	Yearly average precipitation depth (in mm) for site records in the date range of 2007 to 2012

Table C 2: Simandou Ridge Parameter Summary

Name	Summary	Description
Ridge_bear	Bearing angle from a point of interest to the ridge	The angular direction from a point of interest to the nearest point on the ridge.
Ridge_distance	Distance from a point of interest to the ridge	The absolute distance from a point of interest to the nearest point on the ridge.
Ridge_dist_bear	Relative distance from a point of interest to the ridge	Relative distance from a point of interest to the nearest point on the ridge, where distance to the East is negative and distance to the West is positive.

For parameters in Table C 2, which are dependent on ridge geography, a definition of the ridge alignment was created using topographical data from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). The ridge definition is presented in Figure C4, where black points represent the highest point on the ridge for the given resolution and blue points represent monitoring station

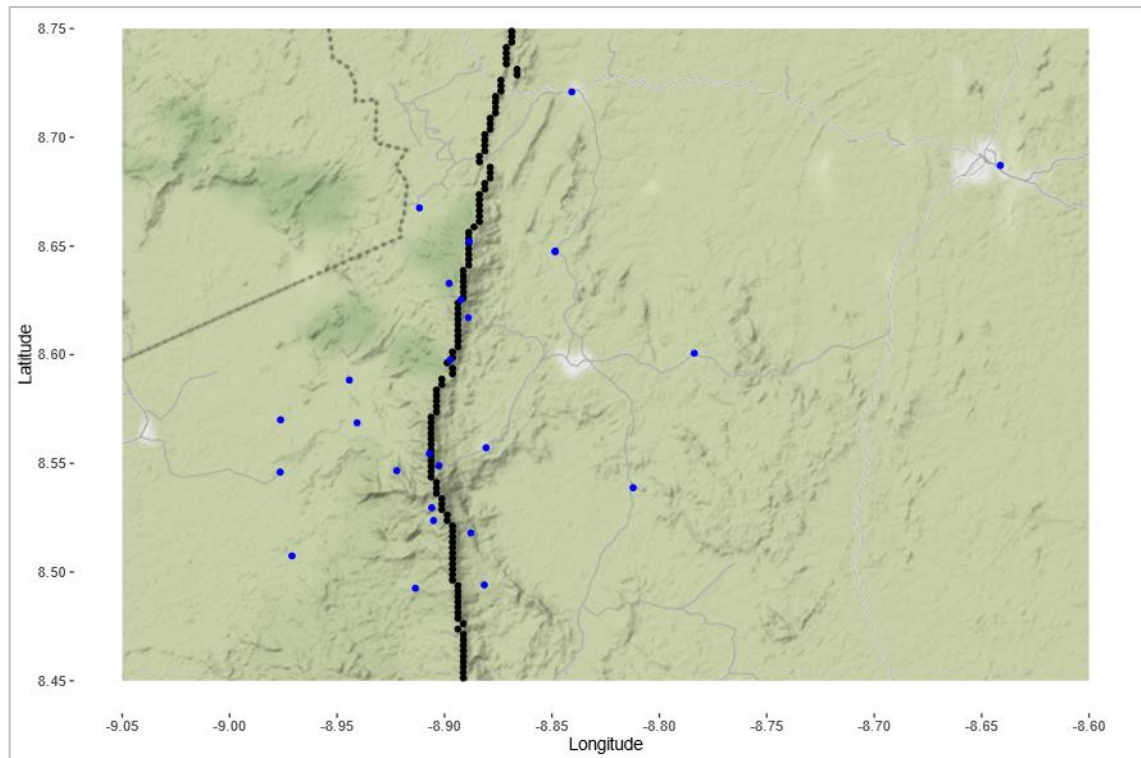


Figure C4: Simandou Ridge Definition (Black) relative to Monitoring Stations of interest (Blue)

C.3.2 Correlation of Parameters

Site data was compared in a correlation matrix to identify patterns between the adjusted mean annual precipitation (Ann_adj) and other parameters. The resultant correlation matrix is presented in Figure C5. The coefficient of determination (R^2) values for comparison of Ann_adj to other parameters generally identify moderate correlation ($R^2 = 0.4 - 0.6$). Notable exceptions include an R^2 value of 0.33 for correlation between Ann_adj and Aspect, which signifies low correlation. Additionally, it should be noted that the exceptionally high R^2 value of 0.99 for correlation between Ann_adj and Ann is caused because the data in Ann_adj is a subset of the data in Ann. Therefore, the 0.99 R^2 value is of little practical significance.

Correlations between mean annual precipitation and Longitude were strongest ($R = 0.64$ in orange squares), followed by other parameters with similar geographical significance as distance from coast ($R = 0.61$, or ridge_distance_bear with $R=0.62$). The correlation between mean annual precipitation and Latitude ($R = 0.46$) is weaker but the overall pattern of declining annual rainfall from south-west to north-east is evident. By contrast the correlation between elevation and rainfall ($R = 0.41$ in purple squares) is relatively weak. Whilst this is partly due to the dominance of the south-west to north-east regional rainfall pattern, further interrogation of the data indicated that unexplained local scale variations in rainfall were also a strong influence.

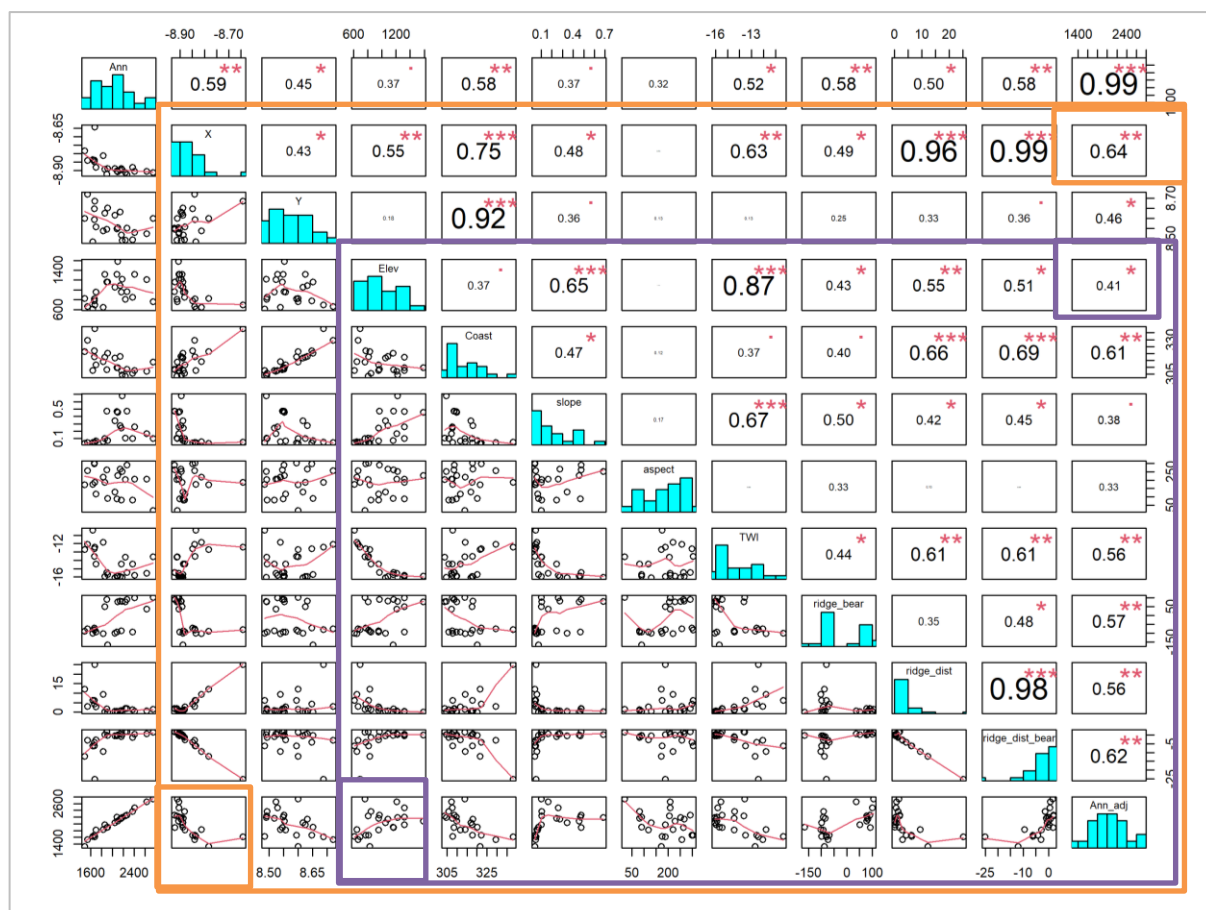


Figure C5: Correlation Matrix for Local Parameters

It was concluded that a representative gridded rainfall dataset could not be generated on the basis of the correlations which were established.

C.4 Cluster Analysis

C.4.1 Clustering methodology

Cluster analysis was investigated as a possible technique for generating a representative gridded rainfall dataset. Unsupervised learning techniques were implemented to categorize the monitoring stations into clusters based on similarity in terms of the parameters listed in Table C 1 and Table C 2. The Kmeans algorithm was used to identify and sort the stations into clusters. The Kmeans algorithm is a machine learning algorithm which uses an iterative approach to group data points into K distinct clusters based on their similarities in terms of given parameters. The Kmeans algorithm approximates the position of cluster centroids and assigns data points to each centroid such that the Euclidean distance between the clustered points and the centroid is minimized, while the distance between other clusters is maximized. The algorithm then optimizes the position of the cluster centroids across many iterations until moving its location no longer minimizes distance within clusters and maximizes distance between clusters.

Differing K values were tested in the range of 2 to 20. The sum of squares for different numbers of clusters is presented in Figure C6.

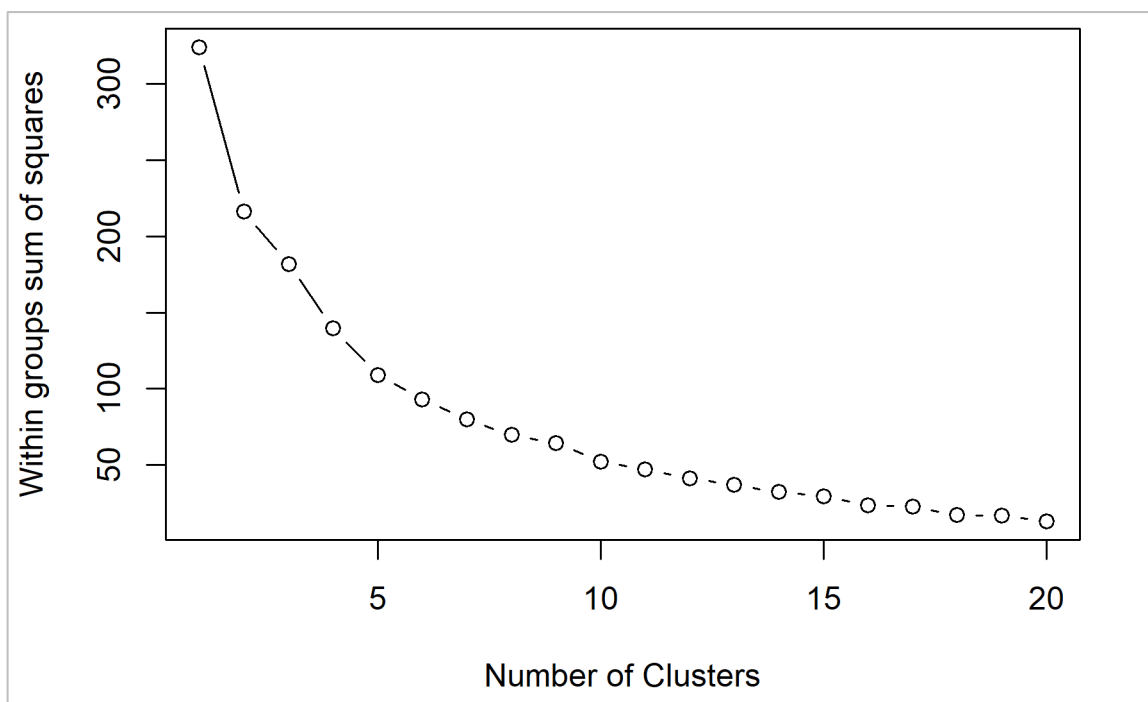


Figure C6: Effect of Number of Clusters on Sum of Squares

As the number of clusters increases, the sum of squares logarithmically decreases. If the graph in Figure C6 were to continue to include all 28 monitoring stations, the sum of squares would reach zero, and the effects of clustering would no longer hold significance. For this reason, the number of clusters was chosen to be 3, such that there is significant enough variation between clusters for meaningful analysis. The resultant cluster groups are presented in Figure C7.

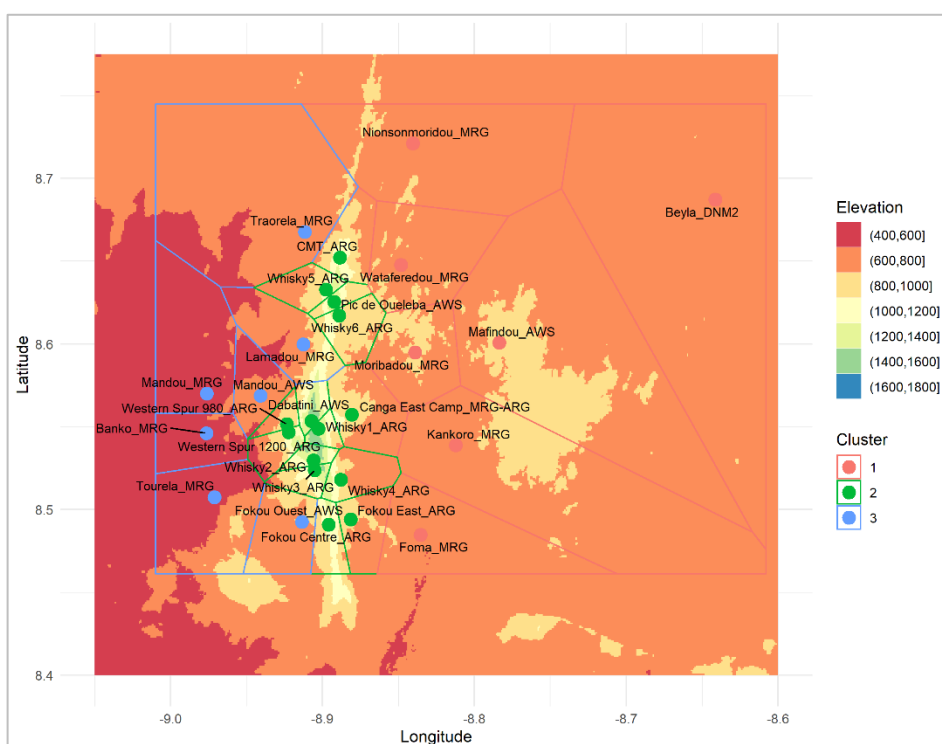


Figure C7: Monitoring Stations Categorized in 3 Cluster Groups

Following the mean annual precipitation clustering associated to monitoring station (as points), the geospatial extents of the map surrounding the mine site were categorized into Voronoi polygons around each station. The general procedure for Voronoi generation is that a separating boundary is developed equidistant between points at an angle orthogonal to a straight line which links the points. The Voronoi boundaries for the monitoring stations at the mine site are present in Figure C7.

The generated Voronoi areas were then assigned to one of the three clusters, sorted into the same cluster as the monitoring station within the extent of the given Voronoi area. The result of the Voronoi cluster assignment is presented in Figure C8.

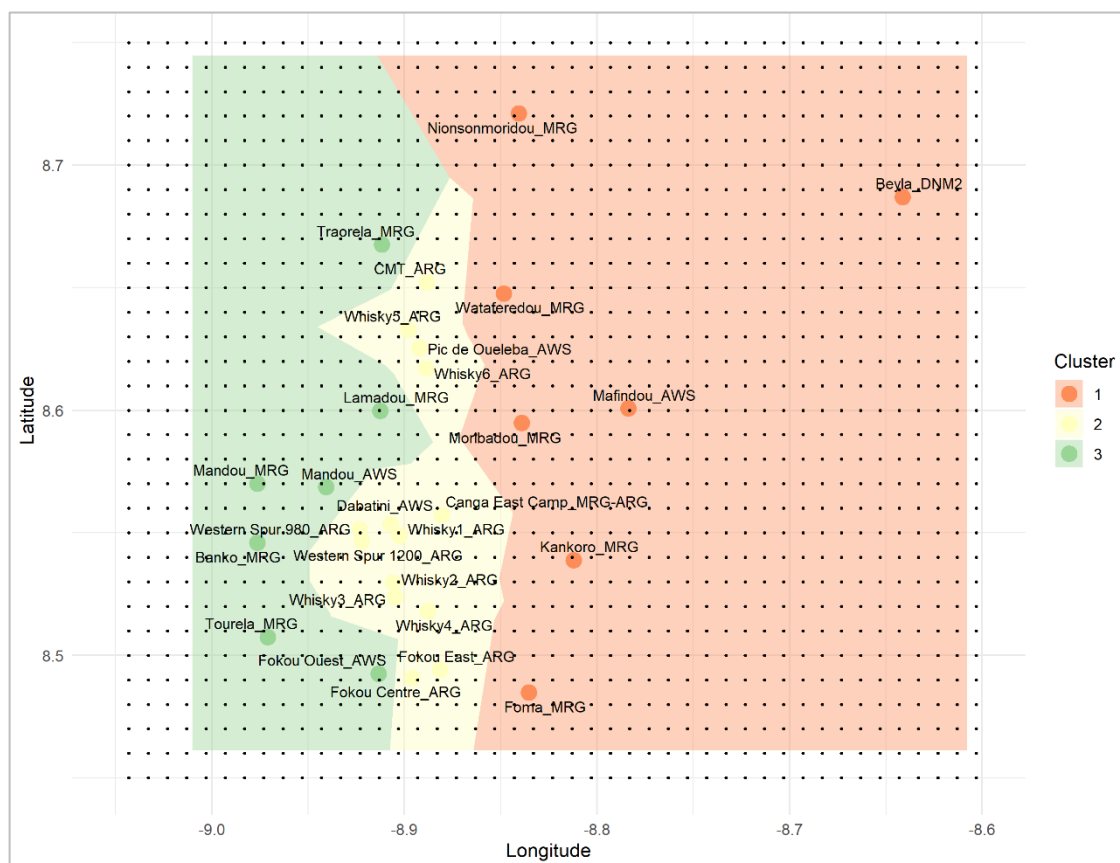


Figure C8: Voronoi Cluster Categorization of Mine Site Area with 3 Clusters

The process of categorizing the extents of the local mine area into one of 3 clusters was useful in interpolating the rainfall conditions at any given point, not just at the monitoring stations, and has delineated the presence of three distinct zones, a group east of ridgeline (1), a group on the ridgeline (2) and a group west of the ridgeline (3). Breakdown into 4 clusters (Figure C9) resulted in similar zonation to the 3-cluster analysis and revealed an additional group on the western flanks of Pic de Fon and Ouéléba. Introducing a 5th cluster (Figure C10) resulted in a separate cluster for the Beyla gauge alone and yielded no further insight into rainfall distribution within the area of interest. The 3- and 4-cluster outputs were considered to be consistent in terms of overall conclusions and equally informative with respect to spatial rainfall patterns. The 3-cluster option was adopted for further analysis on the basis that fewer clusters typically provide more meaningful results as described previously.

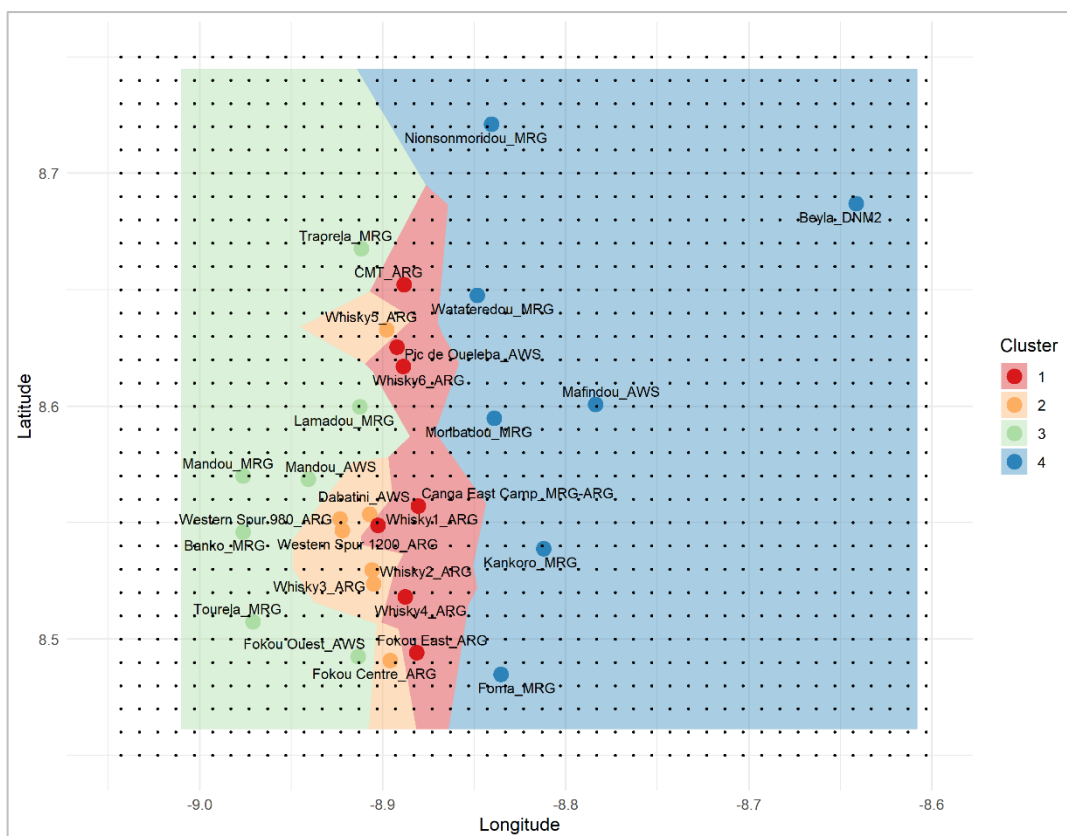


Figure C9: Voronoi Cluster Categorization of Mine Site Area with 4 Clusters

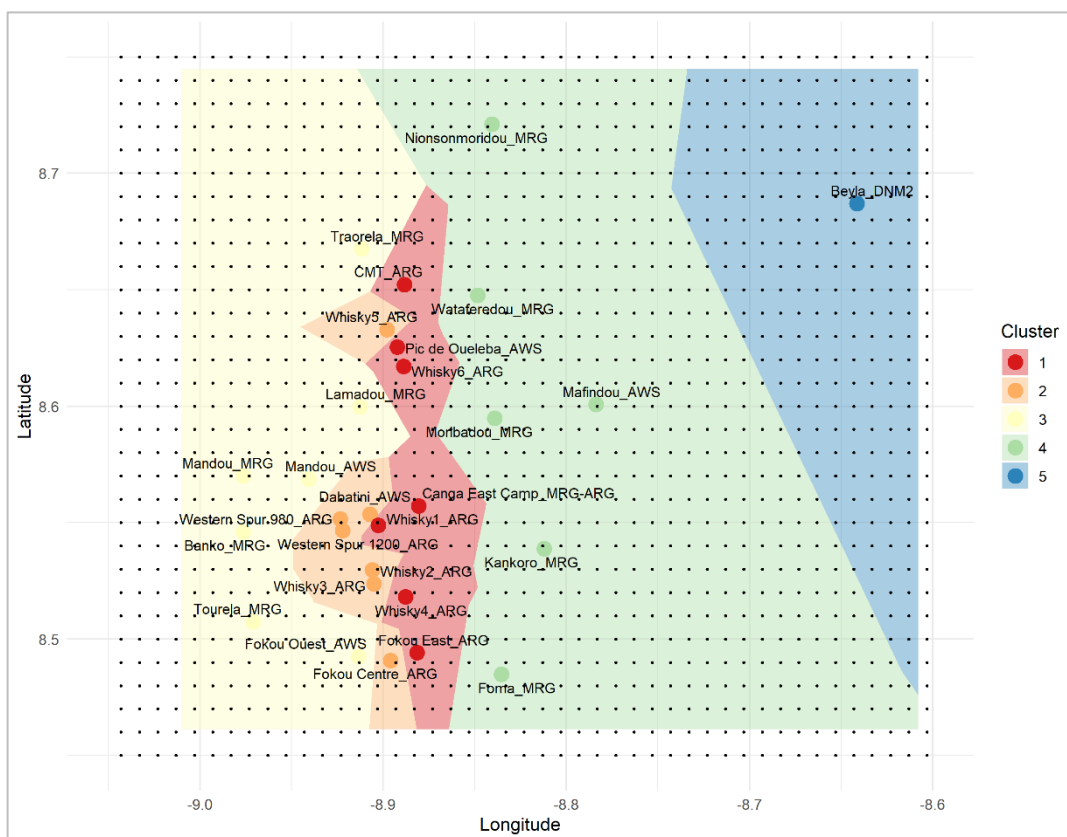


Figure C10: Voronoi Cluster Categorization of Mine Site Area with 5 Clusters

C.4.2 Correlation of Parameters Sorted by Cluster

Correlation Matrices were produced to compare parameters within each of the 3 clusters. The correlation matrices for cluster 1, 2, and 3 are present in Figure C11, Figure C12, and Figure C13 respectively. In general, the correlation results are reasonable among all 3 clusters. However, the sample size within each cluster is relatively small, and there is considerable variation in geography even within each cluster. As a result, the values did not present relevant information to predict or improve the understanding of local precipitation. Larger data sets with more monitoring stations would result in a more accurate mathematical response than this review. This review has confirmed the absence of any relationship between mean annual precipitation and Elevation within the individual clusters. It was therefore concluded that an elevation based gridded rainfall dataset constrained by cluster analysis would not be sufficiently representative. The cluster geometry was however used to guide the manual definition of rainfall zones described in the main body of this report.

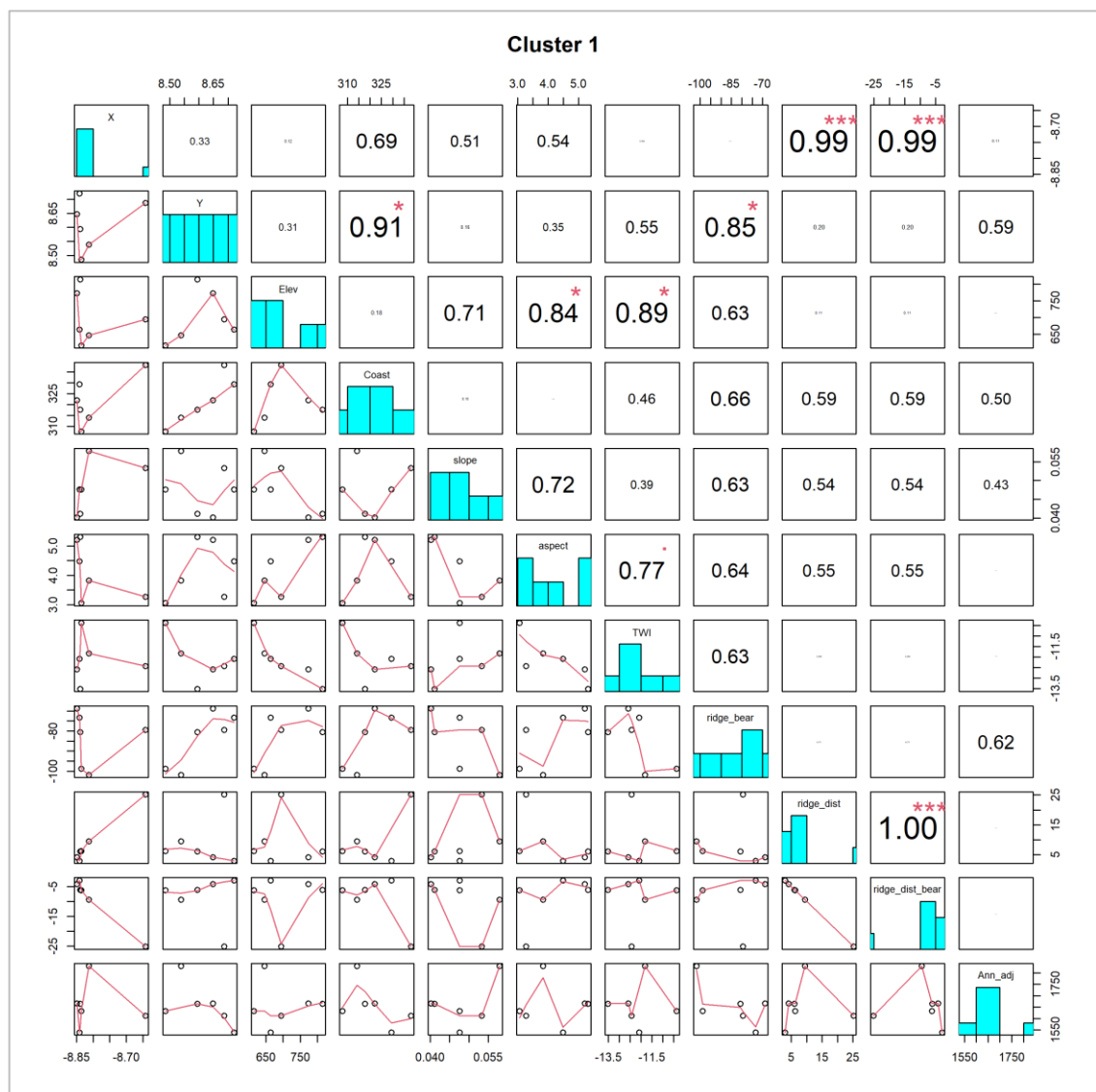


Figure C11: Correlation Matrix for Local Parameters in Cluster 1

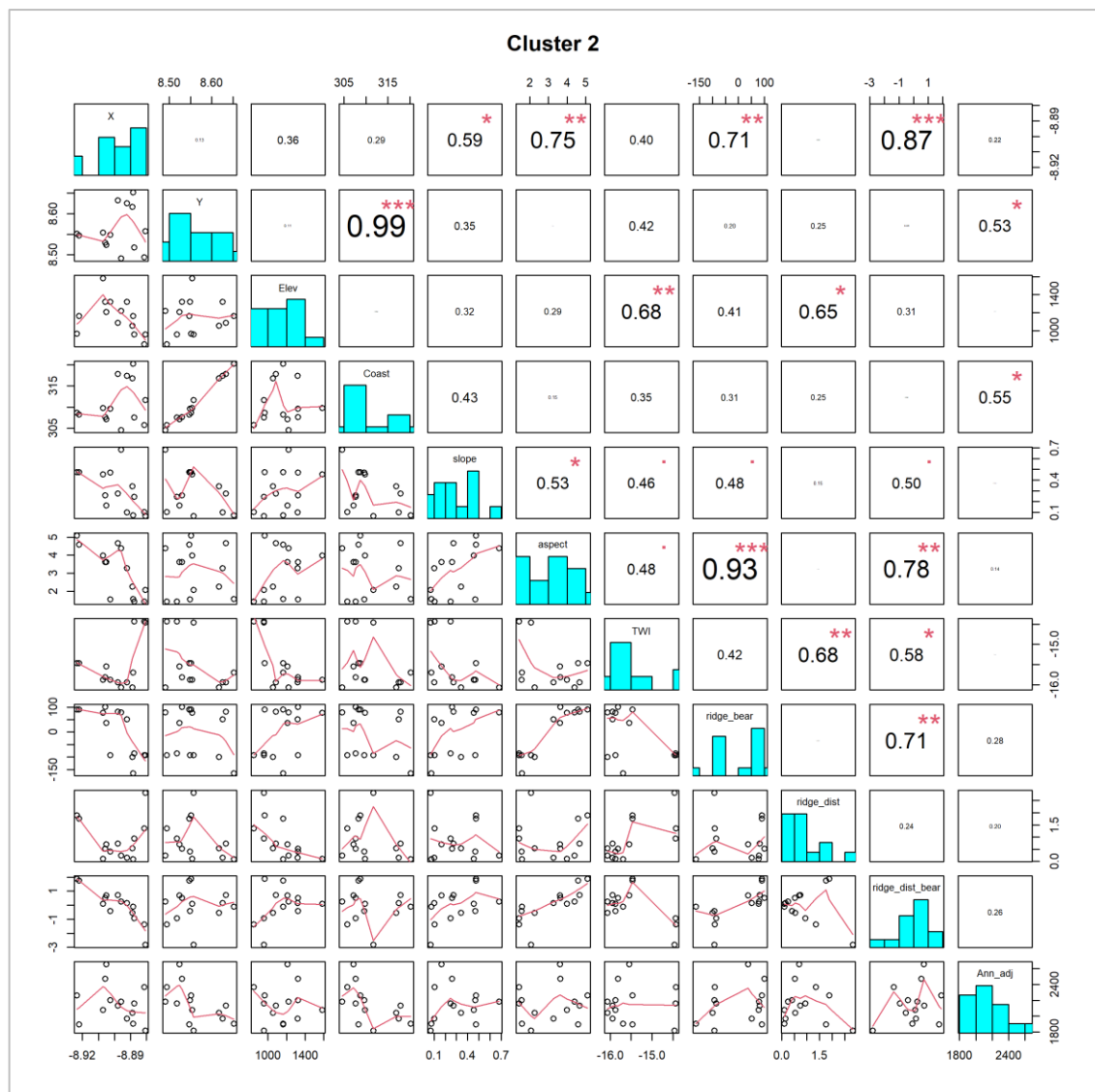


Figure C12: Correlation Matrix for Local Parameters in Cluster 2

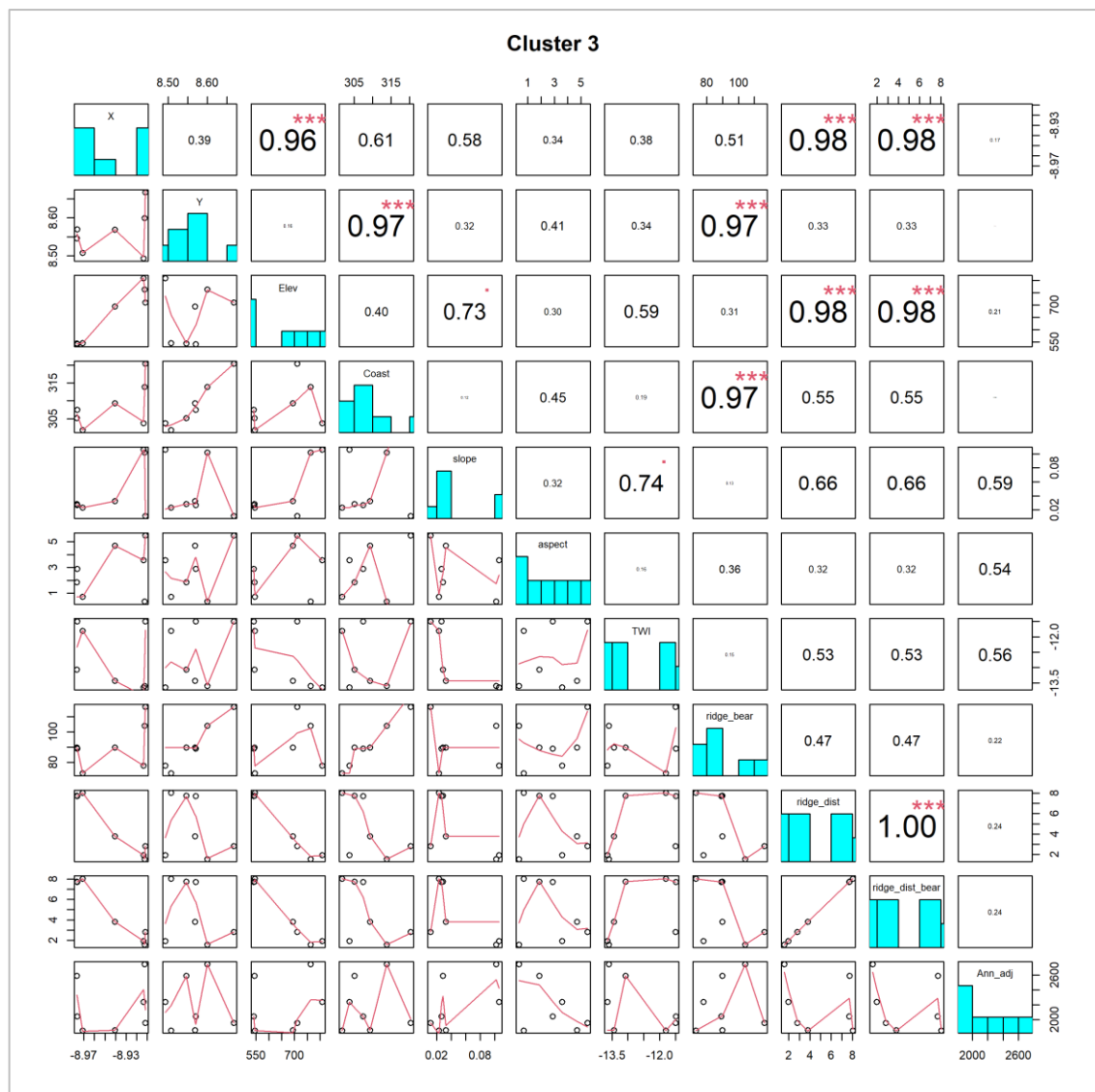


Figure C13: Correlation Matrix for Local Parameters in Cluster 3

C.5 CLIMATE MODEL AND SATELLITE-BASED DATASETS

Climate model datasets were explored as a potential option for providing a representative gridded rainfall dataset at the mine site. The specific datasets explored were ERA5-Land, MERRA2, and CHIRPS

ERA-5 Land (ECMWF¹ Reanalysis v5) is a reanalysis dataset providing a consistent view of the evolution of land climate v v v (°) compared to ERA5. ERA5-Land has been produced by replaying the land component of the ECMWF ERA5 climate reanalysis (ECMWF, 2021).

MERRA2 (Modern-Era Retrospective analysis from Research and Applications, Version 2) from NASA. MERRA includes daily data from 1983 to present (2020) for the entire world, based on a 0.5° latitude by 0.5° longitude grid. (NASA, 2020)

¹ European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data) is a 35+ year quasi-global rainfall data set. Spanning 50°S-50°N (and all longitudes) and ranging from 1981 to near-present, CHIRPS incorporates CHPclim, 0.05° (~5 x 5 km) resolution satellite imagery, and in-situ station data to create gridded rainfall time series for trend analysis and seasonal drought monitoring. (Climate Hazards Center, 2022)

C.5.1 Interpolation of Climatic Grids with Machine Learning

The resolution of the chosen datasets is small (small grid size: 5 x 5 to 15 x 15 km) compared with other climate model products (ie. MERRA2 with ~ 50 x 50 km). However, the resolution was still coarse to properly represent geographical variability at the Simandou mine site, where the ridge top is less than 1 km wide. Machine learning techniques based on thin-plate spline interpolation² were implemented to downscale the local resolutions to grid sizes of 1 x 1 km, this was tested with the ERA5-Land and CHIRPS datasets. The machine learning models used geographical parameters such as: longitude, latitude, elevation, slope, topographical aspect, distance from the ridge as inputs.

The original and enhanced precipitation models are visualised in Figure C14 and Figure C15 respectively.

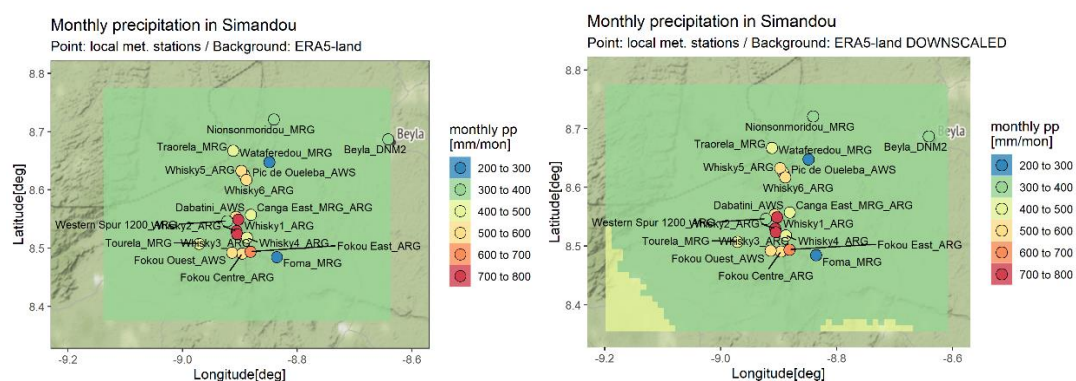


Figure C14: Original vs Interpolated ERA5-Land Models

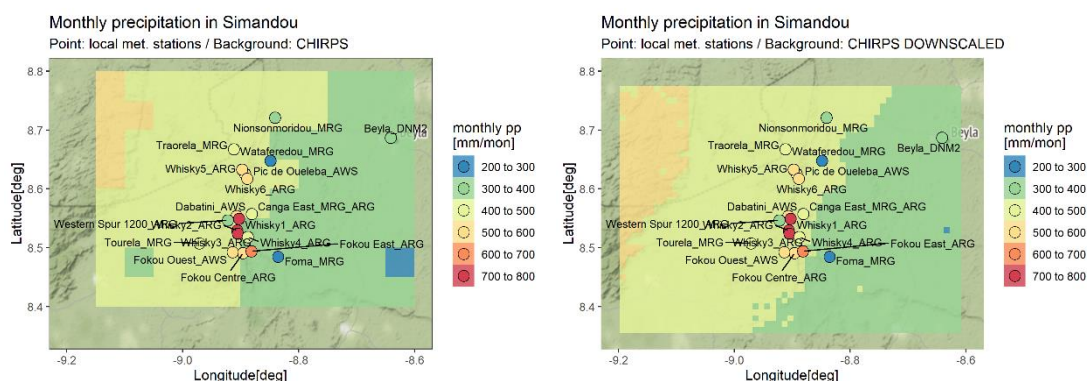


Figure C15: Original vs Interpolated CHIRPS Models

² Given a set of data points, a weighted combination of thin plate splines centered about each data point gives the interpolation function that passes through the points exactly while minimizing the so-called "bending energy." Bending energy is defined here as the integral over R^2 of the squares of the second derivatives. (Belongie, 2022)

Figure C14 and Figure C15 present the monthly precipitation (the plotted data is referenced from August 2007), where the background is obtained from the climatic gridded models (original / interpolated) and the points are the measured (and infilled) precipitation from the meteorological stations. Ideally, the colours of the background and the points should match. The graphs suggest that the monthly mean precipitation values collected at monitoring stations on site differ from the modelled precipitation values obtained from the datasets tested.

The suitability or relevance of each model for project use is explored further in the following section.

C.5.2 Gridded Rainfall Correlation Review

The gridded rainfall datasets explored for use in this analysis were compared to the available site data to measure correlation or goodness of fit by calculating the Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) coefficient and Pearson Correlation Coefficient (PCC) for each model.

Satisfactory NSE model results are considered to be over 0.4 to 0.5 with an ideal maximum of 1.0, zero values are as representative as the median values; while negative values are models definitely not representative. While Pearson correlations are considered appropriate as close as 1.0; Pearson correlation are not affected by scale issues just linear dependencies between the variables.

Daily NSE values for gridded rainfall datasets such as MERRA2 as well as, the original and interpolated datasets ERA5_Land and CHIRPS are presented in Figure C16.

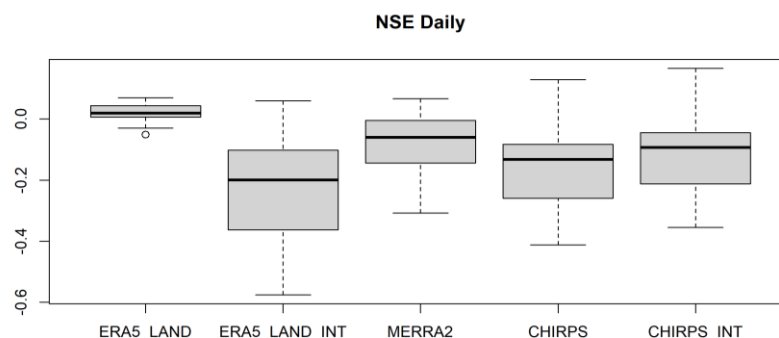


Figure C16: Nashville-Sutcliffe Model Efficiency for Gridded Rainfall Datasets with Daily Precision.

The median NSE values for all datasets ranges from approximately -0.2 to 0.0. As mentioned, NSE values below zero indicate that the mean of the observed site data is a better predictor than the model. These results strongly suggest that climate models are not suitable sources of gridded rainfall for characterisation of precipitation at Simandou.

Further analysis was conducted by comparing the Pearson Correlation Coefficient of each dataset. Correlation measured with daily precision is presented in Figure C17 while correlation measured with monthly precision is presented in Figure C18.

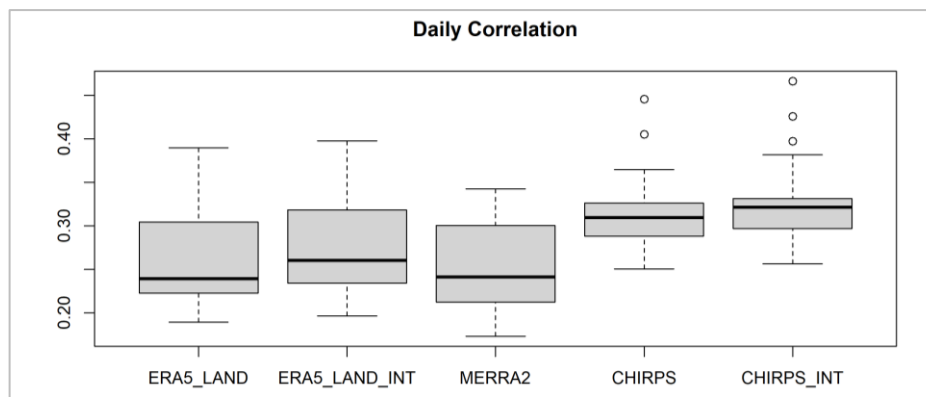


Figure C17: Pearson Correlation Coefficients of Gridded Rainfall Datasets with Daily Precision.

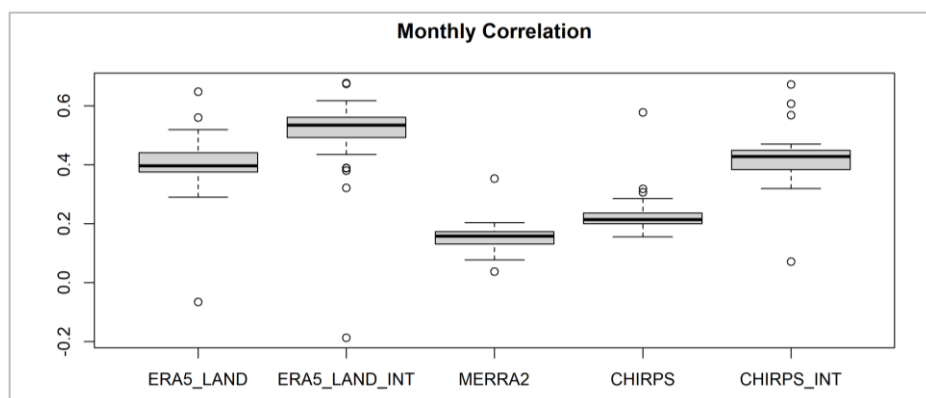


Figure C18: Pearson Correlation Coefficients of Gridded Rainfall Datasets with Monthly Precision.

The daily and monthly PCC values for the best performing datasets are visualised geospatially among each unique monitoring station in Figure C19 and Figure C20 respectively.

The median daily correlation ranges from approximately 0.25 to 0.31 across all datasets. PCC values in this range suggest that there is a weak correlation between observable and modelled data, and the gridded models are not suitable for use in analysis at the Simandou site.

The median monthly correlation ranges from approximately 0.18 to 0.55 across all gridded datasets. While the PCC values generally show improvement compared to those in the daily correlation plot, they still suggest that no dataset has a high enough correlation to be a suitable representation of precipitation conditions at the mine site.

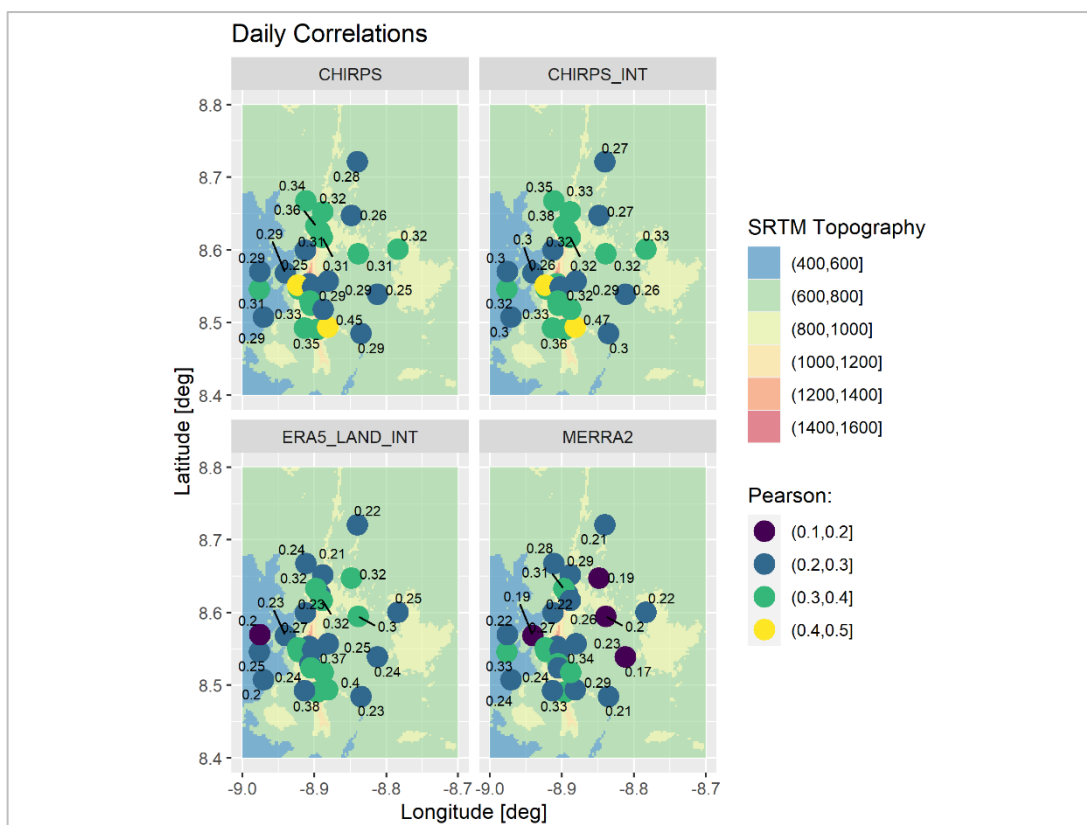


Figure C19: Geospatial Representation of Pearson Correlation Coefficients of Gridded Rainfall Datasets with Daily Precision.

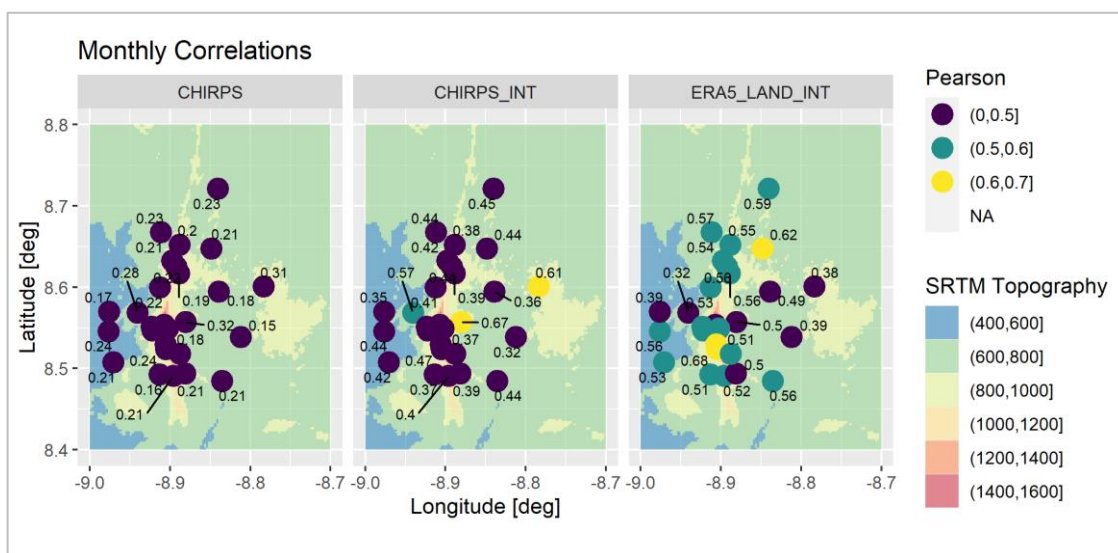


Figure C20: Geospatial Representation for Pearson Correlation Coefficients of Gridded Rainfall Datasets with Monthly Precision.

C.6 Conclusion

This memorandum has discussed aspects of the precipitation analysis in the Climate Baseline Report for the Simandou site, specifically the decision to develop a gridded rainfall dataset for use in the surface and groundwater modelling from an analysis of areas of influence of site rain gauges. Site data is available from 28 rainfall monitoring stations. Records exist in the range from 1981 to 2014. However, the most complete datasets exist from 2007 to 2012, and analysis has been conducted using these datasets.

Firstly, to investigate the existence of relationships between rainfall and the physical environment, a set of geographical parameters was established for each monitoring station. The correlation between mean annual precipitation and the geographical parameters was explored. It was found that a moderate correlation exists between certain parameters and rainfall, where the strongest correlations are longitude, distance from the coast and distance of from the ridge. The analysis was unable to demonstrate a correlation with elevation which precluded the development of an elevation constrained gridded precipitation record as was originally envisaged.

Secondly, cluster analysis was used to establish spatial rainfall patterns using site rainfall records and has delineated the presence of three distinct zones, a group east of ridgeline (1), a group on the ridgeline (2) and a group west of the ridgeline (3). The cluster analysis suggested rainfall zonation aligned with the orientation of the ridgeline was appropriate and this was used to inform the manual delineation of rainfall zones around each station described in the main body of this report.

ERA5_Land, MERRA2 and CHIRPS gridded rainfall datasets generated by global climate models were then investigated to see if they represent the spatial variation in rainfall across the project area. Their resolution was enhanced through machine learning techniques and appropriate resolutions were achieved for the surface and groundwater modelling. Each dataset was compared with site data by calculating the Nash-Sutcliffe Efficiency and Pearson Correlation Coefficient. No relevant correlations were found, strongly suggesting that gridded rainfall datasets derived from climate models are unsuitable for hydrological analysis at the Simandou site. Consequently, a different approach, one based on the area of influence of rain gauges across the site, was used to develop a gridded dataset for use in the surface and groundwater modelling. That approach is discussed in the Climate Baseline Report.

C.7 Bibliography

Belongie, S. 2022. Thin Plate Spline. From MathWorld--A Wolfram Web Resource, created by [Eric W. Weisstein](https://mathworld.wolfram.com/ThinPlateSpline.html). <https://mathworld.wolfram.com/ThinPlateSpline.html>

Climate Hazards Center – University of California Santa Barbara. 2022. CHIRPS dataset (January 1981 to present). Retrieved from <http://power.larc.nasa.gov/>

[ECMWF] European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. 2021. ERA-5 / ERA-5 Land dataset (January 2001 to present). Retrieved from <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>

Galarnyk, M. 2018. Understanding Boxplots. Retrieved from <https://towardsdatascience.com/understanding-boxplots-5e2df7bcbd51>

Kahle, D and H. Wickham, H. 2013. Ggmap: Spatial Visualization with ggplot2. The R Journal, 5(1), 144-161. Retrieved from <http://journal.r-project.org/archive/2013-1/kahle-wickham.pdf>

[NASA] National Aeronautics and Space Administration. 2020. Prediction of Worldwide Energy Resource. Retrieved from High Resolution Daily Time Series by Location parameter from MERRA2. <http://power.larc.nasa.gov/>

OpenStreetMap contributors. 2015. Planet dump (Data file from June 18, 2022). Retrieved from <https://planet.openstreetmap.org>