

Auteurs:

Anton Eitzinger,
Peter Läderach,
Stephania Carmona,
Carlos Navarro,
Laure Collet

Centre International pour
l'Agriculture Tropicale
(CIAT)

Cali, Colombie,
Aout 2013

Prévision de l'impact du changement climatique dans les zones de production du café et de la mangue en Haïti

Rapport Technique final du CIAT





Sara A. Fajardo for CRS



Benjamin Depp for CRS

Référence exacte :

Eitzinger A; Läderach P; Carmona S; Navarro C; Collet L. 2013. prévision de l'impact du changement climatique sur les zones de production du café et de la mangue en Haïti i. Full Technical Report. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia.

Prévision de l'impact du changement climatique dans les zones de production du café et de la mangue en Haïti



Table des Matières

1. Résumé Exécutif et Résultats Principaux	1
A. Méthodologie et Analyse spatiale	1
B. Résultats clés pour le café et la mangue	1
C. Les Options de diversification	2
D. Recommandations et prochaines étapes	3
2. Historique et Contexte	4
3. Méthodologie	5
3.1. Données sur le climat	5
3.2. Facteurs environnementaux	7
3.3. Modèles de prévision des cultures	8
- Sélection d'un modèle	11
- Validation du modèle	11
- Incertitudes liées aux prévisions des modèles	12
3.4. Les options de diversification	12
4. Résultats	13
4.1 Prévision de changement climatique pour Haïti	13
4.2 Prévisions climatiques futures aux échelles régionales spécifiques	16
4.3 Impact des changements climatiques sur le café	17
- Le café en Haïti	17
- Les caractéristiques des zones de production (Amaya et Al., 1999)	18
- Impact des changements climatiques	19
4.4 L'Impact des changements climatiques sur la mangue	21
4.5 Incertitudes, facteurs déterminants, et validation croisée	22
- Validation du modèle Maxent	22
- Les facteurs environnementaux qui influencent l'aptitude	23
- Les incertitudes sur les prévisions d'aptitude futures	24
4.6. Les options de diversification	26
- Cacao	27
- Haricot commun	28
- Mais et sorgho	29
- Igname et Malanga	30
- Arachide	32
5. Conclusion	33
6. Référence	35



Table des Illustrations

Figure 1. Diagramme à blocs des méthodes	5
Figure 2. Stations météorologiques utilisées par WC	6
Figure 3. Les prévisions de changement climatique pour Haïti	13
Figure 4. Les prévisions de changement climatique pour le Département du Sud-ouest	15
Figure 5. Les changements dans les précipitations annuelles moyennes d'ici 2020 dans les communautés ciblées par le projet	16
Figure 6. Les changements dans les précipitations annuelles moyennes d'ici 2030 dans les communautés ciblées par le projet	16
Figure 7. Les changements dans les précipitations annuelles moyennes d'ici 2050 dans les communautés ciblées par le projet	17
Figure 8. Cartographie du secteur caféier d'Haïti	19
Figure 9. L'Aptitude climatique du café	20
Figure 10. L'Aptitude du café selon les altitudes	20
Figure 11. L'Aptitude climatique de la mangue	21
Figure 12. L'Aptitude de la mangue selon les altitudes	22
Figure 13. Performance du modèle Maxent pour le café en utilisant les 25 répliques du modèle	22
Figure 14. Performance du modèle Maxent pour la mangue en utilisant 25 répliques du modèle	23
Figure 15. Facteurs déterminants du modèle café dans le Nord et le Sud-est	24
Figure 16. Facteurs déterminants du modèle café dans le Sud-ouest	24
Figure 17. Facteurs déterminants du modèle mangue dans le Nord et le Sud-est	24
Figure 18. Facteurs déterminants du modèle mangue dans le Sud-ouest	24
Figure 19. Incertitude associée aux résultats du modèle Maxent pour le café, en utilisant les 19 MCG	25
Figure 20. Incertitude associée au modèle Maxent pour la mangue	26
Figure 21. Données Géographiques	26
Figure 22. L'Aptitude actuelle et future (2050) du Cacao	28
Figure 23. L'Aptitude actuelle et future (2050) du Haricot commun	29
Figure 24. L'Aptitude actuelle et future (2050) du Sorgho	30
Figure 25. L'Aptitude actuelle et future (2050) de l'Igname (Cushcush yam)	31
Figure 26. L'Aptitude actuelle et future (2050) de l'Igname (white and yellow yam)	31
Figure 27. L'Aptitude actuelle et future (2050) du Malanga (dasheen)	32
Figure 28. L'Aptitude actuelle et future (2050) de l'Arachide (peanut).	32

Index des Tableaux

Tableau 1. Liste des GCMs utilisée dans cette étude	7
Tableau 2. Liste des variables bioclimatiques dérivées, utilisées comme facteurs environnementaux	8
Tableau 3. Surface cultivées en denrées de diversification en Haïti (Surface en Ha)	27
Tableau 4. Surface disponible pour la production agricole entrecoupée, en fonction de la capacité du sol en Haïti	27



1. Résumé Exécutif et Résultats Principaux

A. Méthodologie et Analyse Spatiale

L'impact potentiel du changement climatique sur la production agricole varie dans l'espace, et dépend des contraintes biophysiques spécifiques à chaque culture. Pour choisir les facteurs environnementaux, une approche centrée sur le climat a été appliquée, car les variables climatiques devraient changer de manière substantielle sur la période de temps modélisée, et des projections futures globalement acceptées sont disponibles.

Les variables bioclimatiques (BC en anglais) sont souvent utilisées dans la modélisation de niche écologique. Elles représentent les tendances annuelles, la saisonnalité, les conditions extrêmes et les facteurs environnementaux limitants. Pour le climat actuel (ligne de référence) nous avons utilisé des données mensuelles de la base de données WorldClim (WC) provenant de stations météorologiques globales. Pour les climats futurs, nous avons utilisé des Modèles de Circulation Générale (GCM en anglais) avec des prévisions à court, moyen et long terme. Nous avons mentionné l'incertitude des prévisions climatiques et les différences entre les GCMs utilisés pour la modélisation. Nous avons utilisé 19 différents GCMs dans notre étude, et produit les cartes finales montrant les statistiques descriptives de différentes prévisions, sur une base de pixel.

Nous avons revu plusieurs modèles d'aptitude climatique pour les cultures, avant de décider lequel était le plus approprié à utiliser dans cette étude. L'entropie maximum (Maxent) est une méthode de modélisation de niche écologique, qui a été développée, en associant l'information de distribution des espèces, uniquement aux sites de présence connus. Maxent est le modèle le plus adapté pour le café et la mangue. Pour identifier les options de diversification les plus appropriées pour les producteurs de café, nous avons analysé l'aptitude climatique pour les cultures sélectionnées, à partir du portefeuille agricole actuel d'Haïti. Nous avons sélectionné ces cultures, en nous basant sur leur importance pour la sécurité alimentaire et les revenus générés, ainsi que sur les cultures récemment adoptées par les organisations de développement. Nous avons comparé les résultats des zones climatiques appropriées, avec un index de disponibilité du sol pour la production agricole. En utilisant un système d'information géographique (GIS en anglais), nous avons extrait des statistiques spatiales, à partir des couches d'aptitudes climatiques, et des 5 couches de disponibilité du sol.

B. Résultats clés pour le café et la Mangue

D'après l'ensemble des 19 modèles de circulation générale (GCM en anglais), la température en Haïti augmentera en moyenne de 0.9°C en 2020 et de 1.8°C d'ici 2050. La température moyenne du mois le plus chaud augmentera de 30.9°C à 32.9°C d'ici 2050 et on projette une chute de 10% des précipitations pour le mois le plus sec. En général le climat devrait devenir plus saisonnier, en termes de variabilité de la température, et de répartition des précipitations au cours de l'année. Même si les diminutions en termes de précipitations sont en général modérées dans toutes les prévisions futures, ceci, combiné avec une augmentation des

températures minimales, moyennes et maximales, peut causer des déficits en eau. En effet, des taux d'évapotranspiration supérieurs des plantes, déclencheraient des déficits en eau du sol, et des stress thermiques. Une augmentation des stress thermiques, et en particulier des températures nocturnes élevées (> 18°C), et des conditions de sécheresse, ont des effets substantiels sur la production de biomasse, et sur les étapes de reproduction de plusieurs plantes et cultures.

Les zones de plantation de café en Haïti se situent à des altitudes comprises entre 400 mètres dans le Nord, et 1 300 mètres dans le Sud. Les changements des régimes de températures et de précipitations, causeront une diminution générale des zones aptes à la culture du café, et réduira les zones qui possèdent actuellement une forte aptitude climatique. L'aptitude climatique s'élèvera selon des gradients altitudinaux, vers des climats actuellement plus froids. Les modèles prédisent, qu'à basses altitudes (en dessous de 1 200 mètres au-dessus du niveau de la mer), le café perdra en aptitude climatique et gagnera en aptitude dans les zones plus hautes avec un maximum compris entre 1 500 et 1 800 mètres au-dessus du niveau de la mer en 2050. Les changements des conditions climatiques en Haïti, pourraient diminuer la qualité et les rendements des régions actuelles de productions de café, et ceci serait d'autant plus vrai dans les zones de basses altitudes. Des pertes économiques dans le futur pourraient en résulter, si des efforts d'adaptation ne sont pas entrepris.

La mangue restera une culture hautement appropriée dans de nombreuses régions d'Haïti. Certaines zones passeront d'excellentes à très appropriées, et se déplaceront géographiquement depuis des zones concentrées proches de la côte, vers des zones plus hautes à l'intérieur des terres. Les altitudes de 500 à 700 mètres au-dessus du niveau de la mer, bénéficieront d'une augmentation de l'aptitude climatique, principalement grâce à une augmentation des températures.

C. Les options de diversification

L'impact potentiel du changement climatique sur les productions des cultures agricoles varie spatialement, et dépend des contraintes biophysiques spécifiques à chaque culture. En Haïti, les terres destinées à l'agriculture s'étendent sur plus de 1,7 million d'hectares, soit 60% de la surface du pays. La production agricole est conditionnée aux différents régimes climatiques, ainsi que d'autres contraintes, telles que l'érosion des sols, la capacité très variable du sol, et la prévalence de l'utilisation des terres. Les 6 cultures sélectionnées dans cette étude, comme options de diversification pour les agriculteurs de café, utilisent ensemble plus de 0,4 millions d'hectares (60%) de terres agricoles en Haïti. 400 000 hectares (14%) des terres agricoles d'Haïti sont disponibles, et la capacité du sol varie de moyenne à excellente dans ces zones; 530 000 hectares (19%) sont disponibles, mais les agriculteurs produisent sur des sols avec une capacité limitée, en plus, 300 000 hectares n'ont pas de limitations liées au sol, mais nécessitent un changement dans leur utilisation pour produire des cultures annuelles (une partie d'entre eux est actuellement utilisée pour les systèmes agro-forestiers ou sont des forêts restantes).

Haïti a une excellente aptitude climatique pour le cacao et, il n'est pas prévu qu'il sera affecté par des changements de régimes climatiques à long terme. Il existe encore beaucoup de zones potentielles à l'intérieur des systèmes agro-forestiers existants qui pourrait être créés à l'avenir. Les producteurs de cacao d'Haïti ont l'opportunité de tirer profit d'une augmentation globale de la demande pour la production de cacao.

Les environnements très appropriés pour la culture du haricot commun en Amérique Centrale et dans la Caraïbes sont actuellement limités, principalement par la température maximale. Nos analyses montrent, que l'aptitude climatique pour la culture du haricot diminuera assez sensiblement dans plusieurs zones d'Haïti, qui sont actuellement d'importantes zones de production. Si aucune mesure d'adaptation n'est prise, les pertes peuvent s'élever jusqu'à 70% dans les zones n'ayant pas de limites quant à la capacité du sol, et la disponibilité des terres pour la production annuelle des cultures. Il est nécessaire d'introduire des variétés améliorées moins sensibles à la chaleur, d'équiper les agriculteurs d'outils et de connaissances nécessaires, en vue de leur permettre de combler les écarts de rendements par rapport à la production existante. Les études statistiques sur les rendements du maïs, ont clairement indiqué une réponse négative des rendements, due à une accumulation de jours au-dessus de 30°C, et des différences marquées dans la distribution des pluies durant la saison de croissance (augmentation du stress hydrique pour les plantes). Nous soulignons, qu'en vue de lutter contre les stress thermique sur les variétés de maïs, des stratégies appropriées, dans le cadre de la gestion et le développement des cultures, devraient être une priorité des travaux futurs en Haïti. L'aptitude climatique pour la culture du sorgho en Haïti, connaîtra une augmentation comprise entre 4 et 8% dans les terres disponibles, avec une capacité du sol nulle ou limitée d'ici 2050. Il y a de nombreuses espèces d'ignames, et nous avons sélectionné les 3 principaux pour la Caraïbe. Les résultats montrent que l'igname cushcush perd en aptitude dans des zones importantes, l'igname blanc et jaune gagne en aptitude, et les zones disponibles demeurent plus ou moins constantes à travers Haïti d'ici 2050. Finalement, le malanga module ses zones géographiques d'aptitude climatique, mais globalement, perd en aptitude et en zones. L'Arachide constitue une belle opportunité pour l'avenir, du à la possibilité de doubler les surfaces de production de cette culture, dans les zones ayant des terres disponibles et sans limitations du sol, et à son aptitude climatique qui se maintient presque partout à travers Haïti.

D. Recommandations et prochaines étapes

Il y a de nombreuses opportunités d'adaptation aux changements et, pour les agriculteurs de café, dont l'aptitude baissera, mais ne chutera pas radicalement, l'adaptation proactive est une stratégie cruciale. Les systèmes agroforestiers, tels que les systèmes caféiers, ne sont pas seulement importants, en tant que source de produit de consommation et générateurs de revenus pour les petits propriétaires, mais ils sont aussi des pourvoyeurs de services éco systémiques. Il est probable, qu'une diminution de l'aptitude climatique du café, menace les services éco systémiques fournis par les systèmes caféiers tels que la couverture du

sol, la séquestration de carbone, la biodiversité et le stockage de l'eau. En conséquence, une stratégie clé, doit chercher à maintenir les services environnementaux, avec un système agro-forestier différent. Dans ce contexte, le cacao est une option prometteuse. On distingue 3 stratégies générales d'adaptation au changement d'aptitude climatique du café. Les trois stratégies sont interconnectées, et se succéderont au fil du temps. Les zones où l'aptitude augmentera, ont besoin d'investissements stratégiques. Les zones qui perdront en aptitude, peuvent être maintenues, grâce à des stratégies ciblées, telles que l'irrigation, la gestion de l'ombrage et l'utilisation de variétés résistantes à la sécheresse. Les zones susceptibles de subir une chute significative de l'aptitude climatique, doivent commencer à se diversifier, en s'orientant vers de nouvelles cultures telles que le cacao, sitôt que le café n'est plus approprié.

2. Historique et Contexte

Ce travail est basé sur les activités en cours de la Catholic Relief Services (CRS), dans la perspective d'améliorer les conditions de vie des agriculteurs Haïtiens, à travers les chaînes de valeur de la mangue et du café dans les Départements du Sud-ouest du pays. Après le séisme de 2010, CRS, avec la collaboration de Centre International pour l'Agriculture Tropical (CIAT), a conduit une évaluation sur l'état actuel de ces chaînes de valeur, et fournit dans son rapport final, diverses recommandations susceptibles de favoriser l'amélioration de la production actuelle et en termes de quantité, et en termes de qualité (Rodriguez et Al. 2011, Castañeda et al. 2011). Le Ministère de l'Agriculture, des Ressources Naturelles et du Développement Rural, a élaboré le Plan National d'Investissement Agricole, qui met en relief, l'importance vitale du secteur agricole, pour non seulement parvenir à la sécurité alimentaire nationale, mais aussi, faciliter la reprise économique, et encourager la stabilité sociale du pays après le séisme. La présente étude vise à contribuer aux efforts entrepris, dans le cadre des investissements stratégiques à long terme en cours d'exécution dans ces chaînes de valeur, en prévoyant l'impact des changements climatiques à court et à long terme sur le café et la mangue. D'autres impacts potentiels sur les cultures proposées pour être des options de diversification pour les agriculteurs du café, seront évalués, à travers une analyse de leur capacité d'adaptation par rapport au climat, en vue de s'assurer, que le travail d'adaptation stratégique sera réalisé sur des produits agricoles actuels et futurs appropriés pour Haïti. Les répercussions possibles du changement climatique sur la production agricole varient dans l'espace, en fonction des contraintes biophysiques spécifiques à chaque culture. En Haïti, les terres agricoles s'étendent à plus de 1.7 millions d'hectares, occupant ainsi plus 60% de la superficie du pays. Au-delà des régimes climatiques différents, la production agricole fait face à d'autres défis tels que, l'érosion du sol, la capacité hautement variable du sol, la prévalence accordée à l'utilisation du sol. Dans cette étude, 6 cultures agricoles choisies comme options de diversification pour les fermiers agriculteurs, utilisent ensemble, plus de 1.4 millions d'hectares, représentant 80% des terres agricoles d'Haïti en 2011.

Les principaux objectifs visés dans le cadre de ce projet ont été : Examiner et comparer les méthodes d'adaptation des cultures, modeler et compiler

les informations nécessaires; (ii) identifier les facteurs environnementaux, et générer une base de données climatiques sur les conditions actuelles et futures; et (iii) prévoir et valider l'aptitude actuelle et future du café, de la mangue, et des cultures de diversification en Haïti.

3. Méthodologie

La figure 1 illustre un diagramme à bloc des méthodes utilisées. Les éléments décrits ci-dessous ont été utilisés dans le cadre de ce projet de recherche.

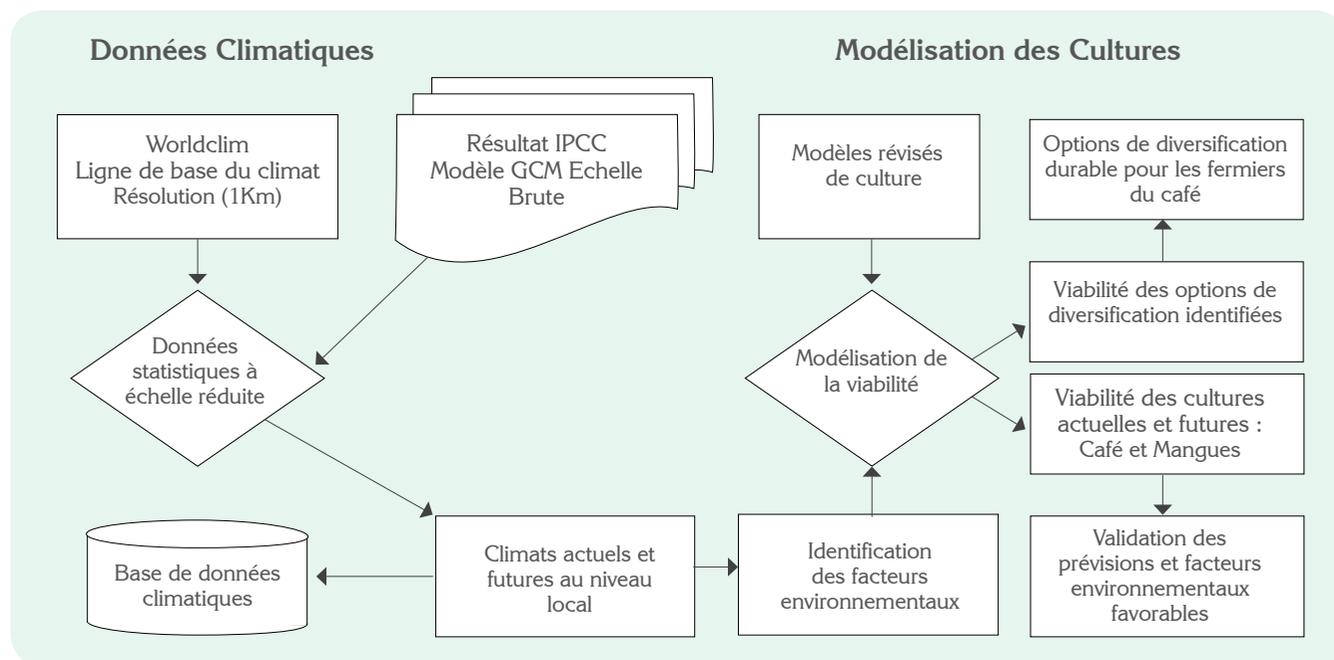


Figure 1 Diagramme à Blocs des Méthodes

3.1. Données climatiques

En vue de prévoir les changements climatiques futurs, il était nécessaire pour nous d'établir une ligne de référence, en vue de comparer les résultats des Modèles de Circulation du Globe (MCG) (ou GCM en anglais) avec les conditions climatiques actuelles. Ces GMC possèdent une résolution spatiale à forte granularité, il s'était ainsi révélé nécessaire de les réduire, en vue de prévoir les changements climatiques au niveau local.

Pour le climat actuel (Ligne de référence), nous avons utilisé les données mensuelles de la base de données Worlclim (WC) (publiquement et gratuitement disponibles à <http://www.worldclim.org>). WC fournit des informations sur les surfaces climatiques globales interpolées, en utilisant la latitude, la longitude, et l'élévation, comme des variables indépendantes, et représentent le long terme (1950–2000), ainsi que sur les températures maximales, minimales, et moyennes, sans omettre les chutes de pluie totales. Les données d'entrée pour la base de données de WC, provenaient des stations météorologiques du globe, y compris ~47,000 stations météorologiques avec les informations mensuelles sur les précipitations, ~23,000 stations avec les données moyennes de température, et ~13,000

endroits. En passant à travers un algorithme de contrôle de qualité, les données d'entrée ont été finalement interpolées à une résolution spatiale de 30 arc seconde, communément appelé résolution « 1-km» (Hijmans et al. 2005).

Les données de WC pour Haïti sont dérivées de 103 stations avec enregistrements des chutes, 93 stations avec température moyenne, et 18 stations de températures minimales et maximales (Figure 2).

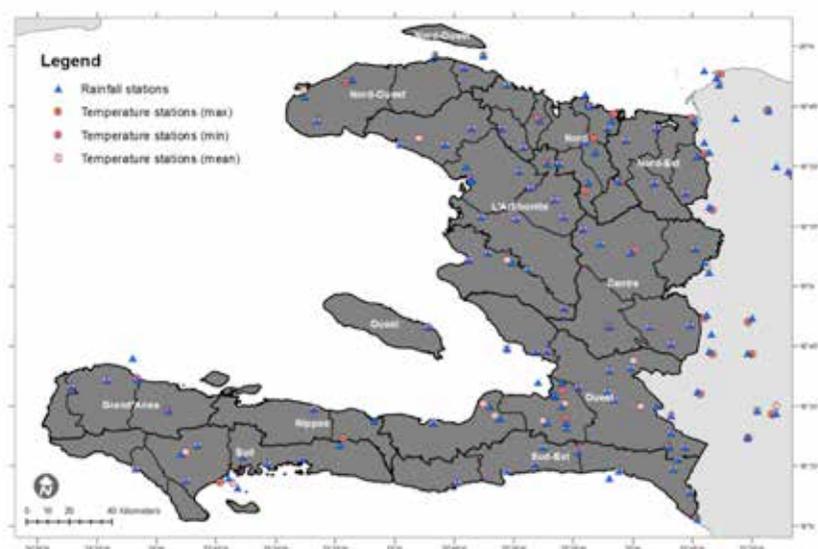


Figure 2. Stations Météorologiques utilisées par WC

Pour les climats futurs, nous avons utilisé le Modèle de Circulation du Globe (GCM), préparé par le Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution Climatique (GIEC), Quatrième Rapport d'évaluation (AR4) (Solomon et al. 2007). Nous avons téléchargé les données provenant de Earth System Grid (ESG). Le portail des données fournit de nombreux GCM différents, développés par différents Centres de Recherche climatiques Mondiaux (tableau 1). En raison de l'incertitude attachée à ces modèles pour prédire les conditions climatiques futures, nous avons utilisé tous les modèles disponibles, évalués par l'intermédiaire de World Climate Research Program (WCRP), au cours des diverses phases du Projet d'Inter comparaison des Modèles Couplés (Anglais : Coupled Model Intercomparison Project (CMIP), (Covey et al. 2003). Le GIEC prévoit en outre différents scénarios des futures émissions de gaz à effet de serre. Le rapport spécial sur les scénarios d'émissions (SRES), fournit des scénarios, basés sur les statistiques démographiques, économiques, technologiques, et forces motrices, dans les quatre principaux scénarios (GIEC, 2000). Dans cette étude, nous avons utilisé le scénario SRES-A2, qui décrit un monde hétérogène dans lequel la population est en augmentation et le développement économique se produit principalement à l'échelle régionale. La croissance économique et le changement technologique sont plus lents que dans les autres scénarios.

Tableau 1. Liste des OCMs utilisés dans l'étude

modèle MCG	Institut	Pays
BCCR-BCM2.0	Bjerknes Centre for Climate Research	Norvège
CCSM3	National Center for Atmospheric Research	USA
CGCM3.1(T47)a	Canadian Centre for Climate Modeling & Analysis	Canada
CNRM-CM3	Centre National de Recherches Météorologiques	France
CSIRO-Mk3.0c	CSIRO Marine and Atmospheric Research	Australie
CSIRO-Mk3.5	CSIRO Marine and Atmospheric Research	Australie
ECHAM5/MPI-OM	Max Planck Institute for Meteorology	Germany
ECHO-Ga	Meteorological Institute of the University of Bonn	Allemagne / Korea
GFDL-CM2.0	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	USA
GFDL-CM2.1	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	USA
GISS-ER	Goddard Institute for Space Studies	USA
INGV-SXGc	Instituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia	Italie
INM-CM3.0b	Institute for Numerical Mathematics	Russie
IPSL-CM4	Institut Pierre Simon Laplace	France
MIROC3.2 (medres)	Center for Climate System Research	Japon
MRI-CGCM2.3.2a	Meteorological Research Institute	Japon
PCMc	National Center for Atmospheric Research	USA
UKMO-HadCM3	Hadley Centre for Climate Prediction and Research	UKraine
UKMO-HadGEM1	Hadley Centre for Climate Prediction and Research	UKraine

Les données GCM téléchargés sont formatées à une échelle temporelle annuelle, et nous avons calculé trois périodes de 30 ans, afin de représenter les prévisions de changements climatiques sur le court, le moyen et le long terme. Ainsi, (2010-2039 représente la période 2020 ; 2020-2049 représente la période 2030; et 2040-2069 représente 2050). La granularité de la résolution spatiale des GCMs est trop forte pour permettre d'analyser les impacts directs sur la production des agriculteurs (Jarvis et Al. 2010). Nous avons en conséquence téléchargé les résultats de chaque GCM, basés sur la somme des anomalies interpolées à la résolution 30 arc-seconde, (environ 1km) (changements climatiques mensuelles de Worldclim WC). Cette méthode produit une surface plane, interpolée, favorisant la détermination des changements dans les prévisions climatiques, dérivés du GCM particulier qui a ensuite été appliqué au climat de référence de Worldclim WC (Ramirez-Villegas* Jarvis 2010).

Le climat qui en découle pour les surfaces d'Haïti était finalement compilé dans une base de données climatique, y compris le climat actuel de WC, et revu à la baisse par rapport aux prévisions climatiques futures des GCMs sur le scénario d'émission IPCC A2. Enfin nous avons généré des graphiques de synthèse du climat actuel et futur pour des municipalités spécifiques.

3.2. Facteurs Environnementaux

L'Occurrence des espèces végétales n'est pas seulement définie par des variables climatiques, et l'exclusion d'autres variables importantes (par exemple le type de sol), peut réduire la capacité d'évaluer les conditions environnementales requises durant la période de croissance (Stanton et al. 2011). On s'attend à ce que les variables climatiques se modifient substantiellement pendant la période de temps modélisée, et

les projections futures généralement reconnues sont disponibles, même si ces projections sont incertaines. Nous appliquons une approche basée uniquement sur le climat dans ce projet de recherche, en vue d'atteindre les objectifs du projet, consistant à évaluer les répercussions du changement climatique sur la pertinence des cultures dans les zones de l'étude.

Les Variables Bioclimatiques (VB) sont souvent utilisées dans la modélisation de la niche écologique, et elles représentent les tendances annuelles, la saisonnalité, et certains facteurs environnementaux extrêmes ou limités. Les Variables Biologiques VB sont dérivées des températures mensuelles, et du volume des précipitations, afin de générer davantage de variables biologiquement significatives (Busby 1991), suivant la méthode des Ramirez & Bueno-Cabrera (2009). L'ensemble des covariables qui en résulte comprend 19 variables bioclimatiques (voir tableau 2) qui ont été utilisées dans plusieurs études, en vue de modéliser empiriquement la répartition actuelle et future des espèces (Davis et al. 2012, Jarvis et al. 2012, Laderach et al. 2009, Laderach et al. 2013)

Tableau 2. Liste Variables Bioclimatiques dérivés, utilisées comme facteurs environnementaux

ID	Nom du Variable	Unités
P1	Température moyenne annuelle	°C
P2	Plage des températures diurnes moyennes	°C
P3	Isothermalité	N/A
P4	Saisonnalité de température (Ecart-type)	°C
P5	Température Maximale du mois le plus chaud	°C
P6	Température Minimale du mois le plus froid	°C
P7	Plage des températures annuelles	°C
P8	Température Moyenne du trimestre le plus humide	°C
P9	Température Moyenne du trimestre le plus sec	°C
P10	Température Moyenne du trimestre le plus chaud	°C
P11	Température Moyenne du trimestre le plus froid	°C
P12	Précipitations annuelles	mm
P13	Précipitations au cours du mois le plus humide	mm
P14	Précipitations au cours du mois le plus sec	mm
P15	Saisonnalité des Précipitations (coefficient de variation)	%
P16	Précipitations au cours du trimestre le plus humide	mm
P17	Précipitations au cours du trimestre le plus sec	mm
P18	Précipitation au cours du trimestre le plus chaud	mm
P19	Précipitations au cours du trimestre le plus froid	mm

3.3. Modèles de prévision des cultures

Nous avons examiné plusieurs modèles d'adaptation des cultures avant de décider celui qui se révèle le plus approprié à l'analyse. Par la suite, une brève description de chaque modèle est fournie :

Ecocrop (EC) est un modèle de prédiction des cultures de niche, avec le même nom que la FAO Ecocrop (FAO, 2000). Le modèle de base utilise des gammes environnementales comme données d'entrées, en vue de déterminer la principale niche d'une culture, pour produire ensuite une aptitude de récolte globale en pourcentage, et des valeurs d'aptitude séparées liées à la température et aux précipitations, comme données de sortie. EC est un modèle très utile pour les situations, où la preuve des données disponibles pour des denrées spécifiques est insuffisante, ce qui contraint à l'utilisation des échelles environnementales.

Le modèle original (Hijmans et Al. 2001), a été mise en 'uvre dans le logiciel Diva-GIS (Hijmans et Al. 2012). Le EC prédit la conformité climat/denrées, en utilisant les paramètres suivants: la température tuant les plantes; le minimum, le minimum optimal, le maximum optimal, et la température maximale ; le minimum, le minimum optimal, le maximum optimal et le maximum d'eaux de pluie requises ; et la longueur de la saison de croissance. Le modèle EC est une approche générale de pertinence de modélisation, si l'on considère uniquement la température et la pluviosité comme éléments déterminants de l'adaptation des cultures. Les informations sur les données du sol et sur la gestion des cultures ne sont pas comptabilisées dans le modèle. En outre, la précision des modèles dépend directement de la qualité de l'expertise utilisée pour définir les paramètres de culture. Néanmoins Ramirez-Villegas et Al. (2011) étend le modèle, en fournissant un processus de calibrage des plages de température et de précipitations, à l'aide des données sur les sites de présence des cultures.

L'Entropie maximale (MAXENT en anglais) est une méthode de modélisation de niche écologique qui a été développée en associant l'information de distribution des espèces, uniquement aux sites de présence connus. C'est également une méthode polyvalente, pour faire des projections ou des inférences à partir d'informations incomplètes. Semblable à la régression logistique, MAXENT pèse chaque variable environnementale, en utilisant une constante. La distribution de la probabilité est la somme de chaque variable pondérée divisée par une constante de mise à l'échelle, en vue de s'assurer que la valeur de la probabilité varie de 0 à 1. Les informations disponibles sur la cible de distribution se présentent souvent comme un ensemble de variables à valeurs réelles, appelé « caractéristiques », et les contraintes sont, que la valeur attendue de chaque fonction doit correspondre à la moyenne empirique (valeur moyenne pour un ensemble de points de l'échantillon prélevée dans la cible de distribution", Phillips et al., 2006). Chaque fonction, c'est-à-dire, les variables environnementales, est pondérée en fonction du degré de complexité qu'elle ajoute au modèle. La distribution de la probabilité est la somme de chaque variable pondérée, divisée par une constante scalaire, en vue de s'assurer que la valeur de la probabilité varie de 0 à 1. Le programme démarre avec une distribution uniforme de probabilité, et fonctionne en cycles, en ajustant les probabilités d'entropie maximale. Il altère itérativement un poids à la fois, afin de maximiser les chances de parvenir à la distribution optimale de probabilité. Maxent fonctionne extrêmement bien dans le cadre des prévisions d'événements, en particulier avec des informations incomplètes, et est considéré comme le modèle le plus précis, par rapport aux autres approches courantes,

(Elith et al., 2006; Hijmans et Graham, 2006). Il fonctionne également bien avec les petits sites d'échantillonnage des données se rapportant à un événement, et avec les variables environnementales continues et catégoriques. Enfin, le biais rattaché à la sélection de l'échantillon est le plus gros problème de cette méthode basée uniquement sur le site de présence.

Le choix d'une niche de cultures en Agriculture tropicale CaNaSTA (o' Brien, 2004) n'est pas une méthode de modélisation de niche écologique « traditionnelle », car il utilise des statistiques bayésiennes, non seulement pour prédire la présence ou l'absence d'une culture spécifique, mais encore, pour évaluer son rendement. Les méthodes bayésiennes fournissent un « formalisme pour le raisonnement en situation d'incertitude, avec des degrés de croyance codés, comme les paramètres numériques, qui sont ensuite combinés selon les règles de la théorie des probabilités » (Pearl, 1990). L'algorithme de CaNaSTA crée des tables de probabilité conditionnelle de toutes les variables prédictives en réponse aux catégories variables (o' Brien, 2004). Le principal résultat du modèle est une distribution discrète de probabilité pour chaque lieu. Une valeur établie avec un certain degré d'exactitude est également associée à chaque lieu. Elle est dérivée du nombre de sites dans les données d'essais, avec une combinaison particulière prédicateurs/réponses. CaNaSTA ne fonctionne qu'avec ses propres jeux de données, et les analyses nécessitent une longue préparation, et certaines compétences de l'utilisateur en matière de statistique bayésienne. La sélection de l'échantillon est un facteur clé pour éviter des biais dans les probabilités antérieures. La diversité locale et régionale est prise en compte par l'algorithme bayésien. Le modèle est plus lent que les autres modèles en raison de son algorithme plus compliqué. Pourtant cet algorithme fait de ce modèle un puissant instrument d'évaluation non seulement du site, mais encore de la performance des cultures. En outre, il fournit une évaluation exacte locale pour les valeurs de probabilité.

Le « Système de Support des décisions pour le transfert de technologie agricole » (DSSAT en anglais), est un modèle de simulation de culture qui simule la croissance, le développement et la production, en fonction de la dynamique sol/plantes/atmosphère (Jones et al. 2003). Pour les 28 cultures disponibles, les simulations sont effectuées à un rythme quotidien et, dans certains cas, à un rythme horaire, selon le processus et le modèle de culture. La plante et l'eau du sol, l'azote et les balances de carbone sont mis à jour, ainsi que les étapes de développement reproductif et végétatif de la culture. DSSAT intègre les effets du sol, le phénotype des cultures, la météo et les options de gestion, pour simuler les résultats de plusieurs années de stratégies de gestion des cultures. Les modèles de cultures nécessitent des données météorologiques quotidiennes, des informations sur la surface et le profil du sol, ainsi que sur la gestion détaillée des cultures comme données d'entrée pour faire fonctionner et évaluer la simulation des modèles et les résultats. Les données météorologiques doivent inclure les valeurs journalières de rayonnement solaire, le maximum et le minimum quotidien de la température de l'air ainsi que les précipitations quotidiennes, pendant au moins la durée de l'expérience, et doit commencer de préférence quelques semaines avant la plantation, et continuer quelques semaines après la récolte. Les données requises sur

le sol se compose de la classification du sol (SCS), la pente de surface, la couleur, la perméabilité, et des données sur le profil des horizons et de la classe de drainage. Les données de gestion incluent des informations sur la date des semis, les dates auxquelles les conditions du sol ont été mesurées avant les semis, la densité d'ensemencement, l'espacement des rangées, la profondeur de la plantation, la variété des cultures, l'irrigation et les pratiques de fertilisation. Pour l'évaluation des modèles, les données sur le développement de la culture, l'eau du sol, les mesures de fertilité sont nécessaires. Basé sur les processus de culture, DSSAT donne des résultats précis en matière de rendements potentiels, d'étapes phénologiques de la plante, du poids, de la date de la récolte, de la quantité d'azote et d'eau du sol, en intégrant des interactions entre les paramètres de la météo, du sol, et des caractéristiques génétiques et administratives. Cependant le facteur le plus limitatif de ce puissant modèle, est qu'il est disponible uniquement pour des cultures les mieux connues, et qu'il nécessite l'utilisation de données quotidiennes précises.

Sélection d'un modèle

Parmi les modèles ci-dessus décrits (Ecocrop, Maxent, Canasta et DSSAT), Maxent est le modèle le plus adapté pour le café et la mangue quand les données du site sont disponibles. Comme préalablement indiqué, Ecocrop est recommandé pour étudier des tendances générales, cependant les trois autres modèles sont plus précis. DSSAT est le modèle le plus puissant, mais l'étalonnage n'est disponible ni pour le café, ni pour la mangue. Pour CaNaSTA l'analyse des données requiert une longue période de préparation, compte tenu du fait que la performance de la récolte doit être évaluée pour calibrer des probabilités antérieures. Finalement, Maxent apparaît comme le meilleur compromis entre les données, la précision des résultats et la consommation de temps. Toutefois, les échantillons des données du site doivent être bien sélectionnés. Les registres devraient être répartis sur l'ensemble de la zone d'intérêt et chacun devrait apporter de nouvelles informations à l'étalonnage du modèle. Le minimum de données d'échantillon recommandé est de 30 points bien distribués.

Validation du modèle

En utilisant tous les points d'évidence d'une culture, 25 séries de Maxent ont été effectuées, chacune utilisant 75% des points pour l'entraînement et les 25% restants pour l'essai du modèle. Des paramètres par défaut ont été utilisés, de telle sorte que la complexité du modèle varie en fonction du nombre de points de repère utilisés pour le montage du modèle. Deux mesures de pertinence du modèle ont été utilisées : l'aire sous la courbe CFR (Caractéristique de Fonctionnement de Récepteur) (AUC) (Peterson et al., 2008) et le Maximum Possible de Cohen kappa (Manel et al., 2001) (kmax), appliqués à une sélection aléatoire de Pseudo-absences égale à deux fois le nombre de présences (Serra-Diaz et al., 2013). Ces deux mesures ont été utilisées en raison des limitations éventuelles pouvant résulter de l'utilisation de l'AUC comme la seule mesure d'évaluation du modèle. Lobo et al 2008

Incertitudes liées aux prévisions des modèles

Il est très important d'aborder et de reconnaître les incertitudes liées aux prévisions climatiques ainsi que les différences entre les GCMs utilisés pour la modélisation. Jarvis et al. (2012) établissent que les méthodes d'évaluation d'impact sont sensibles aux incertitudes, et l'évaluation des impacts inhérentes au climat dans des projets d'évaluation d'impact sur le changement climatique, implique explicitement l'utilisation de différents GCMs. Pour considérer l'incertitude inhérente au climat, nous avons utilisé 19 GCMs différents dans notre étude, et produit les cartes finales montrant des statistiques descriptives de différentes prévisions sur une base de pixel : (i) le changement de la moyenne d'ensemble, (ii) le rang centile utilisant le premier quartile (25ème percentile) et le troisième quartile (soixante-quinzième percentile), et (iii) l'accord parmi les (19) résultats de Maxent, calculées comme pourcentage des modèles prévoyant des changements dans la même direction que la moyenne de tous les modèles, à un endroit donné ou pixel.

3.4. Les Options de Diversification

Pour l'évaluation des meilleures options de diversification pour les producteurs de café, l'analyse doit se concentrer sur l'identification des tendances générales pour plusieurs cultures, et la localisation de leurs zones potentielles futures, en considérant l'adéquation climatique. Ecocrop est donc le modèle le plus approprié pour satisfaire à ces exigences.

Pour identifier les options appropriées de diversification pour des agriculteurs de café, nous avons réalisé une analyse tridimensionnelle culture-climat-aptitude, sur les cultures sélectionnées à partir du portefeuille agricole actuel d'Haïti. Ces cultures ont été sélectionnées sur la base de leur importance pour la sécurité alimentaire et le revenu de subsistance, aussi bien que sur des cultures récemment adoptées par des organismes de développement, afin d'améliorer la production agricole future du petit exploitant en Haïti. Comme décrit ci-dessus, nous avons choisi Ecocrop, en raison du fait qu'il est l'instrument le plus approprié pour modéliser des options de diversification, et comparé les résultats des zones d'aptitude climatique avec l'adéquation du sol pour la production. Ceci a été réalisé, en croissant l'aptitude climatique, l'utilisation, et les couches du sol, en prenant en considération, la disponibilité pour l'utilisation agricole des terres arables potentiellement appropriées (Jarvis et Al. 2010).

Pour évaluer la disponibilité du sol pour la production agricole, nous avons téléchargé : Haïti land cover (Echelle 1 :300.000), et Haiti's soil use capacity for agriculture (Echelle 1:250,000), sur le site <http://haitidata.org>. Nous avons combiné les informations issues des deux sites, et les avons reclassifiées dans 5 catégories principales :

- Terres disponibles pour la production agricole (cultivées actuellement, et pâturages) avec une capacité du sol allant du niveau moyen à excellent (disponibles et aucune limitations ; D-AL

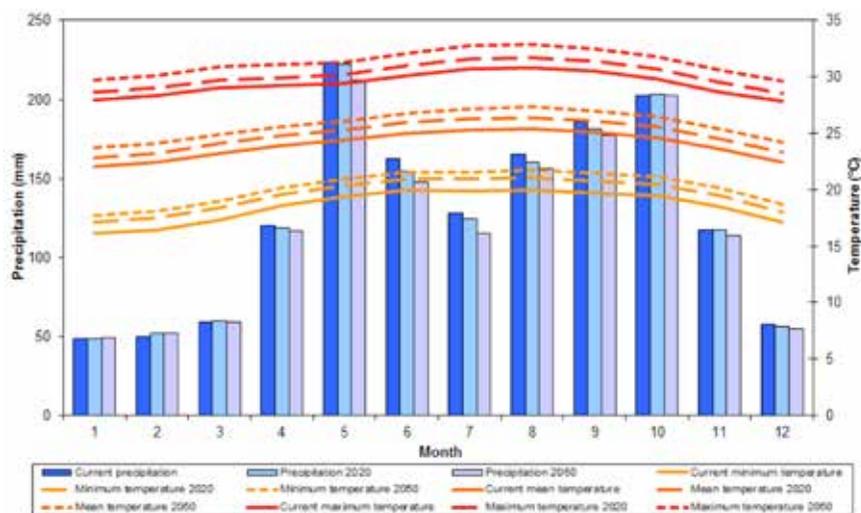
- Terres disponibles pour la production agricole avec des limitations inférieures ou moyennes sur la capacité de sol (disponibles mais, capacité limitée ; D-CL)
- Pas de limitation sur la capacité du sol, mais l'utilisation des terres doit être modifiée (actuellement forêts, agrosylviculture, savanes)
- Capacité du sol limitée, et utilisation des terres doit être modifiée L-M
- Terres non disponibles (terrains habités, étendues d'eau ou terres arides), et capacité de sol très limitée ou exclue pour la production agricole (NA-EX)

Par la suite, nous avons extrait des statistiques spatiales, provenant des analyses d'aptitude climatique basées sur les 5 catégories de terres disponibles, à l'aide d'un système d'Information géographique (SIG). Comme résultat final on obtient, la valeur moyenne d'aptitude climatique dans chaque catégorie de terre disponible, l'écart-type d'aptitude climatique, et le nombre de pixels utilisés pour calculer l'aptitude climatique des régions de production agricole.

4. Résultats

4.1. Prévision de changement Climatique pour Haïti

Après réduction des données moyennes mensuelles des GCMs, en vue de les porter au niveau local, nous avons extrait 19 variables bioclimatiques issues des données actuelles et futures (2020, 2030 et 2050), et produit une description générale de changement climatique pour Haïti, et la partie sud-ouest du pays. L'analyse des tendances climatiques d'Haïti (considéré sur une moyenne de 30 ans), montrent un schéma de pluviométrie bimodale avec deux saisons de pluies, une en mai et l'autre du mois d'août à octobre, suivies par des mois plus secs, de décembre à mars, avec des précipitations maximales atteignant 50mm par mois.



Caractéristiques climatiques générales pour Haïti

- La pluviométrie diminue de 1520 millimètres à 1457 millimètres en 2050 en passant par 1498 en 2020
- L'Augmentation de la température et l'augmentation moyenne est de 1,8 ° c, en passant par une augmentation de 0,9 ° c en 2020
- L'amplitude de température quotidienne moyenne augmente de 10,8 ° c à 11,1 ° c en 2050
- Le nombre maximal de mois secs cumulatif diminue de 5 mois à 4 mois

Conditions Extremes

- La température maximale de l'année passe de 30,9 °C à 32,9 °C, tandis que le trimestre le plus chaud devient encore plus chaud, pour atteindre 1,9 °C d'ici 2050
- La température minimum de l'année grimpe de 16,1 °C à 17,7 °C, tandis que le trimestre le plus froid devient plus chaud 1,7 °C d'ici 2050
- Le mois le plus humide devient plus sec avec 233 millimètres au lieu de 237 millimètres, alors que le trimestre le plus humide devient plus sec, 17mm d'ici 2050
- Le mois le plus sec devient plus sec avec 37 millimètres au lieu de 41 millimètres tandis que le trimestre le plus sec devient encore plus sec, passant à 3 millimètres d'ici 2050

Saisonnalité du climat

- D'une façon générale, ce climat devient plus saisonnier en termes de variabilité au cours de l'année en température et plus saisonnier en matière de précipitation

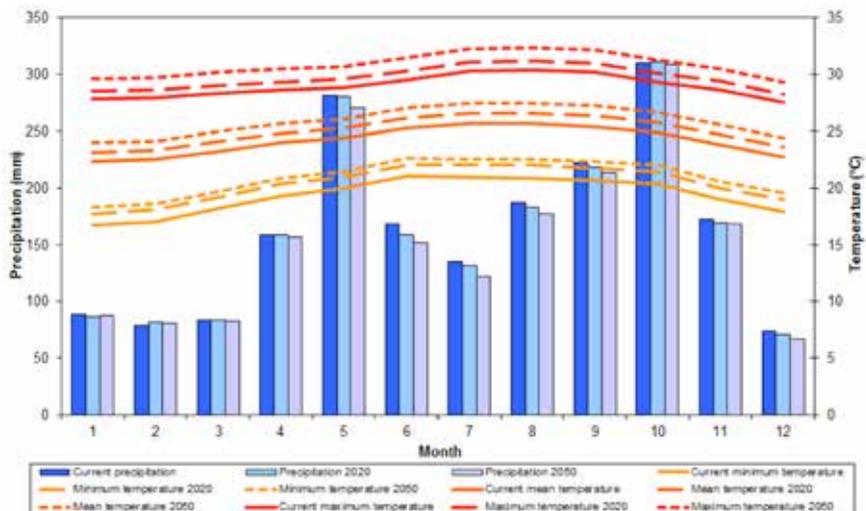
Variabilité entre les modèles

- Le coefficient de variation de prévision de température entre les modèles est de 1.6%
- Les prévisions de température étaient uniformes entre les modèles, ainsi, aucune valeur extrême n'a été détectée
- Le coefficient de variation des prévisions de précipitation entre les modèles est 4,9%
- Les prévisions de précipitation étaient uniformes entre les modèles, ainsi, aucune valeur extrême n'a été détectée.

Figure 3. Prévisions de changement climatique pour Haïti.

Selon l'ensemble des 19 GCMs, la température en Haïti augmentera suivant une moyenne de 0.9°C en 2020 et de 1.8°C d'ici 2050. La température quotidienne moyenne variera de 10.8°C à 11.1°C d'ici 2050. La température du mois le plus chaud passera de 30.9°C à 32.9°C tandis que le trimestre le plus chaud sera 1.9°C, plus chaud d'ici 2050. La température minimum du mois le plus froid augmentera en passant de 16.1°C à 17.7°C, alors que le trimestre le plus froid sera 1.7°C plus chaud d'ici 2050. Les précipitations annuelles totales diminueront marginalement (1%) d'ici 2020 et continueront de diminuer (4%) jusqu'en 2050, alors que le nombre maximum de mois secs cumulatifs diminue de 5 mois à 4 mois. Le mois de Mai demeurera le mois le plus humide mais perdra 2% de son humidité, alors que le trimestre le plus humide deviendra plus sec de 3%

d'ici 2050. On projette que le mois le plus sec deviendra plus sec de 10%, tandis que le trimestre le plus sec deviendra légèrement plus sec, avec 1% de précipitations de moins, d'ici 2050. D'une façon générale on s'attend à ce que le climat devienne plus saisonnier en termes de variabilité de la température à travers l'année, et plus saisonnier en matière de précipitation (Figure 3).



Caractéristiques climatiques générales pour Haïti

- De 1961 millimètres, les précipitations tombent à 1886 millimètres d'ici 2050, en passant par 1934 en 2020.
- Les températures augmentent et l'augmentation moyenne est de 1,7 °C passant par une augmentation de 0,9 °C en 2020.
- La température journalière moyenne passera de 9,6 °C à 9,9 °C d'ici 2050.

Conditions extrêmes

- Le nombre maximum de mois secs cumulatifs maintient la constante pendant 3 mois.
- La température maximale de l'année grimpe de 30,5 °C à 32,5 °C, tandis que le trimestre le plus chaud devient plus chaud de 1,8 °C d'ici 2050.
- La température minimum de l'année grimpe de 16,8 °C à 18,3 °C, tandis que le trimestre le plus froid devient plus chaud de 1,7 °C d'ici 2050.
- Le mois le plus humide devient plus humide avec 313 millimètres au lieu de 313 millimètres, alors que le trimestre le plus humide devient plus sec de 17 millimètres d'ici 2050.
- Le mois le plus sec devient plus sec avec 62 millimètres au lieu de 68 millimètres tandis que le trimestre le plus sec devient plus sec de 6 millimètres d'ici 2050.

Caractère saisonnier de climat.

- De façon générale ce climat devient plus saisonnier en termes de variabilité au cours de l'année au regard de la température et plus saisonnier au regard de la précipitation

Variabilité entre les modèles

- Le coefficient de variation des prévisions de la température entre les modèles est 1,4%.
- Les prévisions de la température étaient uniformes entre les modèles et aucune valeur extrême n'a été détectée.
- Le coefficient de variation des prévisions de précipitation entre les modèles est 4,2%.
- Les prévisions de précipitations étaient uniformes entre les modèles et aucune valeur extrême n'a été détectée.

Figure 4. Prévisions de changement climatique pour les départements du sud-ouest.

Le Figure 4 montre l'analyse des tendances de climat pour le département du Sud d'Haïti. Les changements prévus sont semblables pour la température et les régimes de précipitations, sauf que les précipitations sont généralement plus élevées dans les Départements du sud, et Octobre remplace Mai comme mois le plus humide.

4.2. Prévisions climatiques futures aux échelles régionales spécifiques

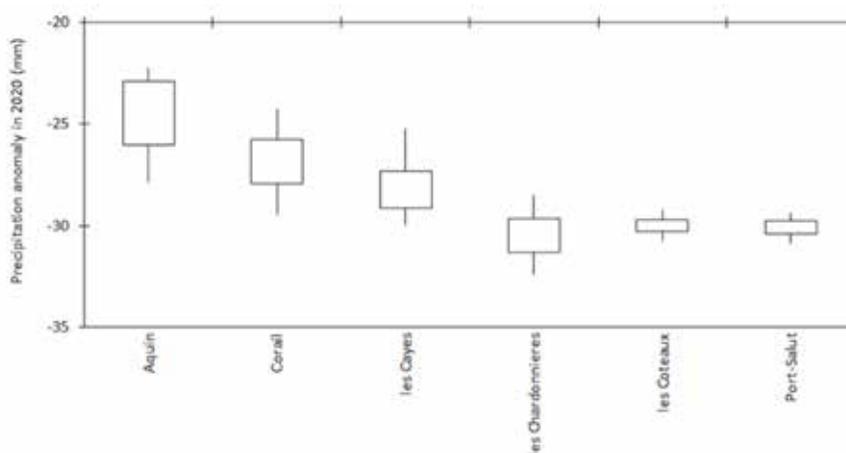


Figure 5. Changements dans les précipitations annuelles moyennes d'ici 2020 dans les communautés ciblées par le projet

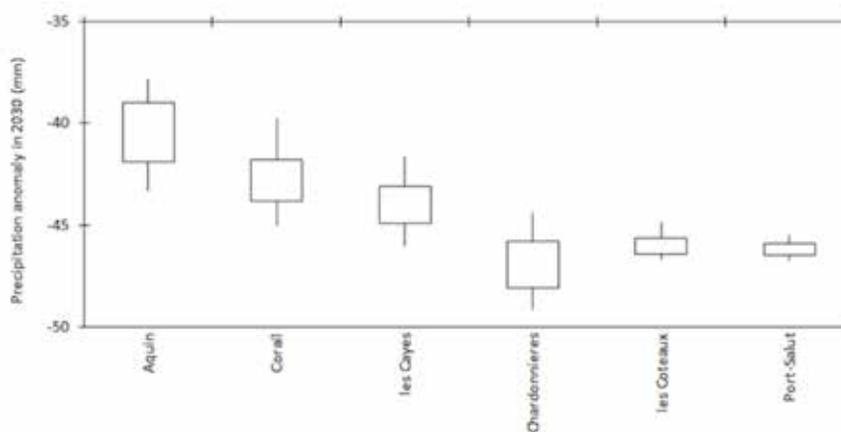


Figure 6. Changements dans les précipitations annuelles moyennes d'ici 2030 dans les communautés ciblées par le projet

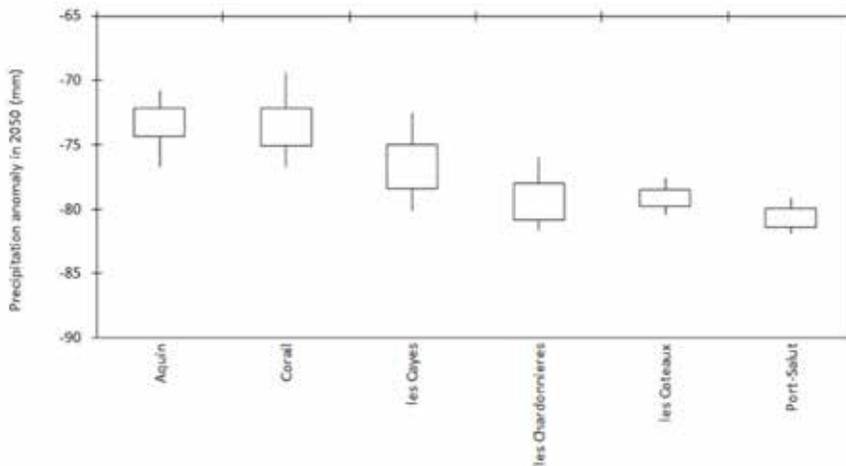


Figure 7. Changements dans les précipitations annuelles moyennes d'ici 2050 dans les communautés ciblées par le projet

D'ici 2050 la pluviométrie est réduite dans toutes les municipalités, avec des pertes généralement comprises entre 70 et 80 mm. Bien que la diminution de la pluviométrie soit généralement modérée dans toutes les prédictions futures, celle-ci, pourrait causer des déficits en eau, lorsqu'elles seront associées à une augmentation des températures minimales, moyennes et maximales. Ces augmentations pourraient provoquer un taux plus élevé d'évapotranspiration des plantes, ce qui déclencherait un stress thermique et un déficit en eau dans les sols. L'accroissement des tensions dû à la température, et en particulier les températures nocturnes (> 18 °C), et des conditions de sécheresse, ont des effets substantiels sur la production de biomasse et les étapes reproductrices de plusieurs plantes et cultures.

4.3. Impact des changements climatiques sur le café

Le Café en Haïti

La Figure 8 indique les diverses régions de production du café en Haïti. Bien que le café soit cultivé dans tous les dix Départements d'Haïti, l'intensité de la production varie considérablement, et en général il y a cinq principales zones de production, chacune, située dans différents départements du pays. Par ordre d'importance au niveau des quantités produites, on retrouve : Grand'anse, Sud-Est (Thiotte and Jacmel), le North, le Centre (Baptiste and Cahos). Les cinq zones sont divisées en deux régions : Nord et Sud. Grand'anse et Sud'est sont localisés dans le Sud du pays, et ensemble forment la plus grande région de production nationale (Arias et al., 2006).

Les zones de production de café dans la région Sud sont la plupart concentrées dans le Département de la Grand-anse. En 1995, les plantations caféières dans les Départements de la Grand-anse, du Sud et du Nord, représentent la moitié des superficies totales du pays plantées en café. Six municipalités dans le Sud constituent des régions potentielles pour la production de café de haute qualité : *Beaumont, Roseaux, Jérémie, Tiburon, Les Anglais, Port-à-Piment*. (Rodríguez et al., 2011)

Caractéristiques des zones de production (Amaya et al., 1999)

Nord (Plaisance et Dondon): A Plaisance et Dondon, la production du café se fait à une altitude comprise entre 400 et 700 mètres au-dessus du niveau de la mer. Plaisance a de mauvaises routes et un sol argileux; sa production tombe. Plaisance aussi bien que Dondon sont dominés par de très petites exploitations dans lesquelles, le café fait partie d'un système d'agriculture de subsistance traditionnel, avec le cacao, la banane, l'avocat, les mangues, les figues-bananes, l'arbre à pain et d'autres cultures qui sont très importantes pour la gestion des risques, et la subsistance familiale. La variété prédominante de café est : Typica.

Centre (Baptiste et Savanette):

Dans le département de Centre, Baptiste est une zone traditionnelle de production de café. Dans cette région, la production se réalise sur de très petites fermes à des altitudes variant entre 1,000 et à 1,200 mètres au-dessus du niveau de la mer. Dans cette région le sol est rocailleux, et la caféiculture ici est plus spécialisée que dans le Nord. Les producteurs utilisent des engrais et d'autres intrants agricoles et selon les témoignages d'agriculteurs interrogés par l'équipe, c'était une zone importante de production de café avant la chute des prix qui a pour effet de décourager les producteurs et porter les exportateurs importants à abandonner leurs opérations. La variété "Typica" est prédominante.

Sud-Est (Thiotte):

Thiotte continue d'être l'une des principales régions de production de café du pays (60.000 sacs). La production se réalise dans des fermes, de dimension, allant de petite à moyenne (de 1 à 16 Ha), et à des altitudes, allant de 900 à 1.500 mètres au dessus du niveau de la mer. La variété Typica prédomine. L'altitude de la plantation de café s'étend entre 400 mètres dans le nord à 1.300 mètres à Thiotte et Beaumont. Les plantations de café étaient historiquement plus répandues dans les neuf départements du pays. Actuellement, cependant, excepté les régions de Thiotte, de Baptiste, de Beaumont et de Dondon, où la densité de la plantation de café est encore élevée, les plantations caféières dans d'autres régions est limité. (Évaluation des risques des chaînes d'approvisionnement du café d'Haïti, 2010)



Figure 8. Cartographie du secteur café en Haïti

Impact des changements climatiques

Dans la prochaine section, nous quantifierons l'impact des changements climatiques sur l'aptitude des sols à produire du café en Haïti. Les changements dans les températures et les précipitations, vont entraîner une diminution générale des zones appropriées à la culture du café, et réduire les zones qui possèdent actuellement une forte aptitude climatique (très bonne, ou excellente pour la production du café). L'aptitude climatique augmentera selon des gradients altitudinaux, vers des climats actuellement plus froids. Les modèles prévoient, que le café perdra en aptitude climatique à basse altitude (jusqu'à 1200 mètres au-dessus du niveau de la mer), et gagnera en aptitude dans les zones plus élevées avec une aptitude climatique maximale entre 1500 et 1800 m d'ici à 2050 (Figure 10).

L'évolution des conditions climatiques en Haïti pourrait également réduire la qualité et les rendements des régions actuelles de production de café, et il est probable que ceci prévaut davantage dans les zones d'altitude plus basse. En outre, des pertes économiques pourraient s'ensuivre à l'avenir, si les efforts d'adaptation ne sont pas mis en œuvre. Pourtant, Il y a de nombreuses opportunités d'adaptation aux changements et, pour les zones de production de café dont l'aptitude baissera mais ne chutera pas radicalement, l'adaptation proactive est une stratégie cruciale. Ces stratégies incluent une gestion agronomique améliorée, l'utilisation de variétés résistantes à la chaleur et à la sécheresse, l'irrigation et la couverture d'ombrage.

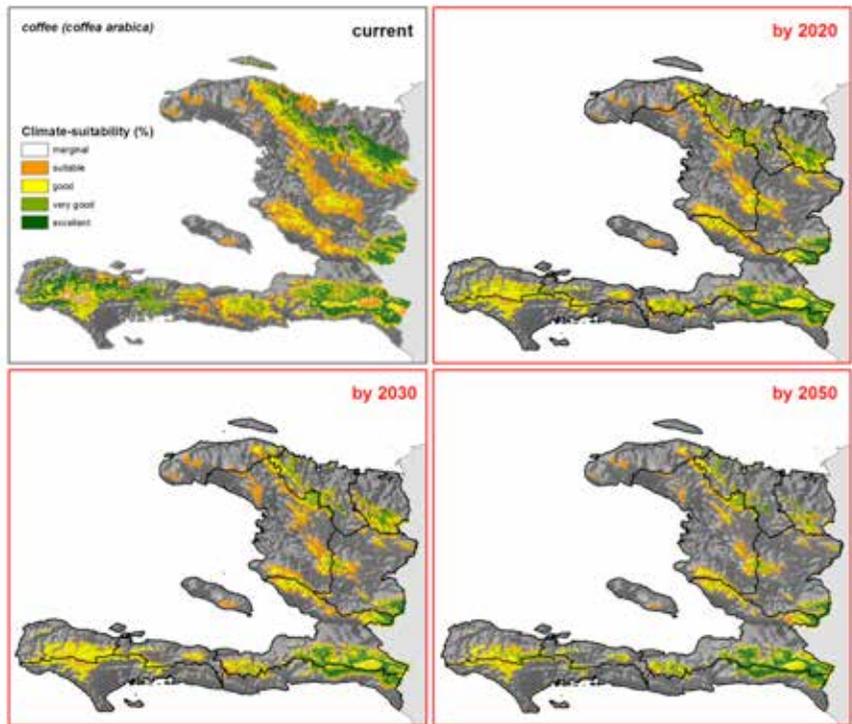


Figure 9. L'Aptitude climatique du café

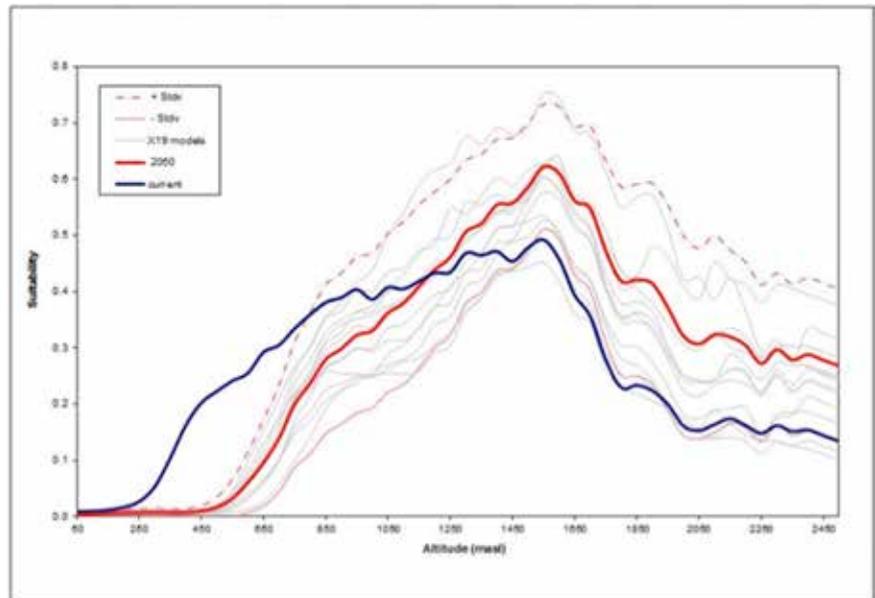


Figure 10. L'Aptitude du café selon les altitudes

4.4 Impact des changements climatiques sur la mangue

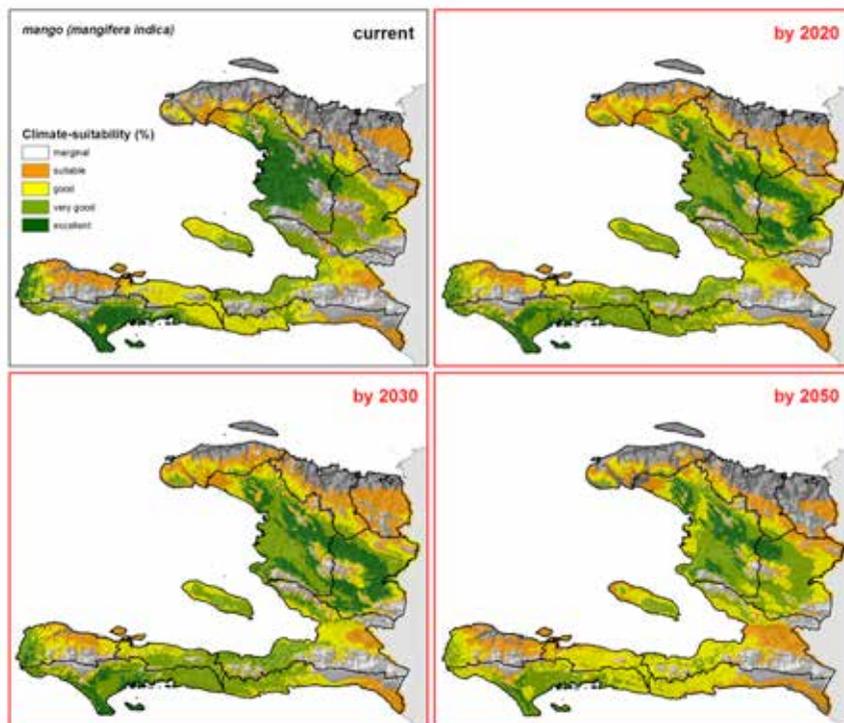


Figure 11. Aptitude climatique de la mangue

La mangue restera dans le futur, une culture hautement appropriée dans de nombreuses régions d'Haïti. Les prévisions montrent qu'à partir de 2020, certaines zones passeront d'excellentes à très aptes et se déplaceront géographiquement depuis des zones concentrées proches de la côte vers des zones plus hautes à l'intérieur des terres (Figure 11). Les altitudes de 500 à 700 mètres au-dessus du niveau de la mer bénéficieront d'une augmentation de l'aptitude climatique, principalement grâce à une augmentation des températures (Figure 12), mais le rayonnement solaire est très important pour la production de mangue de haute qualité et les régions intérieures pourraient être moins privilégiées à cause de la couverture de nuages plus fréquente (qui n'est pas incluse dans notre modèle). Généralement, les stratégies d'amélioration de la chaîne de valeurs de la mangue en Haïti, ne feront pas face aux contraintes importantes liées aux conditions climatiques, et devraient se concentrer sur le développement organisationnel et commercial des réseaux de collaboration existants au sein de l'industrie. Aussi, beaucoup peut être fait en améliorant la gestion agronomique et en renforçant les capacités des agriculteurs, en incluant les techniques de contrôle des ravageurs et maladies et les systèmes de plantations améliorées.

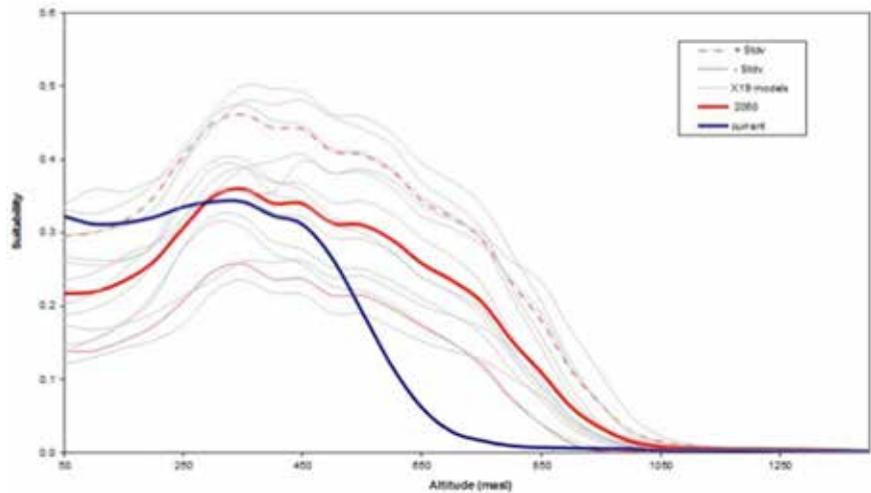


Figure 12. Les aptitudes de la mangue selon l'altitude

4,5. Incertitudes, facteurs déterminants et validation croisée

Validation du modèle Maxent

La performance du modèle Maxent était généralement élevée pour le café, avec des valeurs AUC (kappa) variant entre 0.76 (0.85) et 0.89 (0.94) pour les données d'essai (25%) et presque aucune variation pour les données de train (75%) (Figure 13). Dans le cas de la mangue (Figure 14), la haute variation peut être observée pour les données d'essai avec les valeurs d'AUC (kappa) entre 0.72 (0.71) et 0.98 (0.89). La haute performance du modèle a aussi produit des incertitudes relativement basses par rapport à la ligne de référence. Ces incertitudes sont surtout provoquées par les paramètres du modèle (c'est-à-dire un modèle de régression différent de Maxent est généralement obtenu pour chacun des doubles), et par l'emplacement des données recueillies.

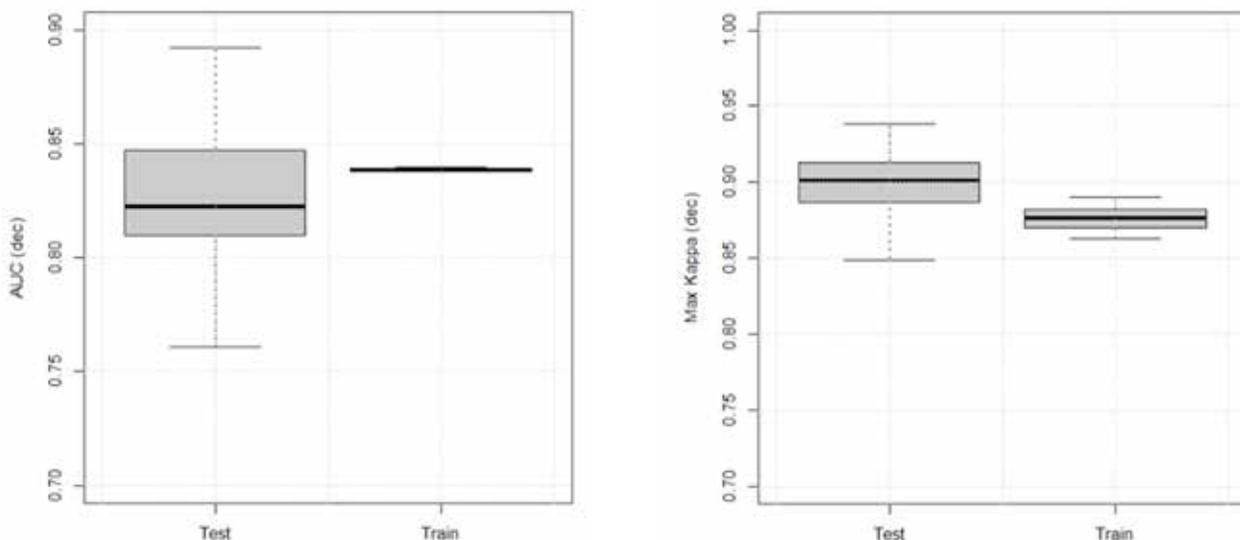


Figure 13. Performance du modèle Maxent pour le café à travers les 25 répliques

AUC, et le maximum Cohen's kappa. Cette ligne noire horizontale Indique la moyenne, la boîte est comprise entre 25 et 75% et les lignes verticales indiquent l'intervalle de la distribution 5-95%

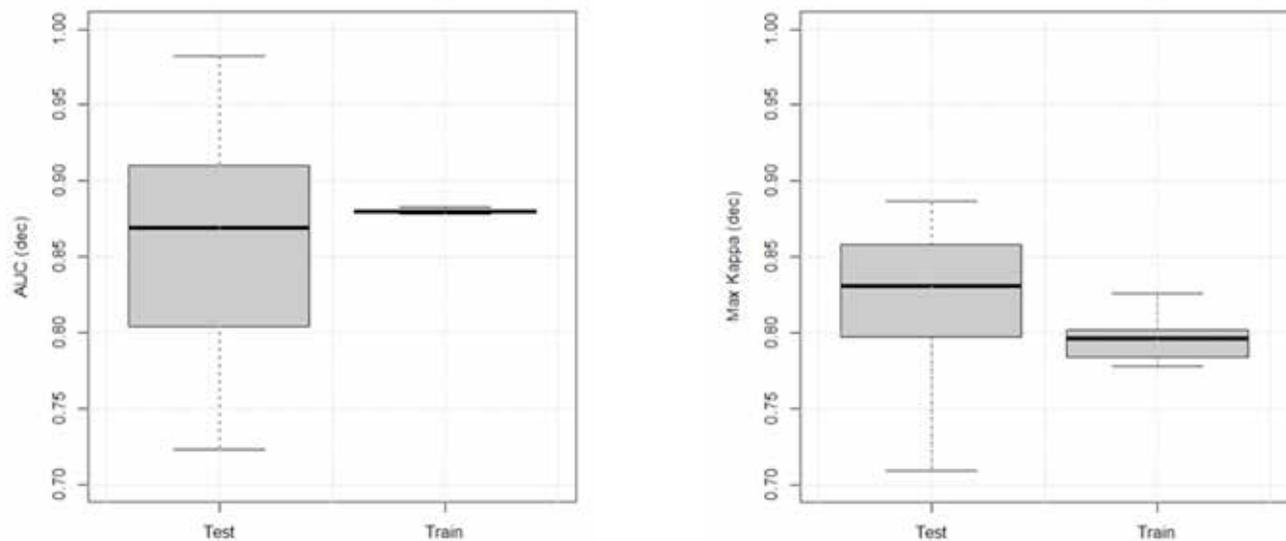


Figure 14. Performance du modèle Maxent pour la mangue à travers les 25 répliques

AUC, et le maximum Cohen's kappa. Cette ligne noire horizontale Indique la moyenne, la boîte est comprise entre 25 et 75% et les lignes verticales indiquent l'intervalle de la distribution 5-95%

Facteurs environnementaux qui influencent l'aptitude

Dans cette section nous mettons en relief la contribution de différentes variables bioclimatiques au changement d'aptitude prévu pour le café et la mangue, séparée par deux régions géographiques ; le sud-est et la partie nord, et la région du sud-ouest d'Haïti.

Selon l'analyse de régression du changement d'aptitude d'ici 2050, une augmentation dans les précipitations du trimestre le plus humide (bio_16) favoriserait l'aptitude du café dans le sud-est et le nord d'Haïti, cependant, dans cette zone, les précipitations du trimestre le plus humide diminuent suivant une moyenne de 18,5 mm d'ici 2050, et explique en partie la perte d'aptitude dans cette zone (Figure 15).

La période sèche correspond à la phase de croissance passive de la récolte, et est importante pour stimuler la floraison (Damatta et Al. 2007), donc une augmentation des chutes de pluie durant la saison sèche pourrait causer des déficits d'azote, l'accélération de la chute des fruits, ou une réduction de la croissance de la plante. La variable qui influence le plus le changement d'aptitude, est la précipitation au cours du trimestre le plus sec (bio_17). Un millimètre de précipitation de plus pendant cette phase, diminuera l'aptitude de 7.1% (Figure 15).

Variable	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Change
	B	Std. Error	Beta			
bio_13	-.010	.003	-.253	-3.151	.002	-5.3 mm
bio_16	.005	.002	.354	3.100	.002	-18.5 mm
bio_17	-.071	.005	-.747	-13.081	.000	-0.56 mm
bio_8	-.010	.002	-.639	-5.001	.000	18.3 °C

R² = 0.83, n=162, Dependent variable = Suitability change 2050

Figure 15. Facteurs d'entraînement du modèle café dans le Nord et le Sud-est

Variable	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Change
	B	Std. Error	Beta			
bio_18	-.004	.001	-.285	-5.016	.000	-27.5 mm
bio_3	.199	.052	.201	3.840	.000	-0.4
bio_8	-.028	.002	-1.037	-15.078	.000	17.9 °C

R² = 0.96, n=45, Dependent variable = Suitability change 2050

Figure 16. Facteurs d'entraînement du modèle café dans le Sud-ouest.

La figure 16 montre que l'augmentation de température est rattachée à la perte de régions convenables à la culture du café dans le Sud-ouest. En général, l'augmentation de la température moyenne au cours du trimestre le plus humide (bio_8) en moyenne 1.8°C d'ici 2050, explique la perte d'aptitude dans cette partie d'Haïti.

Pour la mangue, les variables de précipitation expliquent en grande partie les changements projetés sur l'aptitude dans le Sud-est et le Nord d'Haïti. Une augmentation des précipitations au cours du trimestre le plus froid (bio_19), ne favoriserait pas l'aptitude de la culture, et conduirait à une diminution de 7%, pour chaque unité de précipitation (Figure 17).

Variable	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Change
	B	Std. Error	Beta			
bio_13	.009	.002	.565	5.488	.000	-7.8 mm
bio_14	.016	.004	.319	3.943	.000	-2.2 mm
bio_16	-.007	.001	-1.097	-8.013	.000	-20 mm
bio_17	.058	.007	.798	8.908	.000	0.2 mm
bio_19	-.072	.005	-1.593	-13.847	.000	1.7 mm

R² = 0.77, n=152, Dependent variable = Suitability change 2050

Figure 17. Facteurs d'entraînement du modèle mangue dans le Nord

Variable	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Change
	B	Std. Error	Beta			
bio_18	0.003	0.000	0.685	7.897	0.000	-37 mm
bio_13	0.013	0.005	0.244	2.816	0.007	-1.5 mm

R² = 0.69, n=56, Dependent variable = Suitability change 2050

Figure 18. Facteurs d'entraînement du modèle mangue dans le Sud-ouest et le Sud-est

Dans le sud-ouest de l'île, une augmentation des précipitations du mois le plus humide (bio_13), et du trimestre le plus chaud (bio_18), produirait des gains au niveau de l'aptitude de la mangue. Pourtant, l'analyse de régression du point montre des diminutions dans ces deux variables et explique la perte de conformité projetée (Figure 18). Il doit être noté qu'une insuffisance d'eau est préjudiciable à la récolte, en affectant la croissance de fruit, et en réduisant la taille qui influence la production de la culture.

Incertitudes sur les prévisions d'aptitude futures

L'incertitude de notre modélisation d'aptitude a été adressée en utilisant tous les GCMs disponibles et la mise en œuvre de séries séparées à l'aide du modèle-Maxent. Les résultats ont été comparés en utilisant les moyennes des statistiques descriptives. Nous avons calculé la valeur moyenne pour chaque cellule de la grille de tous les 19 GCMs sur le scénario d'émissions SRES-A2, la moyenne du premier quartile des modèles qu'on peut également appeler le scénario pessimiste, la moyenne du troisième quartile a également établi le scénario très optimiste, et le pourcentage des modèles concordants sur la direction de leurs prévisions (négatif, aucun - ou positif - changement) relatif à chaque cellule de la grille.

La figure 19 montre qu'il y a incertitude au niveau des résultats du modèle mais, certaines zones démontrent qu'il existe toujours un niveau très élevé de concordance entre les modèles. Par exemple, Vallières dans le nord-est d'Haïti montre un changement négatif d'aptitude dans le scénario pessimiste et optimiste, avec un niveau élevé de concordance entre les modèles (zones grises, claires), tandis que Croix-des-Bouquets et Belle-Anse montrent des changements positifs dans certaines zones dans les deux scénarios. Dans le Sud-ouest, aux environs du Parc National Pic Macaya, la moyenne de tous les modèles, et le scénario optimiste montrent un changement positif, alors que le scénario pessimiste ne montre aucun changement. L'incertitude du modèle Maxent pour la mangue (Figure 20), montre une grande différence entre les scénarios de changement d'aptitude optimiste et pessimiste. Comme le café, quelques zones affichent des changements positifs dans tous les 3 scénarios (Centre, Ouest, Nord).

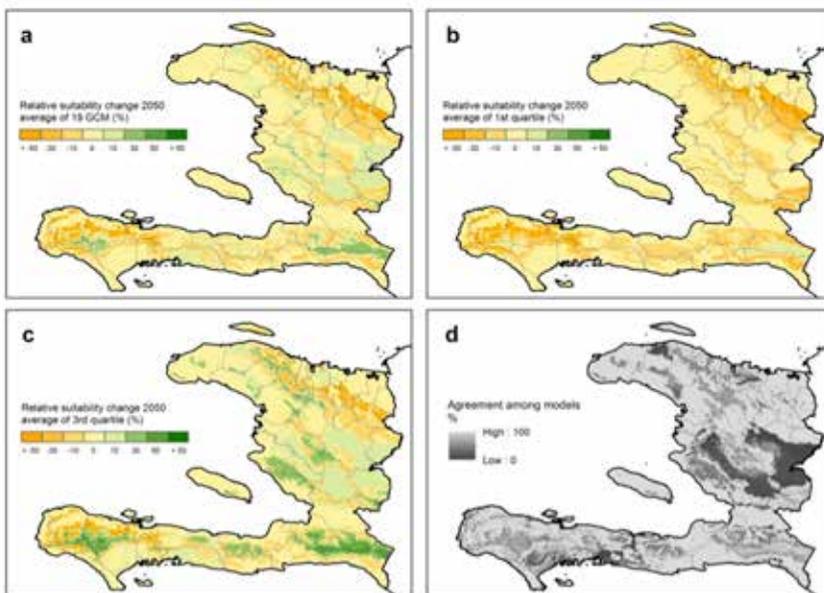


Figure 19. Incertitude des résultats du modèle Maxent pour le café, en utilisant les 19 GCMs

a) *Changement relatif d'aptitude résultant de la moyenne des 19 GCMs pour 2050*, b) *Moyenne du 1^{er} quartile des GCMs*, c) *Moyenne du 3rd quartile des GCMs*, et d) *Ampleur des GCMs concordants sur les prévisions de changement d'aptitude par Maxent.*

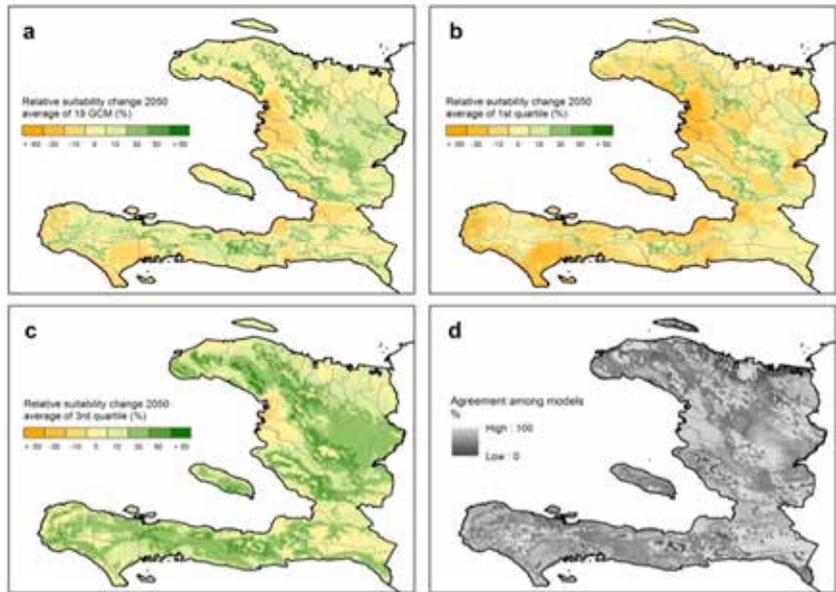


Figure 20. Incertitude du modèle Maxent pour la mangue.

4.6. Les Options de Diversification

L'impact potentiel du changement climatique sur les productions des cultures agricoles varie dans l'espace, et dépend des contraintes biophysiques spécifiques à chaque culture. En Haïti, les terres destinées à l'agriculture s'étendent sur plus de 1,7 million d'hectares, soit 60% de la surface du pays (FAO 2013). A l'intérieur de ces zones, la production agricole est conditionnée aux différents régimes climatiques, ainsi que d'autres contraintes, telles que l'érosion des sols, la capacité très variable du sol, et la prévalence de l'utilisation des terres. Nous avons évalué les contraintes climatiques sur différentes options de diversification de culture, à l'aide des GCMs, et le modèle empirique EcoCrop. Les résultats pour les changements dans l'espace au niveau des dimensions culture-climat-aptitude, étaient alors comparés avec les indicateurs de disponibilité des terres, et la capacité des sols (Figure 21), pour finalement obtenir une classification des différentes options de diversification pour les agriculteurs de café en Haïti.

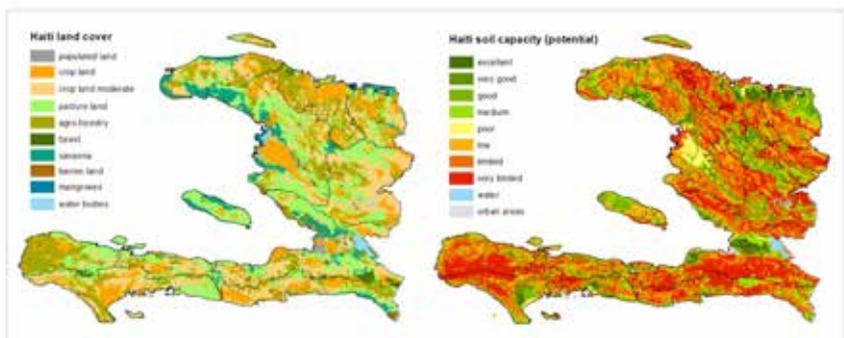


Figure 21. Données Géographiques

Disponibilité des terres en Haïti (Echelle 1:300,000) - Année 2008, et capacité des sols en Haïti pour l'agriculture (Echelle 1:250,000) - Année 1998; préparé par le Centre National d'Information Géospatial (CNIGS) d'Haïti; téléchargé de <http://www.haitidata.org>

Nous avons choisi 6 cultures différentes, y compris les cultures vivrières et commerciales. Mais, Sorgho, Haricot sec, et Igname sont des cultures qui sont cultivées sur des superficies allant de 46 à 430.000 Hectares. L'Arachide est cultivée principalement par des agriculteurs à faibles ressources, sur des fermes collinaires, ayant une capacité du sol limitée, et peu d'investigations ont été menées sur leur rôle et leur marché potentiel. En raison de cela, étant cultivé en systèmes agro forestiers, le cacao a un potentiel élevé pour contribuer, et à l'adaptation des moyens de subsistance, et à la réduction de changement climatique. Ces six cultures de diversification mises ensemble, occupent plus de 0,7 millions d'hectares (soit environ 60% des terres agricoles d'Haïti). en 2011 (tableau 3).

Tableau 3. Superficies cultivées en cultures de diversification en Haïti (Superficie en Hectares)

	Pois Sec	Igname	Mais	Arachide	Sorgho	Cacao	Total
2009	102,240	58,582	379,000	25,000	120,000	21,963	706,785
2010	98,196	54,846	402,000	22,280	166,678	21,966	765,966
2011	90,804	46,240	430,000	24,521	149,935	21,971	763,471

© FAO 2013 FAOSTAT <http://faostat3.fao.org/home/index.html> accessed and downloaded: 15th July 2013

Pour évaluer la disponibilité des terres pour la production agricole, nous avons calculé les superficies disponibles au sein de 5 catégories, et comparé les statistiques zonales, extraites de l'aptitude climatique. Les résultats montrent, que 396.983 hectares (14%) des terres agricoles d'Haïti sont disponibles, et la capacité du sol est comprise entre moyenne et excellente dans ces zones. Ensuite, 532.131 hectares (19%) sont disponibles, mais les agriculteurs produisent sur des sols à capacité limitée. Presque la même taille est disponible, et englobe des zones où un changement dans l'utilisation des terres s'avère nécessaire, du moins pour certaines cultures, comme le maïs, le sorgho ou les haricots. D'autres cultures comme le cacao et le café y sont déjà cultivées, par exemple dans des systèmes d'agrosylviculture, et pourraient s'étendre dans ces zones. La distribution des secteurs dans les 5 catégories est semblable dans les 3 départements du sud-ouest (tableau 4).

Tableau 4. Terres disponibles pour la production agricole versus capacité du sol en Haïti

TD (Terres Disponibles), BC (Besoin de Changement dans l'utilisation des terres) et ND (non Disponible). CS (Capacité du Sol) PL (Pas de Limites), LI (limitations Inférieures) et EX (Exclu).

	TD-PL	TD-LI	PL-CN	LI-CN	ND-EX	Total (ha)
Pays (Haïti)	396,983	532,131	294,688	646,124	880,082	2,750,008
Départements (Sud, Nippes, Grand Anse)	80,641	121,957	58,968	175,801	140,624	577,991

Cacao

Haïti possède une excellente aptitude climatique pour le cacao dans beaucoup de régions, et il n'est pas prévu qu'il sera affecté par des changements de régimes climatiques à long terme La figure 22 indique que l'indice d'aptitude climatique reste plus ou moins le même, ou augmentera légèrement dans la plupart des régions. Bien que l'aptitude

augmente davantage dans des régions non disponibles, (+10% dans le pays entier et +15% dans des départements du sud) classées comme ND-EX, il existe encore beaucoup de régions potentielles à l'intérieur du pays, et de nouveaux systèmes potentiels d'agroforesterie, pourraient être créés à l'avenir. Les producteurs du cacao d'Haïti ont une opportunité de tirer avantage d'une demande globale croissante de production de cacao. Les principaux problèmes de petits volumes de production, de faiblesse de la qualité, les problèmes persistants avec les organisations de producteurs fragiles, doivent être le principal objectif des organisations de développement, dans leur tentative d'amélioration du secteur.

Pays Haïti																			
Actuel				futur 2050				changement		Actuel				futur 2050				changement	
indice	surface (ha)	S (%)	STD	surface (ha)	S (%)	STD	S	Surface	indice	Surface (ha)	S (%)	STD	Surface (ha)	S (%)	STD	S	Surface		
TD-ND	224,915	87	19	204,506	90	17	3	-9%	TD-ND	59,651	82	18	57,577	87	17	5	-3%		
TD-LI	372,757	87	18	367,945	91	16	4	-1%	TD-LI	106,526	86	18	106,775	91	15	6	0%		
PL-BC	146,348	89	17	141,039	90	17	1	-4%	PL-BC	46,709	87	17	44,220	88	17	2	-5%		
LI-BC	453,232	86	18	450,412	90	17	4	-1%	LI-BC	156,470	88	17	154,396	90	16	2	-1%		
ND-EX	456,385	86	19	502,679	92	15	5	10%	ND-EX	100,967	85	18	115,237	91	15	7	14%		

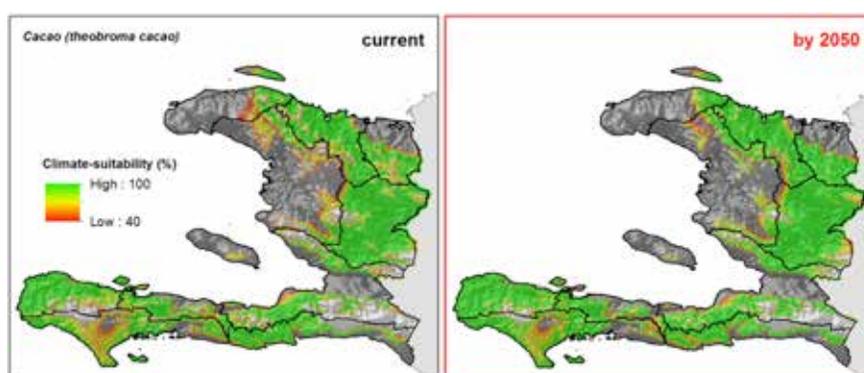


Figure 22. Aptitude actuelle et future du cacao (d'ici 2050)

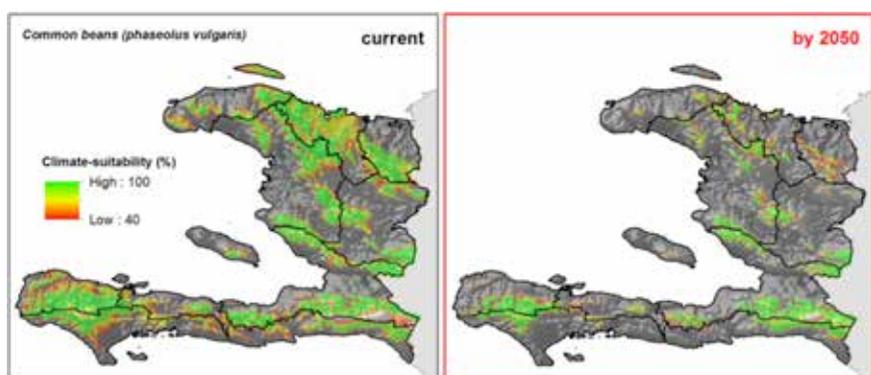
Les Colonnes indiquent l'indice de disponibilité des terres, les superficies en (Ha), l'aptitude (S), l'écart-type d'aptitude au sein de la catégorie (STD), l'aptitude future et changement d'aptitude ; pour Haïti et Les Départements du Sud-ouest

Haricot commun

Les haricots constituent l'une des principales cultures cultivées en Haïti, et le rendement des variétés locales est médiocre, en raison de la forte prévalence des maladies, et du faible accès des agriculteurs aux variétés améliorées. Au lieu de tenir compte des variétés locales dans notre analyse d'aptitude, nous avons utilisé des paramètres climatiques globaux pour les haricots communs, sur la base des résultats de nombreuses années de recherche sur les haricots, au Centre International d'Agriculture Tropicale, et des instituts de recherche connexes de la région. Contrairement à l'Andean Gene Pool, qui est adaptée aux climats froids, la Mesoamerican Gene Pool est adaptée à des températures plus élevées, et à des altitudes basses (400 m), et moyenne (2.000 m) au-dessus du niveau de la mer.

Les environnements fortement appropriés pour la culture des haricots en Amérique Centrale et la Caraïbe, sont les plus limités actuellement par des températures maximales (Beebe et Al. 2011).

Nos analyses montrent (Figure 23) que l'aptitude des haricots diminuera de manière tout à fait sensible dans plusieurs régions d'Haïti, qui sont actuellement les régions de production les plus importantes (jusqu'à -70% des surfaces ont un climat approprié, sont disponibles, et sans limitations en matière de capacité du sol). Actuellement, la plupart de ces régions sont limités par des températures maximales et pourraient en conséquence tirer profit des variétés résistantes et tolérantes à la chaleur (Beebe et Al. 2011). Il y a un fort besoin d'introduire des variétés améliorées qui sont moins sensibles à la chaleur, et un besoin d'équiper les agriculteurs d'outils nécessaire, et de leur fournir les connaissances capables de leur permettre de combler le fossé par rapport au rendement de la production actuelle.



Pays (Haïti)								Departments du Sud-ouest (Sud, Nippes, Grand Anse)											
		Actuel			Futur 2050			Changement				Actuel			futur 2050			changement	
indice	Surface (ha)	S (%)	STD	Surface (ha)	S (%)	STD	S	Surface	indice	Surface (ha)	S (%)	STD	Surface (ha)	S (%)	STD	S	Surface		
TD-ND	114,822	70	19	34,679	79	20	9	-70%	TD-ND	21,654	69	23	6,637	73	19	4	-69%		
TD-LI	279,257	78	20	110,757	75	21	-3	-60%	TD-LI	71,432	75	20	22,483	73	21	-2	-69%		
PL-BC	90,265	74	20	28,789	81	20	7	-68%	PL-BC	22,898	72	22	5,890	84	20	12	-74%		
LI-BC	406,607	79	20	153,732	74	22	-5	-62%	LI-BC	116,813	74	20	30,697	79	22	5	-74%		
ND-EX	461,695	82	20	262,581	81	20	0	-43%	ND-EX	112,997	84	18	69,275	83	19	-2	-39%		

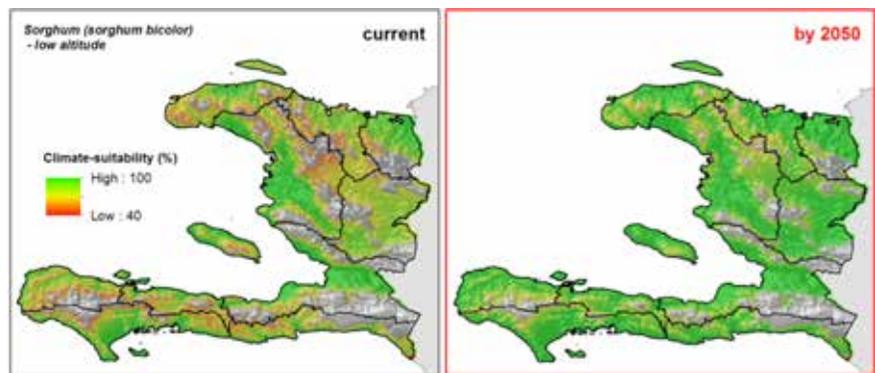
Figure 23. Aptitude actuelle et future du Haricot commun (d'ici 2050)

Mais et Sorgho

Les études statistiques réalisées sur le rendement de maïs ont clairement révélé une réponse très négative de rendement aux jours accumulés où la température s'élève au-dessus de 30°C (voir l'augmentation prévue de la température moyenne du mois le plus chaud de 30,9 à 32,9°C d'ici 2050 au chapitre 4,1), et aux précipitations saisonnières. Ceci est associé à l'effet de l'évapotranspiration accrue qui contribue au stress hydrique, lequel est trois fois plus réactif à un réchauffement de 2°C qu'à une réduction des précipitations de 20% (Lobell et Al. 2013). En tenant compte de cette réponse spécifique du maïs par rapport à une augmentation du nombre de jours où la température est élevée, la modélisation aptitude-climat sur une base mensuelle est très incertaine, en raison du fait que les influences de la température maximale ne sont pas bien représentées en utilisant les données climatiques moyennes mensuelles, et 300 C comme paramètre de température maximale. Les séries préliminaires d'Ecocrop présente

des impacts élevés sur l'aptitude, en raison du changement climatique (réduction d'aptitude jusqu'à 30%), et des pertes de vastes zones pour la production d'ici 2050. Nous avons décidé en conséquence de ne pas inclure les résultats de maïs dans ce rapport, en vue d'éviter des hypothèses prématurées, mais nous mettons l'accent sur le fait que des stratégies appropriées de gestion et de développement de cultures, pour faire face à la chaleur extrême sur des variétés de maïs, devraient être une priorité pour les travaux futurs en Haïti.

En considérant les paramètres climatiques calibrés de Ramirez-Villegas et Al. (2011), le sorgho augmentera son aptitude en Haïti, suivant un taux compris entre 4 et 8%, sur des sols sans aucune capacité, ou à capacité limitée. Ces régions augmenteront de 15% à l'échelle de pays et de 13% dans les 3 départements du sud-ouest. Les zones les plus élevées en altitude, et les augmentations d'aptitude seront distribuées dans l'espace, sur des terres non disponibles, et ou avec des limitations élevées sur la capacité du sol pour la production agricole.

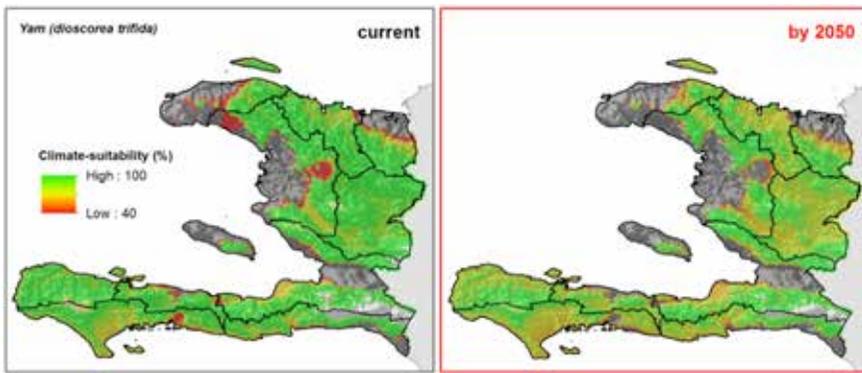


Pays (Haïti)									Départements du Sud-ouest (Sud, Nippes, Grand Anse)								
Actuel			Futur 2050			Changement			Actuel			future 2050			Changement		
index	Surface (ha)	S (%)	STD	Surface(ha)	S (%)	STD	S	Surface	index	Surface (ha)	S (%)	STD	Surface (ha)	S (%)	STD	S	Surface
TD-ND	354,339	90	10	364,129	97	7	6	3%	TD-ND	74,999	93	10	77,488	97	7	4	3%
TD-LI	396,319	85	11	442,613	93	10	7	12%	TD-LI	105,032	84	12	115,403	92	11	8	10%
PL-BC	256,857	89	10	267,725	96	7	7	4%	PL-BC	55,586	90	10	57,411	96	8	6	3%
LI-BC	441,368	82	10	519,189	91	10	9	18%	LI-BC	152,156	82	11	162,278	92	10	10	7%
ND-EX	560,007	86	11	650,272	92	10	6	16%	ND-EX	83,379	79	13	104,037	86	12	8	25%

Figure 24. Aptitude actuelle et future du sorgho d'ici 2050

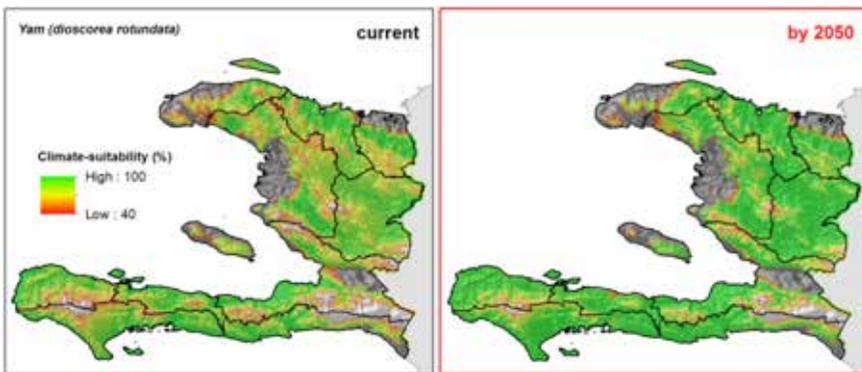
Igname et Malanga

Il existe approximativement 600 espèces d'ignames (espèces de *dioscorea* spp) et 6 d'entre elles sont les espèces les plus cultivées dans la Caraïbe (*D. alata*, *D. cayenensis*, *D. rotundata*, *D. trifida*, *D. esculenta*, et *D. bulbifera*). Dans notre étude nous avons modélisé 2 variétés d'igname et de malanga (dasheen), en utilisant l'Ecocrop pour déterminer l'aptitude du climat. Les résultats prouvent que l'igname cushcush (*D. trifida*) est en perte d'aptitude dans les régions classées TD-ND et TD-LI (aptitude -11 à -14% et jusqu'aux zones de -10%, Figure 25). L'igname blanche et l'igname jaune sont en train de gagner d'aptitude, et les zones disponibles demeurent plus ou moins constants à travers Haïti d'ici 2050 (voir Figure 26). Enfin le malanga est en train de réorienter ses zones géographiques d'aptitude, mais généralement en perdant d'aptitude et de zones



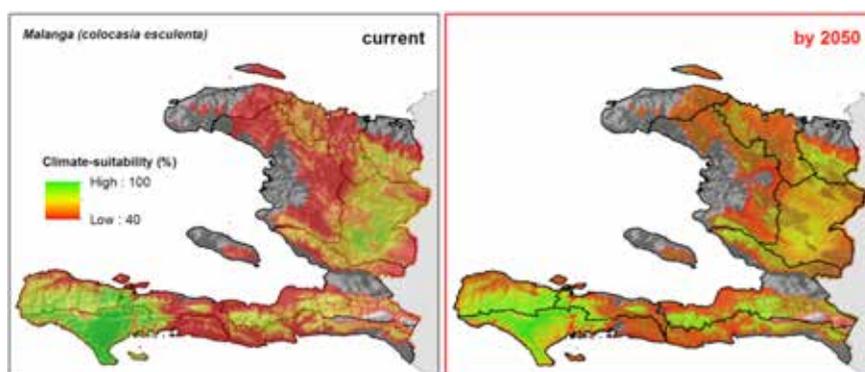
Pays (Haïti)									Departments du Sud-ouest (Sud, Nippes, Grand Anse)								
indice	Actuel			Futur 2050			Changement		indice	Actuel			Futur 2050			Changement	
	Surface (ha)	S (%)	STD	Surface (ha)	S (%)	STD	S	Surface		Surface (ha)	S (%)	STD	Surface (ha)	S (%)	STD	S	Surface
TD-ND	304,229	90	13	276,270	76	13	-14	-9%	TD-ND	77,074	88	11	69,607	74	12	-14	-10%
TD-LI	455,721	95	9	444,770	85	13	-11	-2%	TD-LI	121,210	95	7	119,136	82	12	-12	-2%
PL-BC	214,213	91	13	192,145	79	15	-12	-10%	PL-BC	59,319	91	9	55,669	76	13	-15	-6%
LI-BC	573,115	96	10	551,379	87	13	-8	-4%	LI-BC	174,888	97	6	173,229	84	10	-12	-1%
ND-EX	634,177	95	11	612,025	89	13	-6	-3%	ND-EX	135,563	96	9	134,402	91	12	-5	-1%

Figure 25. Aptitude actuelle et future de l'Igname cushcush d'ici 2050



Pays (Haïti)									Departments du Sud-ouest (Sud, Nippes, Grand Anse)								
indice	Actuel			Futur 2050			Changement		indice	Actuel			Futur 2050			Changement	
	Surface (ha)	S (%)	STD	Surface (ha)	S (%)	STD	S	Surface		Surface (ha)	S (%)	STD	Surface (ha)	S (%)	STD	S	Surface
TD-ND	336,668	89	14	324,887	93	14	4	-3%	TD-ND	80,309	92	12	80,558	95	12	3	0%
TD-LI	462,856	83	15	465,843	92	13	9	1%	TD-LI	120,962	84	14	121,708	94	10	10	1%
PL-BC	240,015	86	16	228,483	92	16	6	-5%	PL-BC	59,651	91	13	60,149	96	10	4	1%
LI-BC	590,870	81	15	592,114	91	13	10	0%	LI-BC	170,325	86	14	174,556	94	11	9	2%
ND-EX	652,927	78	17	656,992	87	16	9	1%	ND-EX	123,119	76	17	131,415	86	15	10	7%

Figure 26 . Aptitude actuelle et future de l'Igname blanche et jaune d'ici 2050

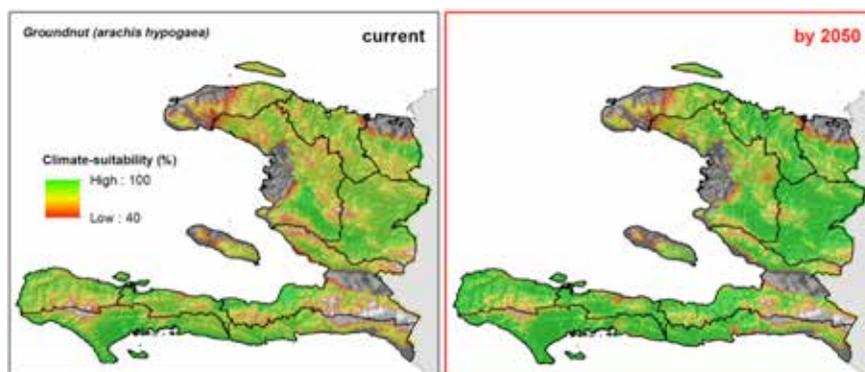


Pays (Haïti)									Departments du Sud-ouest (Sud, Nippes, Grand Anse)									
indice	Actuel			Futur 2050			Changement			indice	Actuel			Futur 2050			Changement	
	Surface (ha)	S (%)	STD	Surface (ha)	S (%)	STD	S	Surface	Surface (ha)		S (%)	STD	Surface (ha)	S (%)	STD	S	Surface	
TD-ND	169,993	69	17	148,506	60	12	-10	-13%	TD-ND	54,922	81	19	48,451	68	15	-13	-12%	
TD-LI	321,403	64	17	267,642	60	15	-5	-17%	TD-LI	103,705	80	18	93,169	72	17	-7	-10%	
PL-BC	117,809	66	16	99,640	59	13	-7	-15%	PL-BC	35,675	76	19	29,535	69	16	-7	-17%	
LI-BC	397,398	62	16	326,214	58	15	-3	-18%	LI-BC	134,568	74	18	118,058	70	17	-4	-12%	
ND-EX	498,365	63	15	435,229	60	15	-3	-13%	ND-EX	122,455	80	14	116,730	77	13	-4	-5%	

Figure 27. Aptitude actuelle et future du malanga (dasheen) d'ici 2050

Arachide

L'arachide est une importante culture secondaire cultivée dans la plupart des régions rurales d'Haïti ; peu de recherche existe sur le potentiel du marché de l'arachide et son rôle dans l'amélioration du revenu de l'agriculteur. Notre analyse d'aptitude climatique révèle que le changement climatique pourrait présenter une bonne opportunité pour cette culture, du à la possibilité de doubler les surfaces disponibles sans limitations du sol, et à son aptitude climatique qui se maintient constante presque partout à travers Haïti. Le département du sud-ouest maintiendra un indice d'aptitude moyenne de 93% (écart-type 13%), d'ici 2050.



Pays (Haïti)									Departments du Sud-ouest (Sud, Nippes, Grand Anse)									
indice	Actuel			Futur 2050			Changement			indice	Actuel			Futur 2050			Changement	
	Surface (ha)	S (%)	STD	Surface (ha)	S (%)	STD	S	Surface	Surface (ha)		S (%)	STD	Surface (ha)	S (%)	STD	S	Surface	
TD-ND	337,663	84	15	693,662	84	16	0	105%	TD-ND	80,558	91	13	80,060	93	13	2	-1%	
TD-LI	478,785	81	14	608,790	88	14	7	27%	TD-LI	121,791	87	12	121,791	95	9	8	0%	
PL-BC	250,634	79	16	242,338	86	18	6	-3%	PL-BC	60,066	89	12	60,232	93	12	4	0%	
LI-BC	606,301	78	14	479,366	90	13	11	-21%	LI-BC	174,390	85	11	175,220	94	10	9	0%	
ND-EX	685,200	75	15	330,695	90	16	14	-52%	ND-EX	130,419	77	14	136,227	86	15	9	4%	

Figure 28. . Aptitude actuelle et future de l'arachide d'ici 2050

Conclusions

Nous avons évalué l'impact à court, moyen et long terme du changement climatique sur des systèmes de production de café et de mangue en Haïti. Ensuite, d'autres impacts potentiels sur des cultures proposées pour être des options de diversification pour des agriculteurs de café ont été évalués, en analysant leur aptitude climatique, pour s'assurer que le travail d'adaptation stratégique sera effectué sur les cultures appropriées actuelles et futures. Nous avons passé en revue plusieurs modèles d'aptitude de culture, avant de décider sur le modèle le plus approprié pour l'analyse. L'Entropie maximum (Maxent) est une méthode de modélisation de niche, et a été sélectionnée pour modéliser la distribution actuelle et future potentielle du café et de la mangue. Ecocrop, un modèle de prévision de niche de culture, utilisant des gammes climatiques comme données d'entrée pour déterminer l'indice d'aptitude, a été employé pour évaluer les options de diversification. Nous avons alors comparé l'aptitude climatique, les résultats trouvés pour les zones, à l'indice de disponibilité des terres pour la production agricole, et avons extrait des statistiques spatiales à partir des couches d'aptitude climatique sur la base des 5 couches de disponibilité de terres, en utilisant un Système d'Information Géographique (SIG).

Les résultats révèlent que les changements dans les régimes de température et de précipitations provoqueront une diminution générale de zones convenables pour le café, et réduiront les régions qui possèdent actuellement une aptitude élevée, et qu'à plus basse altitude, le café perdra son aptitude. La mangue restera une culture extrêmement convenable dans beaucoup de régions d'Haïti. L'évaluation des options de diversification pour les agriculteurs de café indique l'aptitude du cacao, puisqu'il n'est pas prévu qu'il sera affecté par des changements de régime climatique à long terme, et les producteurs de cacao d'Haïti pourraient participer à la satisfaction de la demande globale pour la production de cacao de haute qualité. Pour la production actuelle de maïs, nous soulignons que les stratégies appropriées de développement et de gestion de culture, pour faire face à la chaleur extrême sur des variétés de maïs, devraient être une priorité pour les travaux futurs en Haïti. Les différents ignames sont en train de perdre et de gagner, eu égard aux variétés spécifiques, et doivent être sélectionnés afin de développer leur production. Le sorgho et l'arachide sont prometteurs, en raison de leur aptitude croissante prévue dans le futur.

Les changements de température et de précipitations changeront également la donne, eu égard aux parasites et aux maladies. Bien que nous n'ayons pas quantifié l'impact du changement climatique sur les principaux parasites et maladies pour Haïti dans cette étude, dans les travaux futurs, il sera important de se concentrer sur la façon dont les espèces de café, les mangues et d'autres cultures en Haïti sont influencées par des parasites et des maladies, en régime de changement climatique accéléré.

Il existe de nombreuses opportunités d'adaptation aux changements, et pour les agriculteurs du café dont l'aptitude des terres chutera, mais

pas de manière radicale, l'adaptation proactive est une stratégie cruciale. Les systèmes d'agroforesterie tels, les systèmes caféiers, sont importants non seulement en tant que source de produits de consommation, générateurs de revenu pour les petits producteurs, mais également en tant que pourvoyeur de services écosystémiques. Une diminution de l'aptitude climatique pour le café va probablement menacer les services environnementaux fournis par les systèmes caféiers tels que, la couverture du sol, la mise sous séquestre du carbone, la biodiversité, et le stockage de l'eau. Ainsi, une stratégie clé doit se concentrer sur le maintien des services environnementaux, avec un système agro forestier différent. Dans ce contexte, le cacao est une option prometteuse. Nous distinguons 3 stratégies générales d'adaptation au changement d'aptitude du café. Les trois stratégies sont liées et se succéderont au fil du temps. Les zones où l'aptitude augmentera, ont besoin d'investissements stratégiques. Les zones qui perdront en aptitude ont besoin d'être maintenues, en utilisant des stratégies ciblées telles que, l'irrigation, la gestion de l'ombrage, le changement vers de variétés plus résistantes à la sécheresse. Les zones qui sont susceptibles de souffrir d'une diminution significative d'aptitude doivent commencer à se diversifier, en s'orientant vers d'autres cultures telles que le cacao, sitôt que le café n'est plus approprié.

References

- Amaya, G., Mencía, V. E., Gautier, P., & Gemeil, J. A. (1999, May). Haiti Small-Scale Coffee Producers Production, Processing, Quality Control and Marketing. (USAID/Haiti Agriculture and Economic Growth Office, Washington, D.C.
- Arias, D., Brearlet, E., & Damais, G. (2006). Restoring the competitiveness of the coffee sector in Haiti. Inter-American Development Bank.
- Beebe, S., Ramirez, J., Jarvis, A., Rao, I. M., Mosquera, G., Bueno, J. M., & Blair, M. W. (2011). Chapter 16 Genetic Improvement of Common Beans and the Challenges of Climate Change. *Challenges*.
- Busby, J.R. (1991), "BIOCLIM: A bioclimatic analysis and prediction system", *Plant Protection Quarterly*, Vol. 6, pp. 8-9.
- Castañeda, N. P., Rodríguez, F., & Lundy, M. (2011). Assessment of Haitian Mango Value Chain (p. 34). Baltimore, USA. Retrieved from www.crsprogramquality.org
- Covey, C., AchutaRao, K. M., Cubasch, U., Jones, P., Lambert, S. J., Mann, M. E., ... Taylor, K. E. 2003. An overview of results from the Coupled Model Intercomparison Project. *Global and Planetary Change*, 37(1-2), 103–133. doi:10.1016/S0921-8181(02)00193-5
- Damatta, F., Ronchi, C., Claudio, P., Maestri, M. And Barros, R. 2007. Ecophidology of coffee growth and production. *Braz J. Plant Physiol.*, vol19, n4 (cited 2012-02-23) pp 485-510.
- Davis, A. P., Gole, T. W., Baena, S., & Moat, J. (2012). The Impact of Climate Change on Indigenous Arabica Coffee (*Coffea arabica*): Predicting Future Trends and Identifying Priorities. (B. Fenton, Ed.) *PLoS ONE*, 7(11), e47981. doi:10.1371/journal.pone.0047981
- Elith, J., Graham, C.H., Anderson, R.P., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., Hijmans, R.J., Huettmann, F., Leathwick, R., Lehmann, A., Li, J., Lohmann, L.G., Loiselle, B.A., Manion, G., Moritz, C., Nakamura, M., Nakazawa, Y., Overton, J.McC., Peterson, A.T., Phillips, J., Richardson, K., Scachetti-Pereira, R., Schapire, E., Soberon, J., Williams, S., Wisz, M., Zimmermann, E. 2006. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography* 29:129-151.
- FAO 2000. The Ecocrop database. Rome. Available at: <http://goo.gl/52X7t> [Accessed July 3rd, 2013].
- FAO. (2013). FAOSTAT. Retrieved from faostat.fao.org
- Haiti Coffee Supply Chain Risk Assessment. (2010). (p. 35 pags.). The Agricultural Risk Management Team, The World Bank.
- Hijmans R.J., Guarino L., Cruz M., Rojas E. 2001. Computer tools for spatial analysis of plant genetic resources data. 1. DIVA-GIS. *Plant Genet Resour Newsl* 127:15–19
- Hijmans R. J., Cameron S. E., Parra J. L., Jones P. G., & Jarvis A. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25(15), 1965–1978.
- Hijmans R.J., Guarino L., and Mathur P. 2012. DIVA-GIS Version 7.5, Manual. Available at: <http://goo.gl/Y3RXg> [Accessed July 3rd, 2013].
- Hijmans R.J. and Graham C. (2006) The ability of climate envelope models to predict the effect of climate change on species distributions. *Global Change Biology* 12: 2272-2281.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2000. Emission Scenarios. A Special Report of IPCC Working Group III. Intergovernmental Panel on Climate Change. Available at: <http://goo.gl/vhvuP> [Accessed July 3rd, 2013].
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. IPCC, Geneva. Available at: <http://goo.gl/SeOZ4> [Accessed July 3rd, 2013].
- Jarvis A., Touval J. L., Schmitz M. C., Sotomayor L., and Hyman G. G. 2010. Assessment of threats to ecosystems in South America. *Journal for Nature Conservation* 18, no. 3: 180-188.
- Jarvis, A., Ramirez-Villegas, J., Herrera Campo, B. V., & Navarro-Racines, C. (2012). Is Cassava the Answer to African Climate Change Adaptation? *Tropical Plant Biology*. doi:10.1007/s12042-012-9096-7

-
- Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., ... Ritchie, J. T. (2003). The DSSAT cropping system model. *Crop Science* (Vol. 18).
- Laderach, P., Lundy, M., Jarvis, A., Ramirez, J., Perez, E., Schepp, K., & Eitzinger, A. (2009). Predicted impact of climate change on coffee-supply chains. *Tropical Agriculture*.
- Läderach, P., Martínez-Valle, a., Schroth, G., & Castro, N. (2013). Predicting the future climatic suitability for cocoa farming of the world's leading producer countries, Ghana and Côte d'Ivoire. *Climatic Change*. doi:10.1007/s10584-013-0774-8
- Lobell, D. B., Hammer, G. L., McLean, G., Messina, C., Roberts, M. J., & Schlenker, W. (2013). The critical role of extreme heat for maize production in the United States. *Nature Climate Change*, 3(4), 1–5. doi:10.1038/nclimate1832.
- Lobo, J.M., Jiménez-Valverde, A. and Real, R., 2008. AUC: a misleading measure of the performance of predictive distribution models. *Global Ecology and Biogeography*, 17(2): 145-151
- Manel, S., Williams, H.C. and Ormerod, S.J., 2001. Evaluating presence–absence models in ecology: the need to account for prevalence. *Journal of Applied Ecology*, 38(5): 921-931.
- Mitchell, S. a, Asemota, H. N., & Ahmad, M. H. (1995). Effects of explant source, culture medium: Strength and growth regulators on the in-vitro propagation of three Jamaican yams: (*Dioscorea cayenensis*, *D trifida* and *d rotundata*). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 67(2), 173–180. doi:10.1002/jsfa.2740670206
- O'BRIEN, R. 2004. Spatial Decision Support for Selecting Tropical Crops and Forages in Uncertain Environments. PhD thesis, Department of Spatial Sciences, Curtin University of Technology, Perth, 278pp.
- PEARL J. 1990. Bayesian Decision Methods, in: Readings in Uncertainty Reasoning, SHAFER, G. and J. PEARL (eds.), Morgan Kaufmann, San Mateo, CA, pp. 345-352.
- Peterson, A.T., Papes, M. and Soberón, J., 2008. Rethinking receiver operating characteristic analysis applications in ecological niche modeling. *Ecological Modelling*, 213(1): 63-72
- Phillips, S.J., R.P. Anderson, and R.E. Schapire. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190:231-259.
- Ramírez, J., & Bueno-Cabrera, A. (2009). Working with climate data and niche modeling I . Creation of bioclimatic variables. *Tropical Agriculture*, 4(July). Retrieved from http://gisweb.ciat.cgiar.org/GCMPPage/docs/tutorial_bcvars_creation.pdf
- Ramirez-Villegas J., & Jarvis A. 2010. Downscaling Global Circulation Model Outputs: The Delta Method. Decision and Policy Analysis Working Paper No. 1, Cali, Colombia. Available at: <http://goo.gl/WvFXJ> [Accessed July 3rd, 2013].
- Ramirez-Villegas, J., Jarvis, A., & Läderach, P. (2011). Empirical approaches for assessing impacts of climate change on agriculture: The EcoCrop model and a case study with grain sorghum. *Agricultural and Forest Meteorology*. doi:10.1016/j.agrformet.2011.09.005
- Ramírez-Villegas J, Lau C, Köhler A-K, Signer J, Jarvis A, Arnell N, Osborne T, Hooker J. 2011b. Climate analogues: finding tomorrow's agriculture today. Working Paper no. 12. Cali, Colombia: CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS). Available online at: www.ccafs.cgiar.org
- Rodríguez, F., Castañeda, N. P., & Lundy, M. (2011). Assessment of Haitian Coffee Value Chain (p. 40). Baltimore, USA. Retrieved from crsprogramquality.org
- Serra-Díaz, J. M., Keenan, T. F., Ninyerola, M., Sabaté, S., Gracia, C., Lloret, F. (2013). Geographical patterns of congruence and incongruence between correlative species distribution models and a process-based ecophysiological growth model. *Journal of Biogeography*. doi: 10.1111/jbi.12142
- Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., and Miller H.L. 2007. IPCC 2007: Summary for Policymakers. Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Available at: <http://goo.gl/N4RMw> [Accessed July 3rd, 2013].
- Stanton, J. C., Pearson, R. G., Horning, N., Ersts, P., & Reşit Akçakaya, H. (2011). Combining static and dynamic variables in species distribution models under climate change. *Methods in Ecology and Evolution*, (i), no–no. doi:10.1111/j.2041-210X.2011.00157.x

