

Analyses et spatialisation des milieux propres aux espèces de genre Coffea en Martinique : cas du Coffea arabica var. typica

Jean-Philippe Claude

▶ **To cite this version:**

Jean-Philippe Claude. Analyses et spatialisation des milieux propres aux espèces de genre Coffea en Martinique : cas du Coffea arabica var. typica. Géographie. 2015. dumas-01265034

HAL Id: dumas-01265034

https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01265034

Submitted on 30 Jan 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Université des Antilles
Académie Martinique

Master 2 de Géographie

Jean-Philippe CLAUDE

Analyses et spatialisation des milieux propres aux espèces de genre Coffea en Martinique : cas du Coffea arabica var. typica.

Directeur de recherche : Professeur Philippe JOSEPH

Année universitaire 2014/2015

Avant-propos

Il y a quelques années, cela fait à peine cin ans, on a entendu parler dans la presse du passage d'une délégation japonaise à la recherche du fameux café martiniquais disparu depuis le XIXème siècle. On était en 2010 et c'était alors leur deuxième passage sur l'île.

Ceci est l'un des signes d'un intérêt grandissant pour un vestige de l'histoire Martiniquaise, et preuve qu'il existe de nombreux enjeux autour de cette culture disparue. En effet cette délégation était composée de représentants d'une très grande entreprise de distribution japonaise spécialisée dans le café de luxe.

Le café Martiniquais reposait sur l'une des espèces du genre Coffea la plus cultivée au monde à cette époque et encore aujourd'hui, en raison de ses qualités à la tasse. Il s'agit du Coffea arabica variété typica qui a été introduite dans l'île en 1720 et provient des plants mythiques apportés de Java à Amsterdam en 1706.

La majorité des plantations de café Typica dans le monde sont d'ailleurs issues de ces plants d'Amsterdam, et à partir des plants de café introduits en Martinique, s'est diffusée cette variété Typica dans la Caraïbe, dont sont issus des vestiges de plantations de café toujours en production de nos jours : le café « bonifieur » de Guadeloupe ou le plus célèbre « Blue Mountain » de la Jamaïque.

Si actuellement il n'y a plus de vestiges des anciennes plantations caféières sur l'île, ce fameux café martiniquais et cette variété Typica qui a été introduite et qui se fait de nos jours rare sur l'île, font l'objet de recherches et d'engouements à l'étranger. Sa valeur historique, culturelle, font l'objet de demandes croissantes pour que soit relancé la production de ce café dit « de légende ».

Toujours selon l'article publié dans DOMactu.com, le mardi 07 décembre 2010, par Adrien Janot, cette délégation japonaise avait pour intention de retrouver les plants de café Typica sur l'île et de le commercialiser. Ils ont d'ailleurs déjà aidé à relancer la production de café à l'île de la Réunion, qui aujourd'hui donne des résultats plus que satisfaisants.

Outre cette demande grandissante et prometteuse, attractive pour relancer la culture du café en Martinique, il y a un réel enjeu de réappropriation de notre histoire martiniquaise, et un enjeu de patrimonialisation.

Des études scientifiques sur ce café d'origine, commencent d'ailleurs à émerger actuellement, avec la thèse en histoire antillaise à l'Université des Antilles de Marie Hardy en 2014, ou encore cette présente étude sur l'aspect botanique et écologique de l'espèce que je mène actuellement.

Remerciements

Pour la réalisation de ce mémoire, je tiens à remercier tout d'abord mon directeur de recherche, **Pr. Philippe JOSEPH**, pour ses différents conseils et ses orientations, et surtout pour m'avoir mis sur ce projet très intéressant et enrichissant.

Je tiens à remercier le personnel de **Martinique Développement** au sein duquel au cours de mon stage sur le projet café, a été très accueillant, dynamique et m'ont apporté beaucoup en matière de professionnalisation.

Un grand merci à **l'ingénieur cartographe du campus Mr Nicolas Ferchat** pour ses conseils en matière de cartographie et de SIG.

Un très grand merci à **Météo France Martinique, la DEAL Martinique, la DAAF, l'IRD et le Conseil Général de la Martinique,** pour les données numériques obtenues pour la réalisation de mon mémoire.

Un très grand merci et bravo à **JEAN-FRANÇOIS Yanis**, **BELLEMARE Aline**, **ABATI Yelji** pour l'année universitaire entièrement ou presque que l'on a passée ensemble avec un rythme soutenu mais formateur.

Enfin, j'aimerais aussi remercier **ma famille** qui tout au long de cette année assez contraignante, m'a bien évidemment soutenu, aidé à mieux m'organiser, et à tenir le rythme tout en ne m'épuisant pas dans l'effort.

Sommaire

Introduction……page 5

Bilan de la recherche……page 7

Matériel…….……page 40

Méthode……...……..……page 44

Résultats et Discussion : Zonage agro-écologique pour Coffea arabica var. Typica en 2015 en Martinique….……page 47

Résultats et Discussion : Zonage agro-climatique pour Coffea arabica var. Typica en 2071-2100 en Martinique….……..…….page 85

Conclusion……...……..……..…….page 97

Annexe……..……..……..…page 118

Analyses et spatialisation des milieux propres aux espèces de genre Coffea en Martinique : cas du Coffea arabica var. typica.

INTRODUCTION

La Martinique de par sa topographie, ses différentes formes de reliefs très marquées, offre une diversité de biotopes et de microclimats, conditionnant et favorisant la mise en place d'écosystèmes très divers dont une biodiversité utile remarquable.

Cette biodiversité utile peut être valorisée, et peut aider au développement économique du territoire. C'est le cas des espèces de caféiers qui ont été introduites en Martinique, et qui font partie de la biodiversité utile présente sur notre territoire. L'une d'entre elle, est le Coffea arabica variété typica, très majoritairement cultivée dans le monde, elle a été introduite il y a presque 300 ans dans l'île, cultivée puis délaissée.

En effet, première île du « Nouveau Monde » à avoir accueilli pour la première fois la variété de café Typica (en 1720), la Martinique pourtant ne connait aujourd'hui plus aucunes véritables plantations de caféiers. Hors il subsiste encore sur l'île, quelques plants de Coffea arabica variété typica, aux origines historiques remarquables, une des espèces de café la plus importante économiquement et reconnue pour ses valeurs organoleptiques dans le monde.

La Martinique a d'ailleurs été l'un des lieux de diffusion du café variété typica aux Amériques, et a connu une forte activité économique liée à la caféiculture, du XVIII^{ème} siècle au XIX^{ème} siècle (Hardy M., 2014).

Plusieurs plantations de café dans la Caraïbe tel que le « Blue Mountain » en Jamaïque, où le café « bonifieur » de Guadeloupe, sont issues de la variété typica introduite en Martinique par le courageux lieutenant de la marine royale française Gabriel De Clieu. Cette variété typica qui nous a été apportée, est issue des quelques plants de café apportés au jardin botanique d'Amsterdam en 1706, et qui sont à l'origine d'une grande majorité de plantations de café arabica variété typica cultivées dans le monde.

Suite à une succession d'évènements historiques qui ont affecté la production de café dans l'île au XIXème siècle, la culture du café y a définitivement disparu et a été remplacée par d'autres cultures.

La relance de la culture du café en Martinique présente aujourd'hui plusieurs enjeux. D'un point de vue économique, il s'agirait de lancer un produit de terroir à haute valeur ajoutée, d'un point de vue historique et culturel c'est une façon de se réapproprier un patrimoine historique et de le valoriser, et d'un point de vue agronomique il s'agit de mettre en valeur la biodiversité utile.

Le projet de relance d'une culture des siècles suivants après son abandon, peut faire l'objet de nombreuses difficultés mais qui ne sont pas insurmontables. A titre d'exemple en Guadeloupe, la culture du café a connu un déclin au XXème siècle et est devenue sur la Côte sous-le-Vent, une culture anecdotique, sur de petites surfaces faiblement productives, pratiquement oubliées. Des tentatives ont été pourtant réalisées pour redynamiser cette culture.

Pour ce faire il a beaucoup été mis en avant la valeur patrimoniale du café, sa réputation, son origine, son histoire et les savoir-faire. Des manifestations culturelles, des lieux de souvenirs...,

à destination des touristes mais aussi des habitants, ont été réalisés afin de redynamiser une partie du territoire guadeloupéen vis-à-vis de cette culture ancestrale (Dulcire M., 2005).

C'est un type d'exemple d'aménagement territorial qui est intéressant à prendre en compte, vis-à-vis de l'expérience que l'on peut en tirer sur l'aspect socio-économique d'un projet de relance d'une culture.

Mais pour revenir au cas de la Martinique, notre étude s'attache surtout et d'abord à traiter l'aspect agro-écologique. Autrement dit pour relancer la culture, il est nécessaire de connaître les milieux potentiellement aptes de nos jours, à accueillir la culture du café Typica, vis-à-vis des exigences éco-climatiques spécifiques à l'espèce.

Cette étude des potentialités de la répartition spatiale possible du café typica en Martinique, s'explique par le fait qu'il n'y a plus de plantations de café sur l'île pouvant servir d'indicatrices. Les communes autrefois plantées en caféier sont-elles encore aujourd'hui propices à cette culture ? Et d'ailleurs les quelques plants de café typica retrouvés et certifiés sont dans les jardins de particulier et non en milieu naturel directement, ce qui aurait permis d'établir son écologie plus facilement et de savoir où peut se situer l'espèce sur l'île.

Il s'agit donc de mener la toute première étude scientifique pour la relance de la culture du café en Martinique et qui consiste à effectuer une étude mésologique basée sur l'écologie de l'espèce telle qu'elle est définie dans la littérature mondiale, au vue des conditions éco-climatiques de l'île. Cela passe par l'identification des principaux déterminismes factoriels et en ayant une approche systémique, c'est-à-dire en prenant en compte la synergie de ses différents facteurs, il sera ainsi révélé la chorologie possible de l'espèce sur l'île.

Cette étude s'inscrit et est réalisée dans le cadre du projet de relance du café de Martinique par « Martinique Développement » (Agence de développement économique et de coopération régionale), et dont les résultats seront présentés sous forme de soutenance de fin de master 2 à l'Université des Antilles pour juin 2015. Elle a pour vocation d'aider les décideurs à développer le territoire, en mettant en valeur la biodiversité utile mais dans le cadre d'une gestion durable et raisonnée du territoire.

Ainsi par exemple, il s'agit de répondre à ces diverses problématiques que sont : relancer la culture du café présente des atouts réels, mais où sont les milieux propices ? Combien d'hectares seraient concernés ? Ces milieux propices sont-ils libres pour la culture, où alors déjà occupés par des habitations, des aires protégées… ?

Cette étude doit donc pouvoir répondre à ces questions tout en ne perdant pas de vue, la problématique d'un aménagement durable du territoire.

Le résultat final est l'élaboration d'un zonage agro-écologique dont il existe plusieurs définitions (Wollmann, C. A., et al., 2013), mais que l'on peut résumer comme la délimitation des aptitudes agricoles des régions en fonction du climat, des types de sols et auxquels il est possible de rajouter la prise en compte de l'environnement socio-économique.

Ce zonage agro-écologique se fera à l'aide d'un Système d'information Géographique, pour cartographier les milieux à la Martinique, aptes à accueillir la culture du genre Coffea arabica var. Typica.

Puis il est intéressant de prendre en compte d'ores-et-déjà les conséquences du réchauffement climatique sur le café typica. En effet plusieurs travaux scientifiques dans le monde, alertent sur la réduction significative des zones propices à l'arabica d'ici les prochaines années. Cette espèce étant vulnérable aux hausses de températures et donc menacée, qu'en est-il des possibilités de sa culture en Martinique. Il s'agit de pouvoir analyser et évaluer l'impact climatique durant les prochaines années sur la culture du café sur l'île.

Cette étude s'appuie sur le bilan d'un certain nombre de publications scientifiques réalisées dans le monde sur la thématique des espèces du genre Coffea dont Coffea arabica var. typica et sur la définition et les méthodes de ce que l'on nomme un zonage agro-écologique et agro-climatique.

Mots-clés : Coffea arabica var. typica, profil écologique, facteurs éco-climatiques, spatialisation, biotopes, Martinique, changement climatique.

I. Bilan de la Recherche

I.1 L'Histoire du Coffea arabica var. typica du monde à la Martinique.

Les origines légendaires du café et sa diffusion dans le monde

L'origine exacte du Coffea arabica, les premières cultures, les premières utilisations font l'objet de légendes. Parmi les plus connues, est celle du jeune chevrier Kaldi qui avait des chèvres qui folâtraient sur les montagnes en Arabie.

Un jour il les chercha et les trouva sous les arbres de la forêt, surexcitées. Il remarqua assez vite que c'était à cause d'arbustes inconnus, avec de belles feuilles luisantes et des baies rouges qu'elles avaient mangées.

Et là, selon les versions : soit Kaldi se serait mis à goûter les baies, devenant surexcité lui-même, plein d'énergie et joyeux; soit il aurait raconté cela à des moines non loin de là, qui auraient eux aussi essayé, et se sentant plus éveillés pour de longues prières, ils l'utilisèrent aussitôt sous forme de boisson (G.-E Coubard d'Aulnay, 1832 ; Jeanguyot M., et al., 2003 ; Pinard F., 2008).

Une autre légende dédie la découverte du caféier au Cheikh Omar al-Shadhili, un guérisseur qui vivait au Yémen et qui guérissait des malades par la prière et de l'eau d'une source miraculeuse. Chassés dans les montagnes avec ses compagnons, par le roi de la région, car il était trop proche de sa fille qu'il eut à soigner, ils se retrouvèrent sans rien à manger. Mais là, il y avait de petits arbustes, dont ils prirent les fruits, en mangèrent quelques-uns, et d'autres furent cuits pour en boire l'eau. Ils découvrirent ainsi le caféier. Et c'est avec cette eau qu'Omar soigna des amis qui étaient venus le voir; il put revenir dans le royaume et mourut en 1418 (Jeanguyot M., et al., 2003 ; Wagner R., 2003).

Il existe encore bien d'autres légendes, telle que celle affirmant que c'est l'ange Gabriel qui pour soigner Mahomet tombé malade, aurait inventé le café (G.-E Coubard d'Aulnay, 1832).

Toutes ces légendes laissent croire que le Café viendrait d'Arabie, ce qui expliquerait d'ailleurs en tout ou partie, qu'on l'ait nommé Coffea arabica.

Pourtant c'est du Sud de l'Ethiopie qu'est originaire le caféier et d'ailleurs des peuples autochtones (dont les Oromos) en cueillaient et consommaient déjà les fruits, de diverses façons. «Buna Qalaa » est le nom donné par les Oromos au type d'aliment qu'ils consommaient, préparé avec des baies de caféier, torréfiées avec du beurre sous forme de boules, (Tadesse Woldemariam et al., 2001 ; Jeanguyot M., et al., 2003). Ce n'est que bien après que des marchands arabes se sont mis à importer ces graines vers l'Arabie où la plante n'y poussait pas encore.

Toutefois il a été démontré que le lieu d'origine véritable du caféier (Coffea arabica) serait les environs du Lac Victoria (Costentin J. et al., 2010). Des plants de café auraient ensuite été transportés de cette région, soit par anthropochorie ou zoochorie, vers les hauts plateaux d'Ethiopie, où le caféier y serait donc connu et utilisé depuis la préhistoire.

A partir de l'Ethiopie, reconnu comme pays natal du caféier (Sylvain P. G., 1958 ; Wagner R., 2003), les plants de café ont été diffusés ensuite par l'homme, par vagues successives dans le monde. Les plants de café ont d'abord été introduits au Yémen vers le VIème siècle, mais cultivés intensément au Yémen qu'à partir du XV^{ème} siècle (G.-E Coubard d'Aulnay, 1832 ; Wagner R., 2003), probablement dans les massifs montagneux allant de Fayfa au nord, à Yafi au sud, entre 1000 et 2000 mètres d'altitude.

Les plantations de café du Yémen ont été très prospères pendant le XVII^{ème} siècle et au tout début du XVIII^{ème} siècle. Le café était consommé à cette époque, au Moyen Orient pour ses vertus médicinales de stimulation physique et intellectuelle.

Le Yémen a tout fait pour garder le monopole de production de café, dont la consommation grandissante venant des empires de l'époque (Ottoman, Safavide, Moghol) lui assurait une économie fructueuse. Il était donc interdit de quitter le pays avec des plants ou graines fertiles (Wagner R., 2003).

Mais le nombre de visiteurs par an et la difficulté de contrôler les frontières, ainsi que l'intérêt des autres pays ont finalement eu raison et la plante arriva à s'en évader.

En effet peu avant 1680, selon la légende là aussi, un pèlerin indien nommé Babaud-din s'empare de graines au Yémen, les ramène et les plante dans le sud-ouest de l'Inde (Jeanguyot M., et al., 2003 ; Costentin J. et al., 2010). Puis en Indonésie, à l'île de Java vers 1696, la compagnie hollandaise des Indes orientales implante des plants de café dérobés au Yémen. Et ainsi de suite le caféier se répand à d'autres régions du monde : en Malaisie, Thaïlande, Vietnam, Chine, Philippines, puis dans le Pacifique à Hawaï…; essentiellement des régions de la zone intertropicale.

Cette expansion du café dans le monde, s'explique par l'augmentation de la consommation de café notamment par l'Europe, cette dernière étant devenue une région très consommatrice de café à partir de la fin du XVII^{ème} siècle, mais elle ne peut pas en produire elle-même vis-à-vis des exigences écologiques du caféier.

Le premier plant de café est apporté à Amsterdam à « l'Hortus Botanicus » (jardin botanique) par le gouverneur de Java en 1706, où on réussit à le faire fleurir et donner de nouvelles plantules sous serres (F. Anthony, et al., 2002 ; Wagner R., 2003 ; Elzebroek A. T. G., 2008).

Ceux-ci sont offertes aux grands jardins botaniques des grandes cours royales d'Europe, dont à Paris à Louis XIV en 1714 (après la paix d'Utrecht, 1695), (G.-E Coubard d'Aulnay, 1832 ; Wagner R., 2003 ; Dulcire M., 2005 ; BAREL M., 2008 ; Costentin J. et al., 2010). Puis ces grands royaumes ont décidé d'implanter leurs plants dans leurs colonies, afin de les cultiver et d'en consommer, de manière plus rentable que d'en importer de l'étranger. De ce seul plant de caféier arrivé à Amsterdam, est issu l'ensemble des cafés arabica (var. typica) produits aujourd'hui dans le reste du monde.

L'ère caféière à la Martinique

C'est ainsi que la Martinique a été l'une des premières îles du nouveau monde à avoir accueilli des plants de café variété typica. Plusieurs tentatives mandatées par l'Académie des sciences de Paris, ont d'ailleurs été nécessaires.

Une première tentative confiée à M. d'Isamberg en 1716 a échoué du fait de la mort de celui-ci juste après son arrivée sur l'île. Ce n'est qu'à la deuxième tentative que cela réussit, aux alentours de 1720, grâce à Gabriel De Clieu (1688 - 1774), capitaine d'infanterie, chevalier, seigneur…, qui malgré des conditions difficiles, il a su introduire le café dans l'île (Louis Du Bois, 1855 ; Jeanguyot M., et al., 2003; Elzebroek A. T. G., 2008.; Costentin J. et al., 2010 ; Hardy M., 2014).

L'implantation de caféier dans le monde n'a effectivement pas toujours réussi, car souvent dès les premières tentatives les conditions sont souvent défavorables, notamment pour le transport des graines.

Néanmoins la Martinique a ainsi été l'un des lieux de redistribution des plants de café dans le monde (Carte 1), et de ses plantations de café ont été véhiculés des plants dans la Caraïbe (G.-E Coubard d'Aulnay, 1832 ; Dulcire M., 2005).

Les premières exportations en Martinique ont commencé en 1730, puis la culture n'a eu de cesse de s'y développer de façon exponentielle, même s'il a fallu plusieurs années pour que le café martiniquais s'impose par exemple, comme denrée coloniale française (introduction dans les ports métropolitains qu'avec l'ordonnance royale du 29 mai 1736 (Hardy M., 2014)).

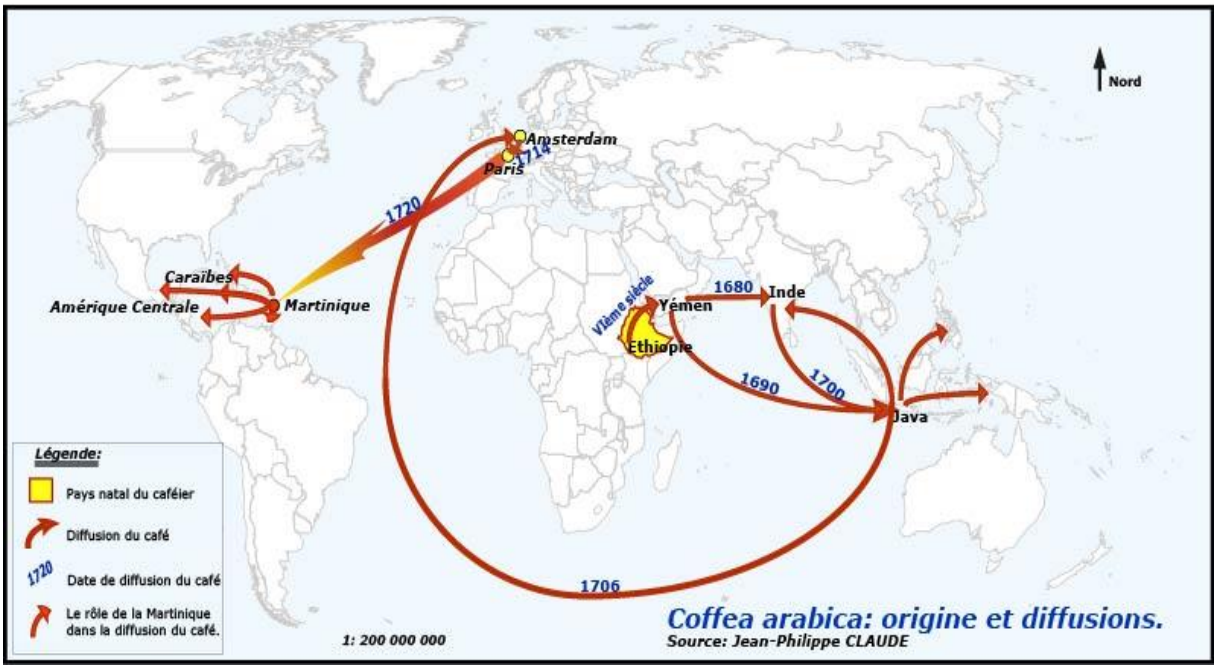
Jusque dans les années 1750, la Martinique est le principal fournisseur antillais de la métropole. Malgré l'impact de différentes guerres au cours du XVIII^{ème} siècle (exemple : la Guerre de sept ans, la Guerre d'indépendance des Etats-Unis…), la culture du café a continué de croitre dans l'île, atteignant par exemple en 1774 plus de 17 291 875 livres coloniales (Hardy M., 2014).

Le café a été implanté au début sur les zones laissées libres par la culture de la canne, c'est-à-dire sur les pentes humides vierges de toutes cultures. On comptait alors plusieurs exploitations caféières un peu partout dans l'île dont surtout au Nord et au Centre (quoique certains territoires

du Sud de l'île, détenaient un nombre important d'exploitations caféières, tel que Saint Esprit, Rivière Pilote, le Vauclin).

Mais la période révolutionnaire de 1789, les concurrences des autres colonies, le blocus continental et les différentes occupations de la Martinique par les anglais (1794-1802 et 1809-1814)…, mirent en déclin la culture du café dans l'île (Hardy M., 2014).

Tout au long du XIXème siècle, la production de café n'a cessé de diminuer, liée à la concurrence du Brésil, aux maladies…, conduisant inexorablement à la fin de la culture du café de l'île qui s'était pourtant fait connaître et reconnaître.



Carte 1[1]

Le long processus de classification botanique des caféiers.

Si la diffusion du café dans le monde a été progressive, successive, il l'a été tout autant pour la classification du genre Coffea. Genre dans lequel aujourd'hui est comprise cette espèce arabica var. arabica ou encore appelée Typica, dans l'organisation et la hiérarchisation complexe du monde du vivant. La classification des caféiers a été difficile, très longue à réaliser pour les botanistes et les systématiciens.

En 1574, Charles de l'Ecluse, médecin et botaniste flamand (né le 19 février 1526 à Arras, Pays-Bas espagnols à l'époque, et mort le 4 avril 1609 à Leyde), est parmi les premiers à décrire des grains de café, mais qu'un médecin italien lui a envoyés sans voir la plante pour autant.

[1] Carte réalisée à partir des données tirées des articles de : Woldemariam T., et al., 2001 ; Hue T. T. M., 2005 ; Geletu, K. T., 2006 ; BAREL, M., 2008 ; Pinard F., 2008.

En 1592, Prosper Alpin, (né le 23 novembre 1553 à Venise et mort le 6 février 1617 à Padoue), est un médecin et botaniste italien, qui a voyagé en Egypte, et a observé un caféier (rare dans le pays) et a dans son ouvrage Plantes d'Egypte fait un dessin mais qui reste approximatif de la plante (Wagner R., 2003).

Il faut attendre 1715, Antoine de Jussieu, jeune botaniste français, (né le 6 juillet 1686 à Lyon et mort le 22 avril 1758 à Paris) pour avoir la première description botanique, véritable et précise et le premier dessin exact d'une branche de caféier, avec ses fleurs et ses fruits (Pinard F., 2008). Mais pourtant il considérera le caféier comme un jasmin et le nommera « Jasminum arabicum laurifolia » (G.-E Coubard d'Aulnay, 1832).

Et c'est en 1737 que Carl Von Linné, (né le 23 mai 1707 à Råshult en Suède et mort le 10 janvier 1778 à Uppsala en Suède), naturaliste suédois, dans son ouvrage « Genera Plantarum », crée le genre Coffea (Meyer F. G., 1965 ; Pinard F., 2008 ; Lecolier, A., 2010). Puis en 1753, il décrit la seule espèce alors connue à cette époque : le Coffea arabica, dans son ouvrage « Species Plantarum ».

Le genre Coffea sera ensuite classé dans la famille des Rubiacées par Laurent de Jussieu, (né à Lyon le 12 avril 1748 et mort à Paris le 17 septembre 1836), botaniste français.

Au fur et à mesure des voyages des explorateurs et botanistes, en Afrique et aux Mascareignes, de nouveaux caféiers sauvages, différents du Coffea arabica sont découverts et de nouvelles espèces sont ainsi nommées et rangées dans le genre Coffea (Jeanguyot M., et al., 2003). Ce genre connaitra d'ailleurs de nombreux aménagements très discutés par la suite. Par exemple, en 1891, les caféiers ont été placés dans le sous-genre Eucoffea.
Plusieurs sous-genres dans le genre Coffea, ont ainsi été créés (Auguste Chevalier, Les caféiers du globe, en 1947), à savoir Eucoffea, Mascaracoffea, Argocoffea, et Paracoffea (Meyer, F. G., 1965).

Le sous-genre Eucoffea qui comprend les principales espèces de caféiers, fut subdivisé en plusieurs sections : Erythrocoffea, Pachycoffea, Melanocoffea, Nanocoffea, Mozambicoffea.
Leroy proposa d'exclure du genre Coffea, les sections Argocoffea et Paracoffea qui deviendraient ainsi de nouveaux genres. Le genre Coffea ne couvrait alors que les espèces des sections Eucoffea et Mascaracoffea. Et il subdivisa par la suite le genre Coffea en trois sous-genres : Coffea, Psilanthopsis, Baracoffea.

Bridson en 1982 décrivit quelques nouvelles espèces de Coffea en Afrique Orientale, contribuant à augmenter le nombre d'espèces du genre déjà connu, et améliorer la connaissance des cafés existants (A.Carvalho, et al., 1991.).

Aujourd'hui ce genre Coffea compterait plus d'une centaine d'espèces (Razafinarivo, N. J., et al., 2013 ; Hue T. T. M., 2005 ; MEKONEN HAILEMICHAEL SALLA, 2009).
Ce qu'il faut retenir, selon la typologie systématique, c'est la classification des caféiers comme ceci (Cornejo, A. Vinicio, M., 2012):

- règne : Plantae
- division : Magnoliophyta
- ordre : Rubiales
- famille : Rubiaceae
- tribu : Coffeae

- genre : Coffea L.
- sous-genre : Coffea

A partir de la tribu Coffeae il s'agit de ne pas se tromper car celui-ci se divise en genre Coffea L. et Psilanthus, puis dans le genre Coffea L. on comprend les sous-genres Coffea et Baracoffea, et c'est à ce sous-genre Coffea qu'est réservé les caféiers (Lecolier, A., 2010 ; M. Noirot, et al., 2003 ; MAURIN O., 2007.).

Ils sont issus de la grande famille des Rubiacées qui comprend environ 650 genres et 13000 espèces (GOMEZ C., 2009). Cette famille est répandue et concentrée dans les régions tropicales et subtropicales, et la plupart de ces espèces tropicales sont des arbres ou des arbustes d'environ une dizaine de mètres.

I.2 La description botanique du genre Coffea, et de l'espèce Coffea arabica var. Typica.

Le genre Coffea

A l'état sauvage, le caféier est en général un arbuste de sous-bois qui peut atteindre entre 6 et 12 mètres de hauteur. Il est dit sciaphile et ombrophile, car la plupart des cafiers sont des arbustes des étages inférieurs de la forêt. Ils sont originaires de grands ensembles biogéographiques localisés en Afrique, que sont : la zone guinéo-congolaise, l'Afrique de l'Est, Madagascar, l'archipel des Comores et les îles Mascareignes.

Ils sont décrits comme ayant un tronc monopodial (c'est-à-dire un seul axe), orthotrope, sur lequel se fixent à chaque nœud, deux rameaux plagiotropes opposés, semblables, à ramification sylleptique (branches issues directement du tronc).

Le bois est tendre et pliant, les branches de forme cylindriques, ainsi que le tronc ont une écorce fine et grisâtre qui se gerce en desséchant (G.-E Coubard d'Aulnay, 1832).

Ces rameaux possèdent à chaque nœud des méristèmes axillaires de deux natures différentes évoluant soit en rameaux plagiotropes secondaires, soit en boutons floraux, (Lecolier A., 2006 ; Pinard F., 2008). Seules les ramifications portent les fleurs et les fruits.

Le caféier a des feuilles simples, opposées, de couleur vertes lisses et luisantes sur la face supérieure et pâles sur la face inférieure. Elles sont persistantes, glabres, de forme elliptiques, ovales, ou obovales, avec des nervures proéminentes, et des marges peu ondulées. Les dimensions des feuilles extérieures (exposées à la lumière) peuvent atteindre 12 à 30 cm de longueur et 5 à 15 cm de largeur selon l'espèce.

Les feuilles ont un apex acuminé (qui se termine en pointe effilée) et un court pétiole d'environ 2cm, les stipules sont interpétiolaires, triangulaires. Les feuilles présentent des points imprimés

aux aisselles des nervures sur la face inférieure. Les branches sont longues, flexibles et retombent vers le sol (G.-E Coubard d'Aulnay, 1832 ; Fournet J., 2002 ; Jeanguyot M., et al., 2003 ; Elzebroek A. T. G., 2008.).

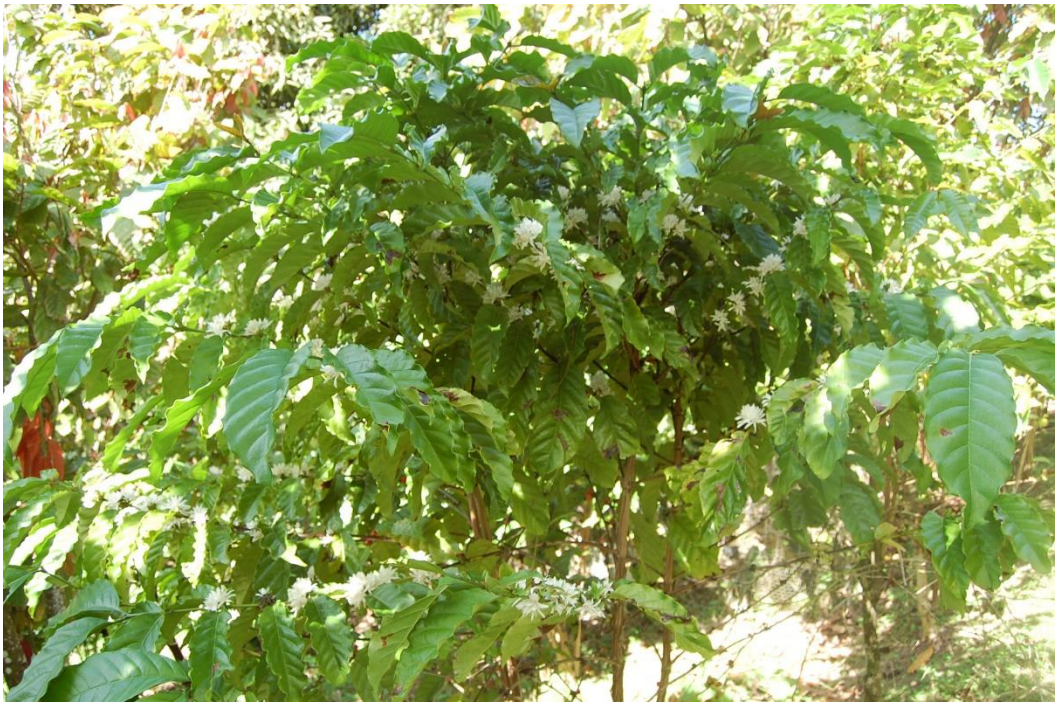


Photo 1: Coffea canephora (Chez un particulier, en Martinique, photo de Jean-Philippe CLAUDE, 10/02/2015)



Photo 2: Coffea liberica (Domaine de l'Emeraude au Morne Rouge, Martinique, photo de Jean-Philippe CLAUDE, 10/02/2015)



Photo 3: Coffea arabica (Chez un particulier, en Martinique, photo de Jean-Philippe CLAUDE, 10/02/2015)

Le caféier donne des fleurs de couleurs blanches, qui dégagent un parfum proche de celui du Jasmin (Geletu K. T., 2006; Pinard F., 2008). Généralement les bourgeons floraux apparaissent après une période sèche plus ou moins importante selon les espèces et se développent en fleurs, au maximum 14 jours après une pluie déclenchante.

Ces fleurs sont organisées en grappe, à l'aisselle des feuilles, et forment de belles guirlandes. On peut compter jusqu'à 30 fleurs par nœud, et le caféier parait alors enneigé. Elles ne durent qu'au maximum deux ou trois jours (Eira, M. T., et al., 2006). La fleur est bisexuelle, en forme de coupe, le calice vert, avec quatre à huit lobes, tubulaire, la corolle de cinq à huit lobes, 1 cm de long et de diamètre 1 à 15 cm, les étamines sont insérées dans la gorge, l'ovaire est inférieur et possède deux loges avec chacune un ovule donnant ensuite après fécondation, des drupes que l'on nomme « cerises ».

Ses drupes ou fruits mesurent environ 1,5 cm de long, sont ovales-elliptiques, à pulpes sucrées et généralement charnues, et contiennent normalement deux graines. L'exocarpe est vert quand il est immature, puis vire au jaune, puis rouge au violet à maturité et noir lors du séchage (Elzebroek, A. T. G., 2008).

Les cerises arrivent à maturité après 6 à 8 mois pour l'arabica et 9 à 11 mois pour le robusta. Une récolte (lorsqu'il s'agit d'une région à régime pluviométrique unimodal donc à une saison des pluies) ou deux récoltes (lorsqu'il s'agit d'une région à régime pluviométrique bimodal) sont possibles par rapport aux synchronismes des floraisons avec les saisons de pluies (Pinard

F., 2008 ; Lamah D., 2013). Un caféier à une durée de vie pouvant atteindre 25 voire 50 ans et même plus (Bizimana J.P., 2007).

Les grains de café, mais aussi la plante elle-même, contiennent de la caféine, un alcaloïde de la famille des méthylxanthines (Carvalho et al., 1965 ; Kalberer P., 1965) qui agit comme un stimulant. La quantité de teneur en caféine varie en fonction des espèces de caféiers (Charrier A., et al., 1975). La teneur en caféine dans Coffea canephora est d'environ 2,5%, alors que dans le Coffea arabica, elle est seulement autour de 1,5% (Tulet J. C., 1998 ; BAREL M., 2008 ; Pohlan, H. A. J., et al., 2012).

Globalement la teneur en caféine dépend davantage du génotype du café considéré, que des facteurs environnementaux (Charrier A., et al., 1975), et tout au long du développement de la plante, il y a des processus soit de transformation chimique de la caféine, soit de translocation de la caféine des feuilles aux autres organes (Kalberer P., 1965), expliquant le fait que l'on puisse retrouver de la caféine dans la plante entière.

Du point de vue de la rhizosphère, les caféiers développent un système racinaire relativement peu profond, pivot seulement jusqu'à 1m de profondeur ou moins, la plupart des racines pour les ressources nutritives du sol sont situées à 30-40cm seulement de profondeur, (Bermudez E. S., 1954 ; DaMatta F. M., et al., 2007 ; Elzebroek, A. T. G., 2008).

Coffea arabica var. Typica

Coffea arabica var. arabica ou encore appelé « Coffea arabica var. Typica Cramer» (Anthony F., et al., 2001), l'espèce la plus cultivée dans le monde et qui donne un café doux et aromatique, se décline en deux grandes variétés les plus connues: le Typica et le Bourbon; qui ont donné un certain nombre de variétés, de mutants, d'hybrides soit naturellement, soit de manières anthropique ; parmi lesquelles on peut citer: le Catimor, le Catuai, le Caturra, le Mokka hybride… (Steiger D., et al., 2002).

Le Coffea arabica var. Typica, étudié dans cette présente étude, se caractérise par des feuilles opposées, courtes, à symétrie dorsiventrale, elliptique ou ovale, et de nature coriaces. Elles sont de couleur vert sombre, lustrées sur la face supérieure et pâle sur la face inférieure. Elles mesurent 5 à 20 cm de longueur et 1,5 à 9 cm de largeur. Les nervures latérales sont organisées par paires, l'apex est étroitement aigu ou acuminé, le pétiole est long de 4 à 12 cm, et les stipules sont triangulaires et acuminées. Les branches sont comprimées et glabres de couleur gris pâle.

Au niveau de l'insertion des feuilles sur les branches, les pétioles ont un contour en forme de coquille, avec dans la partie supérieure deux oreillettes représentant les premiers stades de la croissance du limbe.

Les fleurs du caféier sont disposées en grappes axillaires, allant de 2 à 20 fleurs par aisselle, entourées d'un calice formé par deux paires de bractéoles (Dedecca D.M., 1957). En général, les inflorescences se développent dans l'aisselle des feuilles des branches latérales ou plagiotropes, et très rarement dans les branches orthotropes (Carvalho A., et al., 1991.; Fournet J., 2002).

Les ovaires après fécondation donnent un amas globulaire, des drupes sous forme de grappes resserrées au niveau des nœuds. Ces drupes ou fruits mesurent 14-18 mm de long et 10-15 mm de diamètre. Ce fruit est nommé cerise, parce qu'à maturité (après 7 à 9 mois) il prend la couleur rouge (Photo n°4).

Le fruit contient en son sommet un petit ombilic. La pulpe (ou mésocarpe) est recouverte d'une enveloppe nommée épiderme (ou exocarpe) mince et molle, mucilagineuse et glaireuse. La pulpe ou matière charnue renferme deux coques minces, dures, ovales, accolées l'une contre l'autre par leur coté plat appelé parche (ou endocarpe) de couleur jaunâtre.

Ces coques sont composées de deux graines (des semences qui sont d'ailleurs recouvertes d'une pellicule argentée) qui sont ovales, convexes d'un côté et plat de l'autre, avec une raie profonde au milieu (D.M. Dedecca, 1957 ; G.-E Coubard d'Aulnay, 1832 ; Viani R., 2004 ; Eira, M. T., et al., 2006 ; MEKONEN HAILEMICHAEL SALLA, 2009). Les fèves mesurent 9-12 mm de long, 6-7 mm de large et 3-4 mm d'épaisseur et pèsent 0,15-0,20 g.



Photo 4: Fruit et semence du Coffea arabica var. Typica, (photo de Jean-Philippe CLAUDE, 02/2015)

Au niveau du système racinaire de Coffea arabica, (en forme de cône inversé), la racine primaire du café atteint environ 1m de profondeur, les racines secondaires entre 10 et 30 centimètres et les radicelles se retrouvent à moins de 20cm de profondeurs dans la partie superficielle du sol (Bermudez E. S., 1954). Le système racinaire du caféier varie en fonction du type de sol dans lequel il se développe (Bermudez E. S., 1954).

Grâce à de nombreuses recherches scientifiques, les profils biologiques des caféiers dont le Typica, sont connus.

I.3 Profil biologique de Coffea arabica et recherches génétiques.

Le café a fait l'objet de nombreuses recherches dans le monde, afin de mieux connaître et d'estimer le patrimoine génétique des caféiers, mais aussi pour d'autres domaines, par exemple les différents processus d'hybridation qu'ont connus ces espèces, les processus de floraisons… etc., (Mendes A. J. T., 1941 ; Krug C. A., 1949 ; Medina D. M., 1965 ; Le Pierrès, D., 1999 ; Noirot M., et al., 2003 ; Hue T. T. M., 2005 ; ARTERO A.S., 2006 ; Geletu, K. T., 2006, Morais, H., et al., 2008 ; Tesfahun A. S., 2009 ; Vidal R. O., et al., 2010 ; Raf Aerts et al., 2013 ; Shimekit Tadele, et al., 2014).

La biotechnologie a permis de faire des progrès considérables en matière d'étude du patrimoine génétique des caféiers et de la phylogénie (H. Etienne, et al., 2002 ; Santana-Buzzy, N., et al., 2007 ; Teressa, A., et al., 2010 ; Mondego, J. M. et al., 2011), notamment grâce à l'utilisation de plusieurs types de marqueurs d'ADN.

Ainsi la diversité génétique de Coffea arabica, de ces cultivars et des autres espèces de caféiers, ont été estimées lors de différentes études dans le monde, en étudiant l'ADN à l'aide de :

- isoenzymes: premiers marqueurs moléculaires appliquées au genre Coffea,
- en utilisant la longueur de fragments amplifiés à l'aide de marqueurs AFLP (Steiger, D., et al., 2002 ; Anthony F., et al., 2002),
- mais aussi à l'aide de marqueurs RAPD (F. Anthony, et al., 2001),
- ou encore par des marqueurs microsatellites polymorphes nucléaires (répétitions de séquences simples, SSR), (Teressa, A., et al., 2010 ; Razafinarivo, N. J., et al., 2013).

Il en résulte que Coffea arabica est une espèce tétraploïde (2n= 44 chromosomes) et autogame (auto-fertile), alors que les autres espèces de café et y compris l'autre espèce la plus cultivée : C. canephora (ou encore appelé Robusta), sont plutôt diploïdes (22 chromosomes) car elles doublent le nombre de chromosomes de base du genre Coffea qui est de n = 11 ; et sont allogames (autostérile), (Meyer F. G., 1965 ; Carvalho A., et al., 1991 ; F. Anthony, et al., 2001 ; Steiger D., et al., 2002 ; MAHÉ L., 2007 ; Pinard F., 2008 ; Clarindo, W.R., et al., 2008 ; Bertrand B., et al., 2012.).

Le facteur explicatif du caractère allotétraploïde du Coffea arabica (Figure 1), espèce appelée aussi amphidiploïde, c'est que c'est un hybride naturel issu d'une hybridation entre deux formes ancestrales des espèces actuelles : C.eugenioides (22 chromosomes) et C.canephora (22chromosomes). C. Arabica détient ainsi dans son génome, l'ensemble de ces chromosomes (44), (Etienne H., et al., 2002 ; MAHÉ L., 2007; Noirot M., et al., 2003). Ce processus d'hybridation aurait été permis par des conditions climatiques particulières (Lecolier A., 2010).

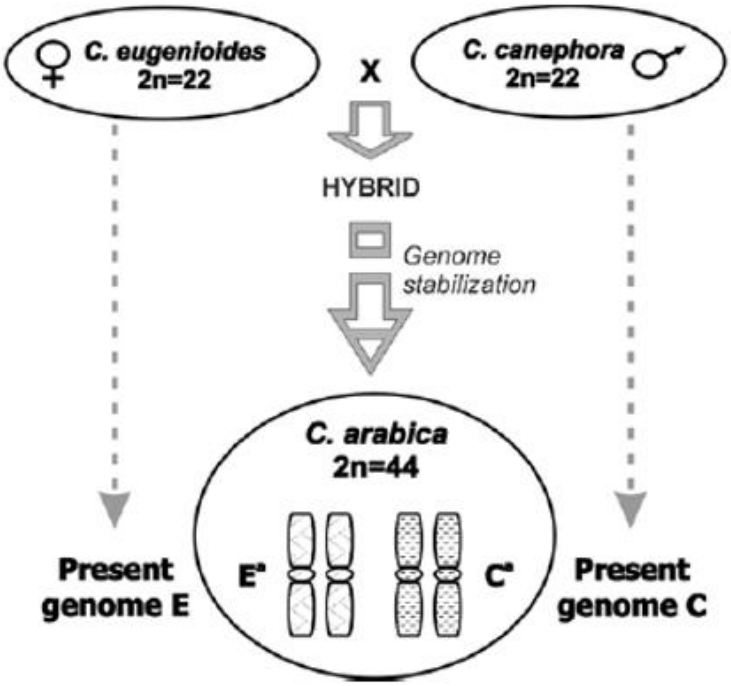


Figure 1) Origine de l'espèce allotétraploïde : Coffea arabica.[2]

Coffea arabica, en condition naturelle est autogame à presque 95% et connait 5% d'allogamie par rapport aux pollinisations croisées liées au vent ou aux insectes (Bertrand B., et al., 2012 ; Hue T. T. M., 2005 ; CARVALHO A., et al., 1957 ; GOMEZ C., 2009).

La variété Typica est considérée comme le type primitif de l'espèce Coffea arabica, le caféier standard ou de référence, pour toutes les études génétiques sur l'espèce et ses variétés (Antunes Filho, H., et al., 1957).

Au sein de Coffea arabica et de ses cultivars, il y a une similarité génétique étroite, mais le plus haut niveau de diversité génétique se trouve dans le cultivar Catimor, et le plus bas niveau de diversité génétique se trouve dans le Caturra. Et il a été démontré qu'au sein des caféiers, le Coffea canephora est plus étroitement liée à C. arabica, qu'il ne l'est avec C. liberica ; ce qui s'explique par le fait que C. canephora est l'un des descendants des précurseurs ancestraux de C. arabica (Steiger D., et al., 2002.).

Les bases génétiques des principales espèces d'arabica, à savoir le Bourbon et le Typica ont peu divergé en trois siècles de sélection et sont peu différenciés du matériel sauvage. Il a d'ailleurs été mis en évidence une diversité génétique extrêmement réduite dans Coffea arabica L. par rapport à Coffea canephora.

Toutefois les espèces sauvages en Ethiopie constituent d'importantes ressources génétiques opportunes, pour les programmes de sélection et de création de variétés améliorées (Sylvain P. G., 1958) ; offrant la possibilité d'améliorer la tolérance des cultures actuelles, à différents

[2] Figure tirée de la thèse de MAHÉ Laetitia, soutenue le 9 janvier 2007, à MONTPELLIER SUP AGRO : Contribution à l'amélioration génétique de la résistance des caféiers (Coffea arabica L.) à la rouille (Hemileia vastatrix) : De l'étude des hybrides interspécifiques naturels de Nouvelle-Calédonie à la cartographie d'un locus de résistance.

facteurs biotiques (champignons…), et abiotiques (stress hydrique), (H. Etienne, et al., 2002 ; MAHÉ L., 2007; Woldemariam T., et al., 2001).

L'estimation de ce patrimoine génétique des caféiers et de la diversité génétique notamment chez Coffea arabica a permis de connaître le potentiel d'utilisation des espèces sauvages afin de créer de nouvelles espèces et d'améliorer la production de café en fonction de plusieurs critères.

Les principaux objectifs de l'amélioration génétique ont eu pour but d'améliorer les variétés cultivées pour être (Gutiérrez G., et al., 1968 ; Bertrand, B. et al., 2005 ; Leroy T., et al., 2006 ; Santana-Buzzy, N., et al., 2007; MAHÉ L., 2007):

- adaptées à l'intensification des cultures

- plus résistantes aux maladies dont la rouille des feuilles, et aussi aux ravageurs

- plus résistantes aux stress abiotiques (gel, saison sèche plus longue que d'habitude)

- avec de meilleurs rendements de production

- tout en préservant la qualité organoleptique du café dans les nouvelles variétés obtenues

- mais aussi une adaptation à une agriculture écologiquement intensive basée sur l'agroforesterie.

Pour Coffea arabica, très reconnu pour sa bonne qualité à la tasse, l'objectif principal a été par exemple d'améliorer sa résistance aux agents pathogènes et d'avoir un meilleur rendement de production (Leroy T., et al., 2006).

Ainsi on peut mettre en avant trois grandes vagues d'amélioration du café, avec de nouvelles variétés beaucoup plus performantes, malgré la base génétique étroite du caféier arabica cultivé dans le monde (Bertrand B., et al., 2012).

Premièrement de 1930 à 1980 des variétés très bien adaptées à l'intensification de la culture et avec une qualité standard ont été sélectionnées. Puis deuxièmement à cause de maladies, telle que la rouille orangée, des gènes de résistance de C. canephora ont été transférés dans ces variétés améliorées, tout en gardant une qualité à la tasse équivalente ou inférieure, dans les années 1980 à 2000.

Et enfin troisièmement à partir de 1990, face aux nouvelles exigences d'une agriculture écologiquement intensive basée sur l'agroforesterie, de nouvelles variétés hybrides F1 ont été créées. Elles sont aujourd'hui les nouvelles variétés de café les plus performantes et produisent 30 à 60 % de plus que les meilleures lignées en systèmes agroforestiers, sans apport supplémentaire d'engrais (Bertrand, B. et al., 2005 ; Bertrand B., et al., 2012 ; Bertrand B., et al., 2011).

Pour de petits territoires par exemple qui ne peuvent bénéficier d'un nombre d'hectare important dédié à la culture du café, ces variétés hybrides F1 présenteraient un atout important en termes de productivité, tout autant qu'en termes de résistance aux facteurs biotiques et abiotiques limitants.

Il est à noter que plusieurs méthodes existent aujourd'hui en horticulture pour créer de nouvelles variétés, reproduire une espèce à l'identique détenant une caractéristique intéressante, ou encore, transférer un gêne spécifique d'une plante à une autre.

Il y a par exemple la fécondation artificielle par reproduction sexuée (mâle et femelle), qui consiste à choisir deux espèces ayant les critères que l'on souhaite et de les croiser.

La bouture, est une multiplication végétative d'une espèce en plusieurs autres individus identiques, à partir d'un organe ou d'un fragment d'organe isolé (racine, tige etc.) (Jesus, A. M. S., et al., 2010).

La multiplication in vitro permet de reproduire un individu presqu'à l'infini à partir d'un seul jeune rameau, en prenant le méristème qui se trouve au bout de la tige, et qui est un ensemble de cellules en perpétuelle croissance.

Ou encore la transgénèse qui consiste à augmenter la résistance des plantes cultivées face aux maladies en introduisant dans leur patrimoine génétique des gènes d'une autre plante résistante.

Ce qu'il faut retenir c'est que Coffea arabica, comprend plusieurs variétés dont des mutations, des hybrides…, dont on peut citer des variétés importantes: le Bourbon, le Typica, le Maragogype, le Mundo Novo, le Pache Comun, le Pache Colis..., mais aussi d'autres variétés telles que les variétés naines : le Caturra, le Catuai, le Catimor (Bart F., 2008 ; Pohlan, H. A. J., et al., 2012).

Mais cette présente étude a bien pour objet d'étude le Coffea arabica var. Typica originel introduit en Martinique, il y a presque 300 ans. Cette espèce et ses variétés sont d'ailleurs aujourd'hui très majoritairement cultivées dans le monde.

I.4 L'importance économique du café dans le monde.

Le café représente de nos jours, l'une des principales productions agricoles dans le monde, au quatrième rang des échanges commerciaux des produits agricoles et au second ou troisième rang des exportations après le pétrole (Pinard F., 2007 ; GOMEZ C., 2009).

La production est réalisée par les pays se situant dans la zone intertropicale, dont le plus important est le Brésil (plus de 30%), suivi des autres principaux pays souvent cités que sont : le Vietnam et la Colombie (17%), (Lamah D., 2013 ; DaMatta F. M., et al., 2007). D'autres pays peuvent aussi être cités en terme de production mondiale de café : l'Indonésie, le Mexique, le Guatemala, la Côte d'Ivoire, l'Inde, l'Ouganda, l'Ethiopie (Jeanguyot M., et al., 2003).

La consommation du café s'effectue essentiellement dans l'hémisphère Nord par les pays industrialisés occidentaux (65 millions de sacs de 60 kg importés par l'Union Européenne, 24 millions par les Etats-Unis, et 7 millions par le Japon, en 2007), (Lamah D., 2013).

Quelques espèces seulement du genre Coffea, ont été mises en culture par l'homme, parmi elles, le Coffea arabica et Coffea canephora sont les plus majoritairement cultivées, même s'il y a

aussi très marginalement les C. dewevrei, C. liberica, C. stenophylla, et C. racemosa qui sont aussi un peu cultivées.

Lorsqu'on parle de Coffea arabica var. arabica (ou encore appelé Typica Cramer) il s'agit d'une espèce, alors que c'est une variété de Coffea canephora appelée Robusta qui est majoritairement cultivée (Jeanguyot M., et al., 2003).

Le café dit de meilleure qualité, présentant des qualités sensorielles, des saveurs organoleptiques reconnues (Puerta G. I., 1998 ; Leroy T., et al., 2006 ; Aguilar P., et al. 2012) est le café arabica (Coffea arabica L.), qui représente environ 70% de la production mondiale (Anthony F., et al., 2000). Malgré la multitude de critères servant à définir un bon café (Tulet J. C., 1998 ; Viani R., 2004), le café arabica est en effet connu pour sa douceur alors que le robusta l'est pour son caractère énergisant (Bart F., 2007).

61,36% de la production mondiale de café provient de C. arabica, en raison d'une meilleure qualité de coupe, d'une faible amertume et d'une bonne saveur ; dont environ 80% de la production d'arabica provient d'Amérique latine, malgré son origine africaine (Bertrand B., et al., 2012), tandis que Coffea canephora représente 38,64% de la production mondiale de café.

La production de café (Coffea arabica) représentait en 2001, environ 14 milliards de dollars pour les pays producteurs, et la filière du café mobiliserait plus de 100 millions de personnes dans le monde (MEKONEN HAILEMICHAEL SALLA, 2009 ; Jeanguyot M., et al., 2003). La culture du café dans le monde représente en terme de superficie plus de 10 millions d'hectares, mais se sont généralement sur de petites exploitations d'environ 10 ha que se font les récoltes (DaMatta F. M., et al., 2007 ; BAREL, M., 2008 ; Pohlan, H. A. J., 2012).

Le café est très vite devenu la boisson la plus populaire, utile pour retrouver de la vivacité, et il désigne aussi le lieu emblématique des activités de détentes et intellectuelles, qui a pris le nom de « maison du café » et qui s'est développé un peu partout de l'Orient à l'Occident. Plus que cela, ces lieux sont devenus des lieux de rencontre, d'échange, de partage…, (Pinard F., 2008).

De nos jours le café est particulièrement utilisé dans de grands secteurs économiques que sont la pharmacie et les cosmétiques, au-delà de la simple consommation alimentaire. De ce fait de grands groupes industriels s'y sont intéressés tel que l'Oréal, démontrant là encore l'importance, et la valeur des grains de café.

D'ailleurs au niveau de la création et de la production de café, de plus en plus amélioré, le développement de croisements génétiques est un autre secteur économique tout aussi important qu'il faut prendre en compte. La valeur économique de ces ressources génétiques de caféiers sauvages en Ethiopie a d'ailleurs été estimée à plusieurs millions de dollars US dans le cadre d'une utilisation de ses ressources dans des programmes de sélection pour améliorer la résistance aux maladies du caféier, (Exemple : M. incognita et la rouille du café), améliorer le contenu de caféine trop faible, ou l'augmentation des rendements (Hein L., et al., 2006).

Pourtant ces ressources inestimables maintenues que dans le sous-étage des forêts montagneuses éthiopiennes, disparaitraient à un rythme alarmant, et nécessiteraient plus de politiques de conservation.

De plus la production de café démontre un très grand déséquilibre au niveau de la redistribution des bénéfices qu'elle procure. En effet ce sont les pays en développement qui produisent les grains de café mais ils ne contrôlent pas les prix qui oscillent beaucoup, et d'ailleurs, ils ne transforment pas les grains de café en produit fini à haute valeur ajoutée.

Pourtant les consommateurs demandent de plus en plus de café de meilleurs goûts (café dit de spécialité ou gourmet), produit dans de meilleures conditions sociales (le commerce équitable se développe) et plus adaptés à l'environnement, et c'est face à ces nouveaux éléments que les producteurs de café doivent tenter de se conformer (Pinard F., 2008).

I.5 Profil écologique de Coffea arabica var. typica selon la littérature scientifique mondiale.

Amplitude écologique

Le genre Coffea dans son ensemble, présente une amplitude écologique comprise entre 22°Nord et 26°Sud de latitude (Alvim P. D. T., et al., 2013). Son aire biogéographique se limite ainsi assez précisément à la ceinture intertropicale à l'échelle planétaire, mais présente des critères éco-climatiques encore plus précis à l'échelle locale, en fonction des variétés.

Niche écologique

La niche écologique d'origine du Coffea arabica est la forêt tropicale humide aux alentours des 2000 mètres d'altitudes, du sud-ouest de l'Ethiopie (Meyer F. G., 1965 ; GOMEZ C., 2009 ; Pohlan, H. A. J., 2012 ; DaMatta, F. M., 2007 ; Alvim P. D. T., et al., 2013).

Altitude

Globalement l'espèce Coffea Arabica est le plus souvent cultivée dans des régions montagneuses, à des altitudes élevées comprises entre 1500 et 2000 mètres, jusqu'à ce qu'on se heurte au problème du gel où là il atteint sa limite écologique, ce qui correspond à un climat tropical tempéré, idéale pour donner ses meilleurs rendements (Pinard F., 2008 ; Jeanguyot M., et al., 2003).

Néanmoins, on peut le retrouver en fonction des régions à des altitudes allant de 550 à 2000 mètres, comme au Brésil où le caféier pousse à environ 600 mètres d'altitude (ROSA, V., 2007 ; MEKONEN HAILEMICHAEL SALLA, 2009 ; Bart F., 2008 ; BAREL, M., 2008). Ceci s'explique par la latitude qui offre un climat suffisamment tempéré à ces basses altitudes, alors qu'à l'inverse plus on se rapproche de l'Equateur et plus il faut des altitudes élevées pour garder un climat tropical tempéré adapté à l'arabica.

Microclimat

L'arabica requiert de la fraicheur et la température moyenne doit ainsi être comprise entre 16° et 25°C, avec un optimum compris entre 18° et 22°C pour obtenir une bonne croissance et une bonne production (Rutunga V., et al., 1994 ; Tulet J.C., 1998 ; Soto et al., 2001 ; Viani R., 2004 ; Barros, M. A., et al., 2006 ; DaMatta F. M., et al., 2007 ; Meireles, E. J. L., et al., 2007 ; Pinard F., 2008 ; Elzebroek A. T. G., 2008 ; Solórzano, N., et al., 2010 ; Camargo M.B.P., 2010 ; Zullo Jr, J., et al., 2011 ; Cornejo, A. Vinicio, M., 2012 ; Lamah D., 2013). Les températures en dessous de 15°C /17°C et avoisinant les 30°C ne sont du tout pas souhaitables pour l'arabica (Bart F., 2008 ; Pohlan, H. A. J., et al., 2012 ; de Brito Ferreira E. P., et al., 2013).

Selon la littérature mondiale, les précipitations doivent être comprises entre 1200 et 2000 mm, voire même 2400mm d'eau/an, mais doivent être bien réparties sur l'année(Soto et al., 2001 ; Pinard F., 2008 ; Jeanguyot M., et al., 2003 ; Alvim P. D. T., et al., 2013), avec une saison sèche de deux à quatre mois, et une humidité relative de 60 % (Rutunga V., et al., 1994 ; DaMatta F. M., et al., 2007 ; Elzebroek, A. T. G., 2008). Le déficit hydrique mensuel ne doit pas excéder 100 à 150 mm d'eau. Néanmoins certains auteurs jugent qu'il faudrait surtout entre 1800 et 2000 mm d'eau/an pour que le café pousse correctement (Soto et al., 2001). Environ 3 ans après la plantation, le caféier produit ses premières fleurs et il faut environ 7 ans pour arriver en plein rapport.

Alors que Coffea canephora par exemple (ou Robusta), préfère les régions où l'arabica ne pousse pas : à savoir des altitudes beaucoup plus basses (< à 1000 mètres d'altitude en général), chaudes et très humides avec une pluviométrie importante. Autrement dit des températures moyennes allant de 24° à 26°C et des précipitations allant de 1500 mm à 3000 mm d'eau par an, avec une saison sèche de 2 à 3 mois (Pinard F., 2008 ; Lamah D., 2013).

Coffea canephora a d'ailleurs été découvert dans les forêts équatoriales du bassin du Congo et du golfe de Guinée et dans les savanes. On le nomme robusta, cette variété de Coffea canephora très cultivée, par rapport à sa vigueur, sa résistance aux maladies et ses récoltes plus abondantes. Pour toutes ses qualités, il s'est répandu dans le monde, en Afrique, à Madagascar, en Asie et en Amérique du Sud, alors que l'arabica se retrouve en Afrique, Madagascar et en Amérique (Costentin J. et al., 2010 ; Pohlan, H. A. J., et al., 2012).

Ombrage

Plus généralement, les caféiers sont des espèces plus ou moins ombragées par d'autres espèces à l'état sauvage (Vasquez Yaguas E. F., 1979 ; DaMatta F.M., et al., 2007, vol.25). Ce sont des espèces sciaphiles, et pourtant c'est cultivées en plein soleil qu'elles donnent de meilleurs rendements (DaMatta F. M., et al., 2007 ; DaMatta F.M., et al., 2007, vol.25).

Ceci s'explique par le fait qu'à l'état sauvage, le caféier se développe à l'abri des autres espèces où il va s'adapter à cet environnement ombragé qui lui permet de réduire la fatigue physiologique et de perdurer. Concrètement le caféier va accroitre la surface foliaire mais l'épaisseur diminue, les rameaux se rallongent mais le nombre d'entre-nœuds diminue, la floraison est ralentie et l'infrutescence est allégée.

L'ombrage retarderait ainsi la maturation des baies (Ricci M. D. S. F., et al., 2011), donnant un meilleur remplissage des haricots (Geromel C., et al.,2008) et une plus grande taille des grains

et par conséquent une meilleure qualité du café. Cependant, les rendements les plus élevés sont obtenus à partir de plantes de café cultivées en plein soleil (Bote A. D., et al., 2011 ; Pohlan, H. A. J., et al., 2012).

Cette situation de croissance ralentie et de faible production (sous ombrage), profitable à l'équilibre de la plante avec son milieu, n'arrange pas vraiment la culture. Et quand il est cultivé en plein soleil, le caféier s'emballe, et se développe : entre-nœuds plus courts, densité foliaire, inflorescence et infrutescence accrues, tout le développement de la plante est consacré aux remplissages des fruits (Pinard F., 2008 ; JARAMILLO-BOTERO C., et al., 2010). Tout ceci au détriment des autres organes de la plante qui montrent des carences (Carvajal J. F., 1960). Si la production reste importante pendant 2 à 3 ans, la plante se fatigue et finit par dépérir (phénomène dit de «die-back » : vieillissement précoce (Rutunga V., et al., 1994 ; DaMatta F. M., et al., 2007), et donc nécessite une augmentation accrue, coûteuse et permanente de fertilisation et d'irrigation.

La culture du café associée à d'autres espèces servant d'ombrage aurait d'ailleurs des avantages tels que la limitation de l'érosion des sols, l'élaboration des arômes…

Néanmoins les nouvelles variétés de café, les cultivars modernes sont dites « de soleil » puisqu'elles supportent mieux l'insolation, il s'agit du Caturra, Mundo Novo, le Catuai rouge ou jaune, le Catimor…, (Tulet J.C., 1998 ; Van Oijen M., 2010).

Facteur édaphique

Le caféier apprécie des sols fertiles, profonds (environ 1m20), bien drainés et aérés, (Tulet J.C., 1998 ; Rutunga V., et al., 1994 ; Bizimana J.P., et al., 2007 ; ROSA, V., 2007 ; Solórzano, N., et al., 2010 ; Pohlan, H. A. J., et al., 2012 ; Cornejo, A. Vinicio, M., 2012), des textures argilo-sableuses, volcaniques ou alluvionnaires, et plus exactement des limons fertiles légèrement acides, ou limons argileux d'origine volcanique, et avec pH de 4.5 à 6.6 (Soto et al., 2001 ; Elzebroek, A. T. G., 2008).

Le sol doit avoir en volume 50 % de porosité, 45 % de substances minérales et 5 % de matières organiques, la texture et la structure doivent être friables (Soto et al., 2001).

Toutefois il peut faire preuve de grandes facultés d'adaptation à différentes conditions pédologiques, grâce notamment aux techniques culturales (fertilisation, irrigation), et peut donc se développer dans des types de sols très variés (Rutunga, V., et al., 1994 ; Chemura A., 2014).

Le sol doit être d'une profondeur d'environ 1m20 à 2 m au-dessus de tout obstacle (nappe phréatique, roche-mère…), permettant un vrai enracinement des plantes et limite l'impact des mois de sécheresse.

Orographie et effet du vent

Beaucoup d'autres critères doivent aussi être pris en compte quel que soit le lieu choisi pour la culture du Coffea arabica var. Typica, tels que l'inclinaison des pentes, les effets des vents…, (Bizimana J. P., et al., 2007).

Le dénivelé des pentes est un critère à prendre en compte puisqu'il influe sur la pédologie, le drainage, le risque d'érosion… Ainsi les pentes doivent être comprises entre 10 et 40 % (Soto et al., 2001 ; Santos, L.D.P. et al., 2014), permettant un bon drainage du sol mais nécessitant des aménagements anti-érosifs et facilitant la culture.

Les effets du vent sont importants mais en fonction de son intensité. Des vents trop forts entravent le développement des fleurs et fruits (Pohlan, H. A. J., et al., 2012), entrainent la destruction des branches et abiment les plantes (Urquhart D. H., et al., 1953). Mais il y a aussi un effet physiologique entrainant une transpiration exagérée et une augmentation de la consommation de CO2 qu'il faut prendre en compte.

Toutefois il faut du vent pour favoriser les échanges gazeux au niveau des feuilles avec l'air ambient. Il faut donc des versants exposés à des vents faibles mais permanents et la présence de « haies-brises », « brise-vent », limitant l'effet du vent, telles que les eucalyptus et bananeraies (Bizimana J. P., et al., 2007 ; DaMatta F. M., et al., 2007 ; Pohlan, H. A. J., et al., 2012).

I.6 La culture du café en système agroforestier.

Le caféier est cultivé dans le monde sous différentes formes, soit en plein soleil (généralement de grandes plantations industrielles), ou dans un système agroforestier (plantations généralement villageoises). Dans ce dernier cas il existe une diversité de systèmes de plantation de caféier relevant des « systèmes agroforestiers » dont le caféier est ainsi sous ombrage.

Premièrement il y a le système de plantation de café dit rustique, consistant à planter les caféiers sous une forêt. Le sous-bois est alors modifié mais pas la canopée.

Deuxièmement il y a la polyculture traditionnelle, qui consiste à modifier la forêt d'origine en introduisant des espèces allochtones mieux adaptées pour l'ombrage et en y enlevant des espèces autochtones.

Puis troisièmement il y a la polyculture commerciale qui va conduire à enlever la forêt d'origine et installer un couvert végétale avec des espèces spécifiques pour l'ombrage de différentes cultures (Soto-Pinto L., et al., 2000 ; GOMEZ C., 2009).

La culture du café peut être associée à plusieurs types de cultures, soit vivrières ou de rente, avec des arbres fournissant du bois, ou tout simplement cultivé à l'ombre de grands arbres ne servant pas pour la culture, mais aussi avec des espèces servant d'engrais vert (Caramori, P. et al., 1996 ; Barbosa J. P. R. A. D., et al., 2005 ; Santamaría J., et al., 2005 ; Soto-Pinto L., et al., 2007 ; Kufa, T., et al., 2007 ; Pinard F., 2008 ; Rice R. A., 2008 ; Solórzano, N. et al., 2010 ; Matos E. D. S., et al., 2011 ; Cannavo, P. et al., 2011 ; Manga, M. A., et al., 2014).

La culture du café en système agroforestier offre ainsi plusieurs avantages, en termes de services environnementales et économiques : la conservation de ressources naturelles, l'augmentation de la biodiversité, tout comme l'augmentation des revenus des agriculteurs en fonction du type d'arbres d'ombrage associé à la culture du café fournissant du bois ou des

fruits, ou encore la limitation des maladies telle que la maladie des baies de café…, (Soto-Pinto L., et al., 2000 ; Pérez-Portilla E., et al.,2006 ; DaMatta F. M., et al., 2007 ; Soto-Pinto L., et al., 2007 ; Rice R. A., 2008 ; Bedimo J. M., et al., 2008 ; Siles P., et al., 2010 ; Ricci M. D. S. F., et al., 2011 ; Cornejo, A. Vinicio, M., 2012 ; Joseph Aubert Mouen Bedimo, et al., 2012 ; Maldonado-Martínez R., et al., 2014 ; Saucedo-García A., et al., 2014).

De plus les systèmes agroforestiers ont vocation à se développer davantage dans les années à venir, notamment en raison des enjeux liés à l'augmentation démographique mondiale et des problèmes d'alimentation, le changement climatique, et les limites de l'agriculture actuelle peu respectueuse de l'environnement (Charbonnier F., 2013 ; Lin B. B., 2010 ; Schmitt-Harsh M., et al., 2012)

En effet ces systèmes agroforestiers permettent de mieux utiliser les ressources du milieu, de limiter les effets du climat… Différents processus à l'œuvre au sein des systèmes agroforestiers dont par exemple les interactions entre arbres et cultures associées, où la séquestration du carbone dans les systèmes agroforestiers…, ont d'ailleurs fait l'objet de nombreuses recherches (Soto-Pinto L., et al., 2000 ; Morais H., et al., 2003 ; Campanha M. M., et al., 2004 ; Righi, C. A., et al., 2007 ; DaMatta F., et al., 2007, vol.25; Geromel C., et al.,2008 ; Van Oijen, M., et al., 2010 ; Lin B. B., 2010 ; VALENTINI L. S. D. P., et al., 2010 ; Siles P., et al., 2010 ; Youkhana A., et al., 2011 ; Montagnini, F., 2012 ; Baliza, D. P. et al., 2012 ; Schmitt-Harsh M., et al., 2012 ; Charbonnier F., 2013 ; Mancilla Díaz, G. E., 2013 ; Charbonnier F., et al., 2013).

Plusieurs espèces sont ainsi employées dans les systèmes agroforestiers avec le café afin de servir d'ombrage, de brise-vent, de lutte contre l'érosion ou encore comme couverture au sol pour renouveler la biomasse (Annexe 2 et 3, pages 119 et 125).

Les systèmes agroforestiers peuvent aider à lutter contre les effets de variation du climat, notamment pour l'arabica qui en est très sensible et est menacé par le phénomène de réchauffement climatique.

I.7 Les facteurs limitants

A) Les facteurs limitants abiotiques : impact du changement climatique

Effet du changement Climatique sur l'agriculture

Le changement climatique qui est avéré et en cours sur la planète, aura de plus en plus de répercussions sur les cultures, notamment celle du café (Lin B.B., et al., 2008 ; Coral, G., et al., 2009 ; Andrade G. A.et al., 2012 ; Altamirano Tinoco, J. A., 2013). Les variations climatiques ont en effet, un impact direct sur le rendement, la productivité des cultures, et cela fragilisera davantage l'agriculture, qui sera de plus en plus sollicitée à cause de l'augmentation soutenue de la population mondiale (Meireles, E. J. L., et al., 2007 ; Jaramillo J., et al., 2009 ; Coral, G., et al., 2009 ; Camargo, M.B.P. 2010 ; de Carvalho Alves M., et al., 2013).

La principale conséquence du changement climatique pour la culture du café arabica consistera en une réduction importante des zones propices à sa culture vis-à-vis de son profil écologique

(Assad E. D., et al., 2004 ; Gay C., et al., 2006 ; Junior J. Z., et al., 2006 ; Camargo, M.B.P. 2010 ; Davis AP, et al., 2012 ; BRAGANÇA R., et al., 2012 ; Andrade G. A.et al., 2012).

De plus l'impact des variations climatiques est très complexe puisque cela influe sur le développement des plantes, la phénologie des cultures, de plusieurs façons (Meireles, E. J. L., et al., 2007 ; Camargo, M.B.P. 2010). Plusieurs effets néfastes des différents facteurs climatiques sur la culture du café peuvent être mis en avant.

La réduction de la ressource en eau, et donc le stress hydrique peut par exemple limiter le processus de la photosynthèse, mais l'exposition à un trop fort ensoleillement par rapport à la normal aussi.

Pour Coffea arabica des températures dépassant 23°C peuvent accélérer probablement la maturation des fruits au détriment de la qualité et des températures au-delà peuvent entrainer le flétrissement des feuilles, l'avortement des fleurs..., (Camargo M.B.P., 2010 ; Davis AP, et al., 2012).

Des températures inférieures à 18°C ne favorisent pas non plus la croissance de la plante. La température a un effet sur la qualité du café puisqu'il a été démontré que durant le développement des semences, elle a un effet sur les processus métaboliques des graines, et de ce fait c'est un facteur primordiale à prendre en compte (Joët T., et al., 2010.).

De plus la hausse des températures maximales de l'air peut contribuer à l'augmentation des attaques des agents pathogènes sur les cultures, et la baisse des températures minimales peut accentuer les phénomènes de gel, néfaste pour le café. (Camargo M.B.P., 2010).

Toutefois d'autres variables climatiques, malgré leurs variations attendues dans le cadre du changement climatique n'auront pas un effet aussi significatif sur la culture de café. C'est le cas de l'augmentation combinée des taux de CO_2 et des hautes températures qui selon des études n'auront pas un impact significatif sur l'équilibre minéral des plantes (Martins Lima et al., 2014).

Principaux facteurs climatiques préoccupants

Ce sont essentiellement l'augmentation des températures et les variations importantes de la pluviométrie (alternance trop rapide d'années trop sèches et trop pluvieuses) qui seront préoccupantes (Bertrand B., et al., 2012). Les zones dites très vulnérables sont celles où l'eau est déjà rare ou les températures déjà élevées.

La température est bien le facteur le plus préoccupant pour la production de café, puisque des simulations dans divers modèles créées, montre que la production de café réagit de façon significative à des schémas de changement de température (Gay C., et al., 2006 ; Eitzinger A., et al., 2013).

Pool génétique sauvage menacé

Le changement climatique global accentué par les activités humaines (pollutions, destruction d'habitats naturels…), en entrainant des changements des conditions écologiques sur la planète, rend d'ailleurs aussi plus vulnérable les espèces sauvages, qui ont une importance capitale. La diversité génétique de ces caféiers sauvages est, et peut encore être utilisée pour l'amélioration du café, à travers la création de nouvelles variétés plus résistantes aux maladies par exemple. Le développement de ses espèces sauvages, leurs processus de spéciation…, sont aujourd'hui particulièrement menacés par le changement climatique et plusieurs méthodes de conservation ont été mises en place telles que la conservation in vitro et la cryopréservation (Castilla Valdés Y., 2012 ; Davis AP, et al., 2012).

Solutions : prévisions agro-météorologiques

La gestion des cultures domestiquées nécessite de maîtriser au mieux les variables climatiques, par l'intermédiaire des modèles agro-météorologiques. Ces modèles permettent par exemple de faire des prévisions sur les bilans hydriques du sol, la température de l'air et du sol, le rendement des cultures, afin de préserver la croissance optimale des plantes et sauvegarder une certaine productivité (ROSA, V., 2007 ; Meireles, E. J. L., et al., 2007 ; dos Santos M. A., et al., 2006 ; Meireles, E. J. L., et al., 2007 ; Camargo, M.B.P. 2010).

Solutions : amélioration des méthodes agricoles

Parmi les mesures qui existent pour limiter l'impact des changements des conditions climatiques, il est proposé d'améliorer l'utilisation de l'engrais (Silva S. D. A., et al., 2011.), d'avoir une meilleure récupération de l'eau, de faire évoluer les variétés cultivées (cultivars plus résistants), ou d'avoir une bonne gestion de l'ombrage pour les caféiers lorsque l'environnement est difficile pour la plante (Camargo, M.B.P. 2010).

L'effet d'ombrage des arbres dans un système agroforestier, permet de diminuer la température ambiante de 2 à 3°C pour la culture du café, d'éviter les diminutions importantes des températures nocturnes en altitude, de diminuer la vitesse des vents et d'augmenter l'humidité relative de l'air (Lin B.B., et al., 2008 ; Camargo, M.B.P. 2010).

Plus globalement il est ainsi recommandé de développer davantage la gestion agro-écologique simple, durable, des cultures : tel que l'agroforesterie, les différentes formes d'agriculture traditionnelle (Lin, B.B., et al., 2008).

Quoiqu'il en soit il y a eu de plus en plus une prise de conscience, de l'impact du changement climatique sur les cultures et les études se multiplient pour en évaluer les effets et mettre en place des mesures concrètes (Gay C., et al., 2006).

Au Brésil par exemple, il avait été pris en compte dès 2004, les prévisions du GIEC sur la hausse des températures de 1° à 5,8°C, et une augmentation de 15% des précipitations. Il avait alors été estimé que si l'on prenait en compte une augmentation de la température de 5,8°C, les zones propices à l'arabica (18° à 23°C) diminueraient de 95% dans les Etats de Goiás, Minas Gerais et de São Paulo, et de 75% à Paraná (Assad E. D., et al., 2004 ; Junior J. Z., et al., 2006).

Plus récemment en Haïti, en 2014, le même constat a été établi concernant l'impact significatif que les changements de températures et de précipitations auront sur la production de café. A Haïti, le café tout en devenant considérablement moins adapté dans les zones de production de basses altitudes, aura une qualité moindre et les rendements des régions productrices de café diminueront (Eitzinger A., et al., 2013.).

Tout cela démontre la réelle menace que représente le changement climatique sur la production de café dans le monde et plus largement sur l'agriculture et qu'il serait nécessaire d'intégrer aujourd'hui dans toute étude de zonage agro-écologique pour lancer une culture.

B) Les facteurs limitants biotiques

Multiplicité des facteurs limitants biotiques.

Outre le changement climatique, il est aussi très important de prendre en compte l'impact des ravageurs, des mauvaises herbes et des agents pathogènes comme facteurs limitant ou impactant sérieusement les cultures caféières. Les impacts néfastes de ces agents respectivement nuisibles, concurrentiels et pathogènes, sont plus ou moins connus et maîtrisés, et des moyens de lutte ont été recherchés pour les traiter de façon efficace (Bertrand B., et al., 2012).

Il existe plusieurs agents nuisibles: les animaux (rongeurs, escargots), les insectes, qui sont eux-mêmes vecteur d'agents pathogènes : les bactéries, les champignons, les virus.

Les agents concurrentiels telles que les mauvaises herbes sont aussi à prendre en compte, dans la mesure où ils impactent les cultures… (NANDRIS D., et al., 1997 ; Ronchi C.P., et al., 2006).

L'espèce Coffea arabica et ses variétés sont très sensibles aux maladies, aux ravageurs, aux agents pathogènes, qui affectent les rendements des cultures, et voire jusqu'à en détruire complètement les cultures (Pinard F., 2007 ; Mahé L., 2007). L'espèce est aussi très sensible aux agents concurrentiels que sont les mauvaises herbes (Viani R., 2004).

Plusieurs études ont d'ailleurs été menées sur les différents agents nuisibles, un peu partout dans le monde : Van der Vossen H. A. M., et al., 1976 ; Avelino J., et al., 1993 ; Pellegrin F., et al., 2000 ; Carneiro, R. M., et al., 2000 ; Anzueto F., et al., 2001 ; Martinez A., 2002 ; Miguel Angel Escalona Aguilar, 2002 ; Bieysse D. et al., 2002 ; Gouveia M. M. C., et al., 2005 ; Herve, G., et al., 2005 ; Avelino J., et al., 2006.; Mahé L., 2007 ; Villain, L., et al., 2008 ; Jaramillo J., et al., 2009 ; Boisseau M., et al., 2009 ; Avelino J., et al., 2009.; Cabos R. Y. M., et al., 2010 ; Albuquerque E., et al., 2010 ; Avelino J., et al., 2011 ; Capucho A. S. et al., 2012.

➢ Les maladies des caféiers:

• Hémileia vastatrix (champignon, parasite foliaire)

Ce champignon parasite responsable de la **« maladie de la rouille des feuilles »** (Viani R., 2004 ; MAHÉ L., 2007 ; Pinard F., 2008 ; Cristancho, M., et al., 2008 ; Romero G. et al., 2010 ; Vieira A., et al., 2012 ; Cornejo, A. Vinicio, M., 2012), est parmi les plus importantes maladies que rencontre la culture du café dans le monde, (exemple : la perte totale des cultures caféières à Ceylan en 1870).

C'est un champignon biotrophe basidiomycète appartenant à l'ordre des Urédinales et la famille des Pucciniacées (MAHÉ L., 2007), et se retrouve un peu partout dans le monde, dans les cultures de café, et est particulièrement dévastateur.

Ses spores pénètrent le café par les stomates, développant des pustules orange sur la surface inférieure des feuilles, entraînant des troubles de la photosynthèse, une défoliation et une perte de rendement des cultures (Gouveia M. M. C., et al., 2005). La maladie débute par l'apparition de petites taches translucides sur les feuilles (MAHÉ L., 2007).

Pour lutter contre cette maladie de la rouille des feuilles, des moyens de lutte chimique ont été développés à partir de chaux soufrée, mais vis-à-vis de la protection de l'environnement d'autres moyens de lutte ont été recherchés.

Coffea canephora est par exemple plus résistant à la rouille que C.arabica, et de nouvelles variétés possédant ce gène de résistance ont été l'objet des recherches scientifiques, mais le champignon a donné de nouvelles races tout aussi virulentes, maintenant toujours des risques pour la culture (Cristancho, M., et al., 2008.).

L'altitude reste tout de même un bon obstacle au développement de la maladie de la rouille (Avelino J., et al., 2006.).

• Colletotrichum kahawae (mycose parasitaire)

Il y aussi la maladie des baies de café ou **« anthracnose des baies »**, qui a beaucoup touché les cultures caféières en Afrique (Van der Vossen H. A. M., et al., 1976 ; Pinard F., 2008 ; Bedimo J. M., et al., 2008) causées par diverses espèces de champignon tels que Colletrotrichum coffeanum noack ou encore Colletotrichum kahawae (Bieysse D. et al., 2002.).

La maladie est spécifique aux baies vertes et les pertes de récolte peuvent atteindre 20 à 80% (Bieysse D. et al., 2002 ; Pinard F., 2008 ; Bedimo J. M., et al., 2008).

- **Fusarium xylarioides (trachéomycose)**

C'est un autre champignon, essentiellement présent qu'en Afrique car endémique de pays africains, là aussi néfaste pour la culture de café puisqu'il conduit au **« flétrissement des caféiers »** et a déjà causé beaucoup de pertes économiques importantes en Ouganda par exemple (Musoli C. P., et al., 2008.; Pinard F., 2008).

Parmi les autres maladies possibles on compte (Stehlé, H., 1954 ; Vasquez Yaguas E. F., 1979 ; Belayneh Mulaw T., et al., 2010 ; Patricio F. R. A., et al., 2010) : « l'Ojo de gallo » (causé par le champignon Mycena citricolor), « la Tache de Fer » (causé par le champignon Cercospora coffeicola), « Mal de Hilachas » (causé par le champignon Pellicularia koleroga ou encore nommé Ceratobasidium noxium), « Mal de talluelo » (causé par le champignon Rhizoctonia solani), « Phoma » (causé par l'agent pathogène végétal : Phoma costaricensis), la trachéomycose (causée par le champignon Gibberella xylarioides).

➢ **Quelques exemples de ravageurs :**

- **Hypothenemus hampei (insecte scolyte)**

Ce qu'on appelle dans le monde « Coffee berry borer », est dû à ce scolyte qui à l'état larvaire, perfore les baies de café et abime les grains (Vasquez Yaguas E. F., 1979 ; Viani R., 2004 ; del Carmen Cárdenas, M., et al., 2010 ; Cornejo, A. Vinicio, M., 2012). Les pertes de récoltes peuvent être importantes (jusqu'à 30%), ainsi qu'une forte baisse de la qualité finale (Pinard F., 2008).

Plusieurs recommandations sont décrites par Cornejo, A. Vinicio, M., 2012 : élaguer les arbres durant la saison sèche, récolter les résidus de fruits sur la plante et au sol, espacer les caféiers entre eux, et détruire les caféiers abandonnés. Puis il est aussi proposer de lutter biologiquement en utilisant des ennemis naturels à ce ravageur, telles que des guêpes.

- **Leucoptera coffeella (papillon)**

Surnommée la mineuse de feuille, c'est un papillon de 6,5 mm d'envergure qui dépose ses œufs sur les feuilles, et les larves créent des lésions dans les feuilles. C'est l'une des pires espèces de ravageurs des cultures de café (les pertes de récolte peuvent aller jusqu'à 80%). Il est souvent traité par des pesticides mais finit toujours par devenir résistant à ceux-ci. De plus il a été démontré que la répartition spatiale de ses populations est influencée par les facteurs environnementaux, montrant encore une fois qu'il faut prendre en compte ses interactions environnementales dans la gestion des cultures (Vasquez Yaguas E. F., 1979 ; Scalon J. D., et al., 2011.).

Parmi les autres ravageurs possibles on compte : Plagiohamus maculosus Bates (foreur de tiges), le Coccus viridis (cochenille verte), Pseudococcus sp. (cochenille), Oligonychus punicae Hirst (araignée rouge), Paroecanthus niger Sauss (Cricket de café), (Vasquez Yaguas E. F., 1979 ; Fernandes, F. L., et al., 2009).

- **Méloidogyne spp. (nématode)**

Ces nématodes endoparasites du genre Meloidogyne, sont d'autres types d'agent pathogène particulièrement dévastateurs pour les caféiers (Martinez A., 2002 ; Viani R., 2004).

Après plusieurs semaines d'exposition au nématode, il y a désintégration progressive des systèmes racinaires, une croissance réduite, la chlorose, des carences nutritionnelles...

Parmi les différentes espèces de nématodes Méloidogyne, il y a Meloidogyne incognita, Meloidogyne exigua, Meloidogyne konaensis, Meloidogyne paranaensis, Meloidogyne izalcoensis (Anzueto F., et al., 2001 ; Martinez A., 2002 ; Carneiro, R. M., et al., 2005 ; Cabos R. Y. M., et al., 2010 ; Barros, A. et al., 2011).

On sait que les variétés de Coffea arabica sont très sensibles globalement à ces nématodes. Le robusta ou encore appelé C. canephora est d'ailleurs souvent utilisé comme porte-greffe dans les cultures, car il est plus résistant aux nématodes (Villain, L., et al., 2000 ; Anzueto F., et al., 2001 ; Martinez A., 2002 ; Villain, L., et al., 2002 ; VILLAIN L., et al.,2004 ; Cornejo, A. Vinicio, M., 2012), mais n'est pas adapté aux hautes altitudes, et il a donc fallu trouver des variétés d'arabica plus résistantes au nématode. Et c'est grâce aux ressources génétiques des caféiers d'Ethiopie que l'on a trouvé des gènes de résistance aux nématodes, et qui ont conduit les pays producteurs à devoir élargir la base génétique des caféiers arabica cultivés.

Parmi les autres nématodes possibles on compte : Pratylenchus coffeae, Xiphinema americana, Xiphinema radicola (Vasquez Yaguas E. F., 1979 ; Inomoto, M. M., et al., 1998 ; Inomoto M. M., et al., 2007 ; Handoo, Z. A., et al., 2008 ; Inomoto, M. M., et al., 2008 ; Villain, L., 2008 ; Trinh P. Q., et al., 2011).

Des moyens de lutte inefficace :

Sans être exhaustif, il y a une multiplicité d'agents nuisibles, capables d'affecter les cultures de café et qu'il faut prendre en compte, en étudiant leurs modes de fonctionnement et les moyens de lutte efficaces qu'il conviendrait d'appliquer.

Les pesticides chimiques largement utilisés ont contribué effectivement à une réduction significative des pertes de récoltes, mais ont eu des effets négatifs sur l'environnement. La pression phytosanitaire sur les cultures du café est telle que des méthodes alternatives, plus respectueuses de l'environnement, moins coûteuses et tout aussi efficace ont donc été recherchées (MAHÉ L., 2007).

Autres Moyens de lutte :

Les principaux moyens alternatifs actuels de lutte, qui ont été conçus sont :

- le recours aux marqueurs biochimiques pour évaluer la résistance des plantes aux pathogènes et détecter des gènes permettant la résistance aux maladies et les transférer génétiquement pour créer de nouvelles espèces résistantes
- l'utilisation des méthodes d'activation des mécanismes naturels de défense des plantes
- l'utilisation de rhizobactéries comme fertilisants naturels
- le recours aux ennemis naturels des ravageurs
- l'usage de biopesticides tels que les baculovirus, des champignons (pour le contrôle des mauvaises herbes)

Il a par exemple été démontré que l'association des plants de café avec des champignons mycorhiziens arbusculaires (BONFIM J. A., et al., 2010) peuvent aider à réduire les maladies du caféier tel que face au Phoma costarricensis où ils vont agir comme des biofertilisants et bio-protecteurs. L'inoculation mycorhizienne peut être efficace contre les pathogènes du sol, qui sont parfois difficiles à contrôler par des moyens physiques ou chimiques (Miguel Angel Escalona Aguilar, 2002 ; Alban R. et al., 2013 ; Al-Arequi A. H. N. A., et al., 2013).

L'une des façons de lutter généralement contre les maladies de nos jours, est l'utilisation de luttes dites « intégrées » et qui consistent à combiner plusieurs moyens de lutte en utilisant par exemple des variétés résistantes et pour compléter il est utilisé de manière modérée des pesticides, associés à la lutte biologique et d'autres moyens de lutte encore. Cela aurait le mérite d'être efficace, moins cher et avec un moindre impact sur l'environnement (Viani R., 2004 ; Pinard F., 2008 ; Santos M. C. P., et al., 2010 ; Benavides P., et al., 2012).

Il faut aussi rappeler que la culture du café dans des systèmes agroforestiers aiderait à limiter les maladies, grâce à l'ombrage qui modifie les conditions environnementales. Les systèmes agroforestiers réduisent les pertes de rendement des cultures mais permet aussi de réduire le recours aux traitements phytosanitaires (Soto-Pinto L. et al., 2002 ; Bedimo J. M., et al., 2008 ; Righi C. A., et al., 2013).

Changement climatique et augmentation des agents pathogènes

Néanmoins des études ont montré que le nombre de ravageurs augmentait sensiblement avec la hausse des températures. Ainsi le changement climatique, notamment la hausse des températures et ces interactions avec les agents biologiques nuisibles (ravageurs) sont à prendre en considération pour les cultures de café et plus largement pour l'agriculture qui est sensiblement menacée (Jaramillo J., et al., 2009.).

Cas de la Martinique

La Martinique n'est pas exempte de ses problèmes d'agents pathogènes et concurrentiels, malgré l'absence de culture de café. En effet des études ont démontré que l'île comporte un certain nombre de nématodes (Meloidogyne sp.) où de ravageurs (le scolyte Hypothenemus hampei) présents pour l'instant sur d'autres hôtes mais qui menacent de ressurgir à tout instant,

dès lors que la culture de café sera relancée (Queneherve P., et al., 2005 ; Quénéhervé, P., et al., 2011 ; Dufour, B. P., 2013).

Ceci pose un problème du point de vue phytosanitaire ; la lutte contre ces facteurs limitants devra être pensée, organisée en tenant compte de l'expérience déjà acquise dans le monde dans ce domaine.

I.8 Méthodologies pour le zonage agro-écologique des caféiers : état des connaissances et savoir-faire dans le monde.

Définition du zonage agro-écologique

La spatialisation des facteurs éco-climatiques pour la culture du café a déjà été réalisée dans différentes régions du monde. Ce type d'étude peut avoir plusieurs objectifs : soit lancer la production de café ou d'autres cultures dans des zones idéales écologiquement (Rojas O. E., 1987 ; Soto F., et al., 2001 ; Soto F., et al., 2002 ; Meireles, E., et al., 2007 ; Nunes E. L., et al., 2007 ; de Medeiros R. M., et al., 2013 ; García López J. C., et al., 2014), soit planifier les récoltes et accroître les rendements possibles (ROSA, V., 2007 ; Petek M. R., et al., 2009), soit évaluer les effets du changement climatique sur les cultures et leurs rendements (Caramori, P. H., et al., 2001 ; Pinto, H. S., et al., 2001 ; Zullo Jr, J., et al., 2011 ; Andrade G. A.et al., 2012 ; Carvalho Alves M., et al., 2013 ; Chemura, A., et al., 2015).

Il existe d'ailleurs plusieurs types de zonage : le zonage agro-climatique, le zonage agricole, le zonage édapho-climatique, le zonage agricole du risque climatique (Wollmann, C. A., et al., 2013). Ici on va s'intéresser au zonage que l'on peut nommer agro-écologique, qui consiste à prendre en compte les facteurs climatiques et édaphiques pour révéler les milieux propices au café en Martinique, sans y inclure l'environnement socio-économique par exemple.

Ces différentes études sont possibles et efficaces, tout simplement parce que l'agriculture est très influencée par les conditions éco-climatiques, et l'homme a su faire l'acquisition de connaissances sur les effets de chaque facteur éco-climatique sur les différentes phases phénologiques des cultures, combinées au développement d'outils performants tels que l'apport des nouvelles technologies pour la spatialisation (Petek M. R., et al., 2009 ; de Carvalho Alves M., et al., 2013).

Néanmoins les limites de ce type d'étude, à savoir un zonage agro-écologique, ont déjà été avancées dans certains travaux scientifiques. Il s'agit de la production de cartes à trop grande échelle, des indicateurs approximatifs, et la non prise en compte de la survenance de risques peu tolérables, tels que la sécheresse ou le gel (Wollmann, C. A., et al., 2013). De plus des cartes à trop grande échelle, et donc un zonage macro-écologique reste toujours approximatif et ne prend pas en compte les microclimats.

Dans le cas de notre étude, on sait que la précision de la carte des potentialités pour le café, dépendra des données obtenues en fonction du nombre de station météorologique présente sur

l'île, et mesurant tous les paramètres nécessaires au moins par commune (températures, précipitations …).

Il s'agit donc de récolter le plus de données édapho-climatiques précises, auprès des organismes officiels compétents, mais aussi de s'appuyer sur l'expérience des travaux scientifiques déjà réalisés dans le monde sur cette thématique et des méthodes déjà employées dans ce domaine.

Méthodologie pour le zonage

Selon la littérature scientifique mondiale, il y a tout une procédure à suivre pour effectuer un zonage et révéler les aptitudes agricoles d'une région.

Il faut d'abord :

- se renseigner sur la phénologie et les caractéristiques de la culture étudiée ;

- puis établir les exigences climatiques de la culture ;

- définir la base du zonage (établir des catégories pour chaque facteur éco-climatique)

- cartographier les conditions climatiques de la région ;

- auxquelles on va rajouter, superposer la carte des sols et réaliser ainsi la carte des potentialités (Soto, F. et al.; 2001 num.4; Wollmann, C. A., et al., 2013).

Critères écologiques à retenir

Plus largement le café comme tout organisme vivant est en interaction avec son environnement qui se définit par un ensemble de composantes à prendre en compte : les conditions physiques et chimiques du sol, la topographie, le climat (température, humidité…). Quand cet environnement est favorable, le caféier se développe pleinement. Il peut arriver qu'un facteur éco-climatique ne soit pas indispensable, mais il suffit que son intensité devienne par exemple trop grande pour qu'il se révèle comme facteur limitant très dommageable pour la culture et il faut prendre cela en compte (Soto, F. et al.; 2001 num.4).

Parmi les facteurs à considérer, il y a les températures minimales et maximales de l'air, considérées comme les facteurs climatiques les plus importants, vis-à-vis de leurs rôles dans les différentes phases phénologiques du café : telles que la reproduction, la maturation des fruits (ROSA, V., 2007 ; Petek M. R., et al., 2009).

Les précipitations représentent aussi un facteur prépondérant pour la culture, quel que soit la région, la présence d'eau est déterminante (ROSA, V., 2007 ; de Medeiros R. M., et al., 2013).

Ainsi il faut disposer des données de températures moyennes annuelles (maximales et minimales), des précipitations annuelles et leurs distributions spatiales, la quantité d'ensoleillement, mais aussi des données sur les sols, leurs natures et profondeurs (Soto F., et al., 2001 ; ROSA, V., 2007 ; Meireles, E., et al., 2007) pour tout zonage.

Outils

Les systèmes d'information géographique et les outils statistiques sont largement utilisés (Soto F., et al., 2001 ; Pinto, H. S., et al., 2001 ; Evangelista A. W., et al., 2002 ; Barros, M. A., et al., 2006 ; Soto F., et al., 2007 ; Carvalho Alves M., et al., 2013 ; Wollmann, C. A., et al., 2013 ; Santos, L. D. P., et al., 2014) car ils permettent de mettre en corrélation des données quantitatives et qualitatives des conditions environnementales vis-à-vis des conditions écologiques des cultures, tout en spatialisant les phénomènes observés (Nunes E. L., et al., 2007).

Ces technologies avancées permettent d'aboutir à des modèles agro-écologiques suffisamment pertinents pour la gestion des cultures. De plus ces outils où logiciels sont pratiques au sens où ils sont flexibles, les données peuvent y être modifiées à tout moment afin de coller au mieux à la réalité du terrain et d'établir assez vite des données cartographiques pour la gestion agro-environnementale. Et de plus le rendu graphique est de meilleur qualité, avec la possibilité de faire des modélisations 3D (Evangelista A. W., et al., 2002).

Classification des critères

Pour effectuer le zonage, il faut réaliser une classification des zones de la région d'étude en fonction de chaque facteur éco-climatique (températures, précipitations, sols, profondeur des sols…), afin d'aboutir à la fin, (après une superposition de chacune des cartes pour chaque facteur) à une cartographie représentant le zonage agro-écologique avec un classement des zones allant de celles qui sont aptes ou optimales pour la culture du café, aux zones impropres à cette culture, en passant par les zones dites à aptitude modérée ou restreinte (Soto F., et al., 2001 ; Evangelista A. W., et al., 2002 ; Nunes E. L., et al., 2007).

Par exemple pour les températures, parmi les classifications possibles, il y a ceci : >23°C, 22° à 23°C, 19 à 22°C, 18 à 19°C, <18°C ; et pour les précipitations en terme de déficit hydrique annuel <150mm, 150 à 200 mm, >200mm d'eau (selon les travaux d'Evangelista A. W., et al., 2002).

Parmi les autres classifications possibles, il y a l'exemple de Cuba (Soto F., et al., 2001). En croisant les données, ils ont fait en 2001 un zonage agro-climatique avec une classification des zones allant des plus optimales aux plus impropres pour la culture de café.

Ils ont d'abord commencé par faire un premier classement des zones en fonction du changement de pluviométrie, les températures retenues étant fixes, tout en indiquant le niveau de rendements attendu, comme ceci :

- 1) zone à pluviométrie annuelle : 1800 à 2200 mm, température : 18-24 ° C avec des rendements supérieurs à 2 t.ha-1.
- 2) zone à pluviométrie annuelle : de 1500-1800 mm (limite inférieure) à 2200-2600 mm (limite supérieure), température moyenne : 18-24 ° C. donnant des rendements de 1-2 t ha-1.
- 3) zone à pluviométrie annuelle : de 1200-1500 mm (limite inférieure) à 2600-3000 mm (limite supérieure), température moyenne de 18-24 ° C. donnant des rendements 0,5 à 0,9 t ha-1.
- 4) zone à moins de 1200 mm d'eau/an et les zones à plus 3000 mm d'eau/an, température moyenne de 18-24 ° C. donnant des rendements de moins de 0,5 t ha-1.

Puis ils ont commencé à prendre en compte les types de sol, leurs caractères physiques, chimiques et minéralogiques, et la profondeur qui normalement doit être pour cette culture d'environ 120cm, mais pour Cuba ils ont pris en compte les sols à partir d'au moins 70cm.

Ce qui leur a donné un deuxième type de classement mais qu'avec les sols (en n'incluant pas encore les températures et précipitations), comme ceci :

- Très profond> 100 cm.
- 61-100 cm de profondeur.
- Modérément profond 41- 60 cm.
- Peu profond 21- 40 cm.
- Très peu profond <20 cm

A partir de là, ils ont créé les vraies catégories pour faire le zonage agro-écologique (les températures étant comprises entre 18° et 24°C).

Tableau 1 : Base du zonage à Cuba

Catégorie	Précipitations	Profondeur des sols	rendement potentiel t ha-1
optimal	1800-2200	très profond	>2
modérément optimal	1500-1800	très profond et profond	1 à 2
acceptable	1200-1500	très profond, profond et moy.prof.	0,5-0,9
impropre	<1200 et >2200	peu profond et très peu profond	

Les avantages des différents types de zonage

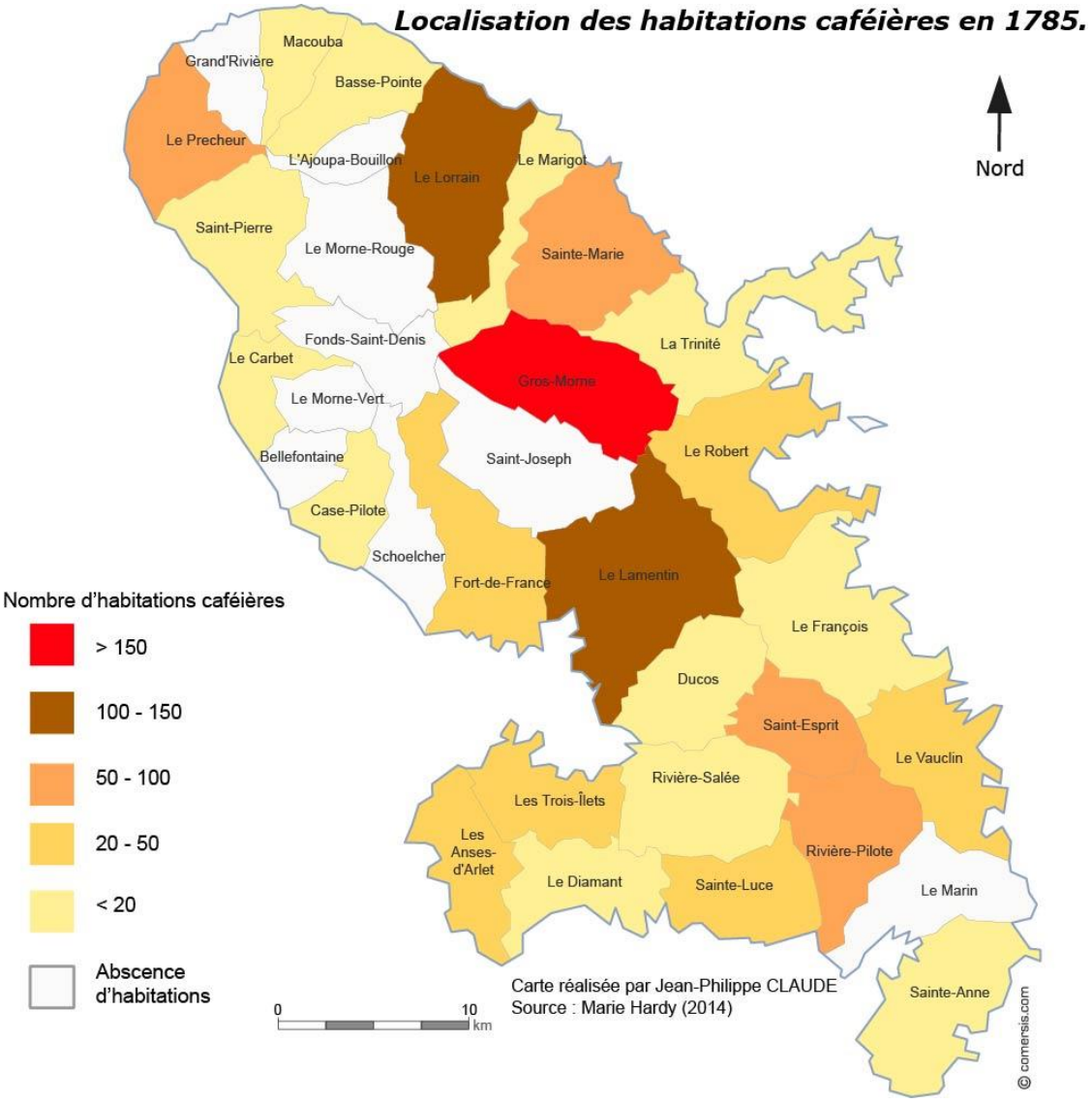
Au bout du compte, l'ensemble de ces études ont permis la mise en place de programmes de développement pour le café dans plusieurs régions et l'avantage de ces études est qu'elles sont reproductibles pour les autres cultures s'il est nécessaire et dans d'autres régions (Soto F., et al., 2001). Ces études peuvent aussi être appliquées pour les systèmes agroforestiers (Pérez-Portilla E., et al., 2006).

De plus cela permet de réduire les risques auxquels est soumise l'agriculture, en plus de l'exploitation rationnelle des ressources naturelles (Soto, F. et al.; 2001, num.4 ; Soto F., et al., 2007 ; Suárez Venero G. M., et al., 2014 ; Santos, L. D. P., et al., 2014).

I.9 Hypothèses de recherche

En Martinique, durant le XVIII[ème] et XIX[ème] siècle, l'île à compter plusieurs centaines d'habitations caféières (Hardy M., 2014), réparties un peu partout sur le territoire, comme le montre la carte ci-dessous. Malgré une prédominance du Nord et du Centre en termes de nombre d'habitations caféières, le sud de l'île n'a pourtant pas été totalement en reste.

Ainsi Rivière Pilote, le Saint-Esprit, le Vauclin et d'autres communes du Sud de l'île ont été plantées en caféier et font partie des communes concernées par la caféiculture à cette époque-là.



Carte 2 [3]

[3] Carte réalisée à partir d'un article de Marie Hardy pour Martinique Développement, et cet article a été fait à partir des données de sa thèse : « Le monde du café à la Martinique du début du XVIIIe siècle aux années 1860.» Doctoral dissertation, Antilles-Guyane (2014). Titre de l'article : « Le café en Martinique (1721-1870) : historique d'une denrée qui a marqué son temps ».

Toutefois cette carte ci-dessus, ne localise que le nombre d'habitation caféière et n'indique pas si les autres communes telle que Saint-Joseph ne pouvaient pas être aussi propice à la culture du café que le Gros Morne et pourtant ne faisant pas partie des communes comprenant des cultures caféières au XVIII^{ème} siècle. Toutefois cette carte reste un indicateur des milieux propices aux caféiers en 1785, même s'il faudrait vérifier que la délimitation communale utilisée ici, soit la même qu'en 1785. Néanmoins la carte reprend le même classement par commune tel qu'il est présenté dans l'article de Marie Hardy.

Le principal objectif de cette présente étude, est alors de tenter de répondre à une question simple : qu'en est-il aujourd'hui ? Actuellement en 2015, quelles sont les communes qui présentent les meilleures conditions éco-climatiques vis-à-vis des exigences écologiques de la variété Typica pour relancer la caféiculture, du point de vue des températures, précipitations, types de sols, surface des zones encore cultivables et exploitables ?

La cartographie des communes propices à la culture du café en 2015, pourrait ainsi être comparée à celle du XVIIIème siècle, afin de montrer l'évolution des milieux?

Combien d'hectares sont propices à la culture aujourd'hui ? Et sont-ils situés en zone agricole, cultivable, ou alors sur des aires protégées ?

Puis face au changement climatique, à la hausse des températures et à la modification des conditions pluviométriques, en tenant compte des prévisions climatiques de Météo France, quelle sera la cartographie des milieux encore propices à la culture du café arabica d'ici 2071 ou 2100 ? Assisterons-nous aussi, (ce qui est fort probable) à la réduction des zones propices à la culture d'arabica comme c'est le cas un peu partout dans le monde ?

En effet l'arabica est une espèce très sensible aux variations de températures, et dans plusieurs régions du monde, un constat est déjà établi concernant la réduction des zones adaptées pour sa culture (Assad E. D., et al., 2004 ; Gay C., et al., 2006 ; Junior J. Z., et al., 2006 ; Camargo, M.B.P. 2010 ; Davis AP, et al., 2012 ; BRAGANÇA R., et al., 2012 ; Andrade G. A.et al., 2012).

Ces mêmes types de cartes pourraient ensuite être réalisés ultérieurement, pour 2015 et 2100, cette fois-ci pour le Coffea canephora par exemple, deuxième espèce très cultivée dans le monde et nommée « Robusta », car à l'instar de l'arabica, elle est beaucoup plus tolérante au changement de températures et aux maladies. Ainsi les zones propices au Robusta sont en net augmentation, alors que pour l'arabica on assiste à une réduction sévère.

Au final il s'agit dans cette présente étude de spatialiser les milieux propices à la culture du café arabica aujourd'hui, puis d'établir la même carte pour les prochaines années en fonction des données disponibles.

Globalement cette étude mésologique s'appuiera essentiellement sur trois facteurs prépondérants que sont : les températures, les précipitations et la nature des sols, permettant de faire un zonage pédoclimatique, mais étant donné que l'on abordera avant les autres critères environnementaux, on peut parler de zonage agro-écologique.

II. MATERIEL

II. 1. Le matériel végétal

Le matériel végétal retenu et étudié ici est l'espèce « Coffea arabica variété arabica » ou encore appelé « Coffea arabica variété typica » qui a été introduite et cultivée en Martinique à partir de 1720 et qui est issu des plants de café apportés à Amsterdam depuis Java en 1706. Plants qui sont issus eux-mêmes de la longue diffusion du café dans le monde depuis l'Ethiopie, pays natal du caféier.

Ce caféier est reconnu pour ses valeurs sensorielles, organoleptiques et donne un café doux et aromatique très apprécié dans le monde. Il fait partie du genre Coffea qui regroupe plusieurs espèces de café et est originaire de la forêt tropicale humide aux alentours des 2000 mètres d'altitudes, du sud-ouest de l'Ethiopie.

C'est une espèce allotétraploïde, issue d'une hybridation naturelle, autogame à plus de 95% et considérée comme l'espèce de référence pour toute étude sur les variétés d'arabica.

Son profil biologique et son profil écologique ont été décrits précédemment (voir bilan de la recherche) grâce à la littérature mondiale, en raison de sa rareté sur l'île qui ne permet pas de décrire son écologie directement sur place, nécessaire au zonage agro-écologique qui va suivre.

II. 2. Aire d'étude

Localisation géographique

L'étude se déroulera sur l'ensemble de la Martinique, qui est une île montagneuse de 1128 km^2 (70 km de long, 30 km de large) située dans l'archipel des Petites Antilles, dans la Caraïbe, à 14°40' de latitude Nord et 61° de longitude Ouest. Elle est située à 7000km de la France métropolitaine et est entourée au Nord par la Dominique, au Sud par Sainte-Lucie, à l'est par l'océan Atlantique et à l'ouest par la mer des Caraïbes.

Le Climat

La Martinique se caractérise par un climat tropical humide, avec une température moyenne annuelle de 26°C et des vents réguliers venant des alizés à l'est (Venkatapen C., 2012). Les températures sont relativement douces toute l'année en raison des alizés doux et humides, et les variations de températures inter-saisonnières sont de l'ordre de 3°C.

Néanmoins on distingue la saison dite « fraîche » de novembre à avril avec des températures minimales de 17° à 25°C et maximales de 24° à 30°C ; et la saison dite « chaude » avec des températures minimales de 20° à 25.5°C et maximales de 22° à 32°C (Albert, P. et al., 1999).

Du point de vue pluviométrique on y distingue deux saisons principales : le carême qui représente la saison sèche de février à mars et l'hivernage qui représente la saison des pluies de juillet à octobre et deux périodes de transition aux caractéristiques moins marquées.

C'est durant l'hivernage que l'île est exposée aux fortes pluies, aux cellules orageuses, aux ondes tropicales, dépressions, tempêtes, ouragans, autrement dit c'est la saison cyclonique. Ce sont les inégales répartitions des pluies durant l'année qui permettent de définir le temps, les saisons et les microclimats.

La Martinique peut être divisée en deux ensembles distincts, au niveau de l'axe oblique Lamentin-Robert, du point de vue du régime pluviométrique. D'une part le nord de l'île très pluvieux avec un cumul des précipitations annuelles supérieur à 2000 mm d'eau, et des zones de très fortes précipitations pouvant atteindre 4500 à 6000 mm d'eau par an, respectivement sur les pitons du Carbet et sur la Montagne Pelée, en raison de l'effet orographique.

Puis d'autre part le sud de l'île, beaucoup moins pluvieux, avec un cumul des précipitations annuelles comprises entre 1000 et 2000mm d'eau par an, excepté un pic de plus de 2000mm d'eau par an, localisé sur le Morne Pitault et la montagne du Vauclin. Il est à noter que la zone côtière de l'île pourrait constituer un troisième découpage, en raison d'une très faible pluviométrie, inférieure à 1500 mm d'eau par an, avec le nord Caraïbe du Prêcheur à Case Pilote, le Sud de l'île : d'ouest en est des Trois-Ilets au François, et la presqu'île de la Caravelle à l'est.

Ce découpage spatial de l'île au vue des régimes pluviométriques est essentiellement dû au relief et à l'effet de Foehn. Les masses d'air très humides venant de l'océan Atlantique vont, au contact des versants exposés aux alizés à l'est de l'île (Côte au vent), créer de fortes précipitations, alors que du côté ouest de l'île sur les versants non exposés aux alizés (Côte sous le vent) les masses d'air devenues moins humides, et moins chargées en précipitations, l'air y devient plus sec, et les pluies moins abondantes.

La topographie

La topographie joue ainsi un rôle important dans le régime des pluies, puisque la Martinique est une île assez marquée par le relief. Elle peut là encore fait l'objet d'un découpage spatial cette fois-ci du point de vue orographique.

D'une part le nord de l'île très escarpé et montagneux, qui est très influencé par le massif volcanique de la Montagne Pelée dont le sommet culmine à 1397 m, les pitons du Carbet culminant à 1197 m et le morne Jacob culminant à 884 m. C'est donc une zone très marquée par le relief et des pentes plus ou moins abruptes qui s'estompent vers la mer. Le nord de l'île est très humide permettant la présence d'une forêt tropicale riche en biodiversité sur les versants, et vis-à-vis des reliefs imposants on distingue une Côte au vent à l'est au niveau Atlantique, et une Côte sous le vent à l'ouest au niveau Caraïbe.

D'autre part le sud de l'île, beaucoup plus sec, présente une topographie moins prononcée, mais tout de même composé de mornes (collines) d'environ 500 mètres d'altitude, aux pentes douces, et deux seules plaines situées au centre, au niveau du Lamentin et de Rivière Salée.

La géologie

La Martinique, tout comme les autres îles des Petites Antilles, est le résultat d'intenses activités volcaniques et sismiques, liées à la subduction qui comprend le passage sous la plaque Caraïbe de la croûte océanique atlantique.

La Martinique a été formée en deux temps : l'arc ancien comprenant la Caravelle et Saint-Anne il y a plus de 30 millions d'années et l'arc récent comprenant tout l'ouest de l'île qui s'est formé il y a plus de 10 millions d'années (Venkatapen C., 2012). Le socle géologique de l'île est constitué de roches de type volcanique acide : andésite et dacite alors que la Caravelle et Saint-Anne sont constitués de basaltes.

Ce volcanisme actif est ainsi à l'origine des différents volcans et mornes de l'île qui ont ensuite été remodelés par l'érosion.

Les sols

La Martinique présente une diversité de type de sols en raison de la formation géologique et de la répartition des précipitations selon Venkatapen C., 2012.

Au Nord on retrouve des sols liés au volcanisme récent, perméable, plus ou moins évolués et argileux : à savoir les sols à allophanes/andosols (à faible potentiel agronomique); les sols brun-rouille à halloysite (à fort potentiel agronomique), les sols peu évolués sur cendres et ponces (à potentiel agronomique modéré car ces sols sont fortement érodibles et à vitesse d'infiltration élevée).

Au centre et au Sud de l'île, on retrouve toujours selon le même auteur, les sols liés au volcanisme ancien, en fonction de la nature de leurs argiles : à savoir les ferrisols constitués de kaolinite et halloysite (à faible potentiel agronomique); les vertisols constitués de smectites ou argiles gonflantes (à potentiel agronomique faible) ; les sols rouges à montmorillonite constitués de kaolinite et d'une importante quantité de smectites (à fort potentiel agronomique).

Mais aussi des sols alluviaux sur des surfaces très réduites, dans les fonds de vallée et dans la plaine du Lamentin (potentiel agronomique modéré en raison du manque de drainage).

L'hydrologie

Le réseau hydrologique en Martinique est assez dense en raison de ses reliefs marqués, de ses pentes et ravines, donnant lieu à un certain nombre de rivières au profil pentu, avec des cascades et rapides. Le réseau hydrologique est beaucoup plus dense au Nord qu'au Sud en raison de la topographie élevée du Nord.

Le débit de ces cours d'eau varie en fonction de la pluviométrie, et peuvent ainsi donner lieu à de forts torrents menaçants lors de forts épisodes pluvieux, mais cela ne dure pas longtemps.

La végétation

L'île offre une grande diversité de couvert végétal et présente une biodiversité importante. On y dénombre pas moins de 3000 espèces végétales, dont 1000 sont introduites (Venkatapen C., 2012).

La végétation se répartit en fonction d'un gradient altitudinal et selon la répartition des pluies; allant ainsi de la forêt xérophile à la forêt hygrophile, en passant par la forêt mésophile, avec toutefois aux sommets aux très hautes altitudes des « savanes » composées de fougères, de mousses, et au niveau du littoral la présence de mangrove.

L'urbanisation

La Martinique est une île très densément peuplée avec près de 400 000 habitants, ce qui fait une densité démographique de plus de 350 habitants par km^2. L'île est fortement urbanisée, comporte 34 communes dont la ville capitale Fort de France est considérée comme une ville macrocéphale : c'est-à-dire que son développement est excessif par rapport au reste du territoire (un peu moins de 90 000 habitants).

L'extension de l'urbanisation depuis Fort de France, le mitage sur le milieu rural et la limite entre l'urbain et le rural devenant de plus en plus floue, font que l'on nomme aussi Fort de France : « la ville-île ».

L'empreinte écologique sur le territoire est donc considérable, au vue du potentiel écosystémique de l'île.

III. METHODE

Afin de réaliser la carte des potentialités pour la culture du café arabica en Martinique de nos jours, puis pour les prochaines années, il faut suivre tout une procédure, et utiliser un certain nombre d'outils.

1) Etape 1 : Recherche dans la littérature scientifique mondiale du profil écologique de l'arabica.

Il s'agit d'établir le profil écologique du café arabica tel qu'il est définit dans le monde, autrement dit quelles sont ses exigences éco-climatiques (températures, précipitations, altitude, sols…).

Cela permet également d'établir les facteurs éco-climatiques à prendre en compte (température, précipitations…) ainsi que leur prépondérance.

Par exemple, l'altitude est-elle à elle seule, un facteur prépondérant et déterminant pour spatialiser les cultures de café, quand on sait que sans atteindre 1000 mètres d'altitude, à seulement 600 mètres on peut trouver déjà des conditions climatiques favorables? Cela rappelle la nécessité de prendre en compte que les facteurs éco-climatiques prépondérants et sous forme systémique, car agissant en synergie.

Le profil écologique est un élément déjà suffisant pour réaliser un zonage agro-écologique, même s'il ne faut pas oublier les différentes phases phénologiques propres à cette espèce vis-à-vis des conditions éco-climatiques de l'île.

2) Etape 2 : Collecte des données numériques.

En fonction des différents facteurs éco-climatiques considérés comme indispensables (étape 1) : à savoir les températures, les précipitations, la nature des sols et leurs profondeurs, l'altitude; il faut collecter les données.

Le but étant de réaliser une base de données SIG pour effectuer de la cartographie, il faut donc collecter des données numériques, soit des données SIG directement, soit sous format Excel (qui seront ensuite intégrées au SIG) pour chaque facteur éco-climatique, mais aussi pour les autres éléments qui constitueront le fond de carte et complèteront la cartographie (exemple : la BD topo de l'IGN, les routes, la toponymie, la végétation etc.).

Il est essentiel d'avoir les données les plus récentes possibles pour que la cartographie soit exploitable par la suite, et il faut aussi définir correctement quel type de données sont nécessaires. Par exemple les données concernant les températures et les précipitations doivent être des données mensuelles et annuelles si possible et doivent être des moyennes sur des périodes assez longues. Plus les moyennes sont faites sur des périodes longues, plus les données seront précises et représentatives des conditions climatiques de la station étudiée. De plus le

nombre de station météo est important, plus on couvre une meilleure surface et plus le zonage sera précis.

En fonction de chaque facteur, on dispose en Martinique de plusieurs institutions officielles qui réalisent des données et peuvent les fournir pour le cadre de la recherche.

Ainsi pour les données climatiques, Météo-France et les services du Conseil Général de la Martinique ont été contactés, pour les données concernant les sols c'est l'IRD (Institut de recherche pour le développement), pour les zones cultivées en Martinique c'est la DAAF (Direction de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt de la Martinique) et pour les données concernant l'hydrologie, l'urbanisation, les routes, la toponymie…, on peut contacter la DEAL (Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement) et aussi le Conseil Général de la Martinique.

Les données doivent être traitées à l'aide d'un logiciel SIG, pour la cartographie. Le logiciel qui sera utilisé pour effectuer ce travail est QGIS version 2.8.1., mais aussi le logiciel Excel pour traiter les données qui ne sont pas encore sous forme de données SIG.

3) Etape 3 : Etablir des catégories par facteur éco-climatique et dresser des cartes de potentialités par facteur.

Une fois les données obtenues, on peut prendre chaque facteur éco-climatique, au cas par cas, y définir pour chacun des catégories et effectuer une carte des potentialités.

Ainsi on se retrouvera par exemple avec pour l'altitude, une carte présentant les zones situées en dessous de 500 mètres considérées comme peu propices pour le café, et au-dessus de 500 mètres considérées comme propices et même supérieur à 1000 mètres considérées comme optimales (même si ce facteur n'entrera pas en compte dans l'établissement da la carte globale des potentialités et sera remplacé directement par les températures qui seront beaucoup plus déterminantes pour le choix altitudinal d'emplacement des cultures). Puis pareil avec les températures, dont les zones comprises entre 18° et 22°C seront considérées comme optimales etc.

Cela donnera un aperçu par facteur éco-climatique des potentialités du territoire, et facilitera le zonage où il faudra superposer toutes ces cartes, pour obtenir la carte définitive des potentialités.

4) Etape 4 : Définir une catégorisation pour dresser la carte des potentialités globales au regard de tous les facteurs éco-climatiques.

Il s'agit de trouver une façon de classer les milieux martiniquais en 2015 de l'inapte au plus propice pour la culture du café, mais en englobant tous les facteurs éco-climatiques prépondérants.
Par exemple dans ce tableau avec les différentes catégories possibles (impropres à optimales), la catégorie qui sera nommée comme « optimale » comprendra l'ensemble des facteurs définit dans le monde comme adapté au café.

Exemple la catégorie optimale se définira comme ceci : température moyenne 18° à 22°C, précipitations 1800 à 2200 mm d'eau/an, altitude d'au moins 500 mètres, et sols fertiles, aérés et drainés dont la nature sera définit.

5) Etape 5 : Complément de cartes

Une fois cette carte des potentialités établies, on y ajoute les autres données pour rendre cette carte exploitable. C'est-à-dire qu'on y ajoute la toponymie, pour reconnaître et citer les zones, mais aussi la végétation, les parcelles afin de voir si les milieux potentiels sont libres pour la culture par exemple.

6) Etape 6 : Vérification de la réalité des données sur le terrain.

Une fois la carte des potentialités, établie et terminée, il serait intéressant d'aller sur le terrain, pour vérifier l'exactitude des données spatialisées.

7) Etape 7 : Corriger les inexactitudes de la carte repérées sur le terrain.

Il s'agit de correction d'éventuelles erreurs repérées sur le terrain et qui fausseraient la carte. Mais aussi de voir certaines zones repérées comme propices pour le café et qui finalement sur le terrain ne le seraient pas au vue de facteurs considérés comme trop intense pour la culture et qui n'auraient pas été pris en compte dès le départ dans la cartographie (Exemple le vent : la direction et la vitesse sur les versants exposés).

8) Etape 8 : Effectuer la même cartographie en fonction des données récupérées auprès de Météo-France pour les températures et précipitations à l'horizon 2071-2100.

Il s'agit de faire une carte des potentialités avec les données de Météo-France pour la période de 2071-2100 en fonction des modèles de simulations pour les températures moyennes minimales, maximales et les précipitations.

9) Etape 9 : Effectuer l'interprétation des données.

Au vue des cartes qui seront établies pour 2015, puis pour 2071-2100, l'interprétation peut ainsi être faite pour en tirer des conclusions.

IV. Résultats et Discussion : Zonage agro-écologique pour Coffea arabica variété Typica en 2015, en Martinique.

A) Les exigences écoclimatiques du Coffea arabica variété typica.

En tenant compte de la littérature mondiale, on peut retenir un certain nombre de facteurs déterminants pour la culture du café arabica, avec des critères bien précis afin de réaliser un zonage agro-écologique le plus approprié.

- **Altitude :** 550 m à plus de 2000 mètres d'altitude, (à cause de notre proximité de l'Equateur, il faut monter en altitude pour trouver des températures assez fraiches).

- **Température :** 16° à 25°C de température moyenne avec un optimum compris entre 18° et 22°C pour une bonne croissance et production de café.

- **Précipitations :** 1800 mm à 2400 mm d'eau par an sont considérées comme très appropriées pour le café arabica. Toutefois certains auteurs précisent qu'à partir de 1200 mm, le café peut se développer, mais dans ce cas il faut vérifier qu'il y ait une bonne répartition sur l'année des précipitations.

- **Humidité :** une humidité relative de 60 %

- **Caractéristiques du sol:**

- des sols fertiles, profonds, bien drainés et aérés, une bonne teneur en argile : > à 20 %.
- des textures très variables : argilo-sableuses, volcaniques ou alluvionnaires, et plus exactement des limons fertiles légèrement acides, ou limons argileux d'origine volcanique pH 4.5 à 6.6.
- une profondeur du sol d'au moins 1m20 au-dessus de tout obstacle (nappe phréatique, roche-mère…).
- le sol doit avoir en volume 50 % de porosité, 45 % de substances minérales et 5 % de matières organiques, la texture et la structure doivent être friables.

- **Pente :** des pentes comprises entre 10 et 40 % permettant un bon drainage du sol mais nécessitant des aménagements anti-érosifs et facilitant la culture.

- **Effet du vent :** Il faut des versants exposés à des vents faibles mais permanents.

B) Résultats et discussion

1) L'Altitude

Les données utilisées pour représenter l'altitude en Martinique à partir du logiciel QGIS 2.8.1 sont tirées du dossier BDALTI 25 mètres de l'IGN (Institut National de l'Information Géographique et Forestière).

Trois fichiers y ont été tirés, sous format raster : les pentes, l'ombrage et l'altitude, et ont été utilisés pour obtenir cette carte hypsométrique de la Martinique ci-dessous (Carte 3). Les oronymes ont été obtenues auprès de la Deal Martinique sous forme de données SIG au format shape.

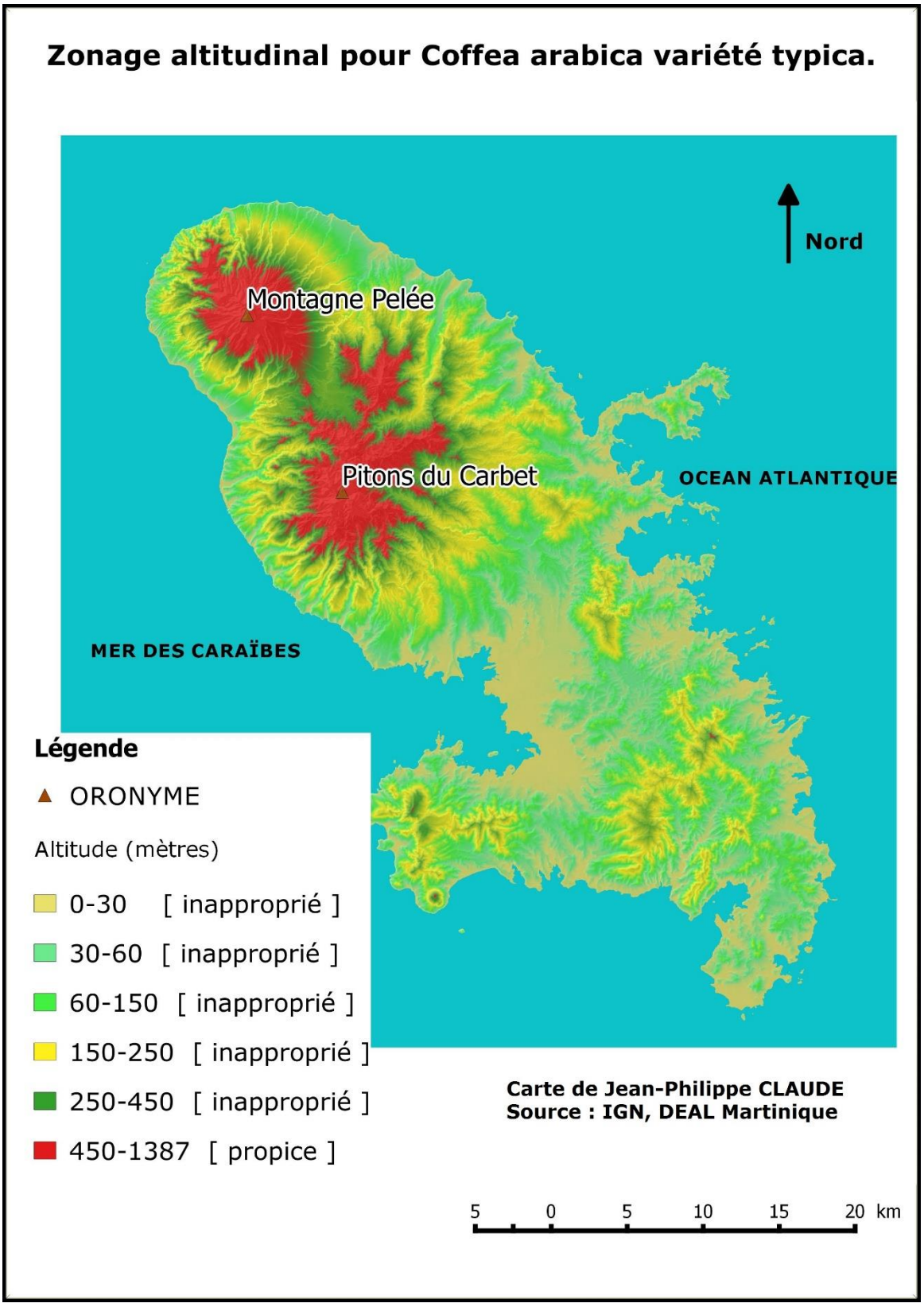
Sur cette carte on peut ainsi voir la topographie de la Martinique et se rendre compte du caractère montagneux de l'île en raison de ses nombreux mornes. L'île peut être subdivisée en trois parties : le centre qui est caractérisé par la seule plaine de l'île (plaine du Lamentin), le Sud qui est caractérisé par de nombreux mornes mais à altitude modérée puisque que cela ne dépasse pas les 500 mètres, et enfin le Nord beaucoup plus montagneux avec la présence de montagnes (Pitons du Carbet, Montagne Pelée) culminant à plus de 1000 mètres.

Néanmoins on peut se rendre compte que malgré tout, le relief n'est pas particulièrement élevé (figure 2), puisque la montagne la plus haute de l'île ne dépasse pas les 1400 mètres d'altitude (Montagne Pelée).

Si l'on est donc limité en altitude, ainsi que par la superficie de l'île (1128km^2), on l'est aussi par rapport à notre proximité avec l'Equateur (14° de latitude Nord), où à nos latitudes il faut monter en altitude pour obtenir des températures suffisamment fraiches pour la production de café. Ainsi on ne pourra pas trouver des températures assez fraiches au niveau de la mer, mais seulement qu'aux environs des 500 mètres d'altitude et plus selon la littérature mondiale.

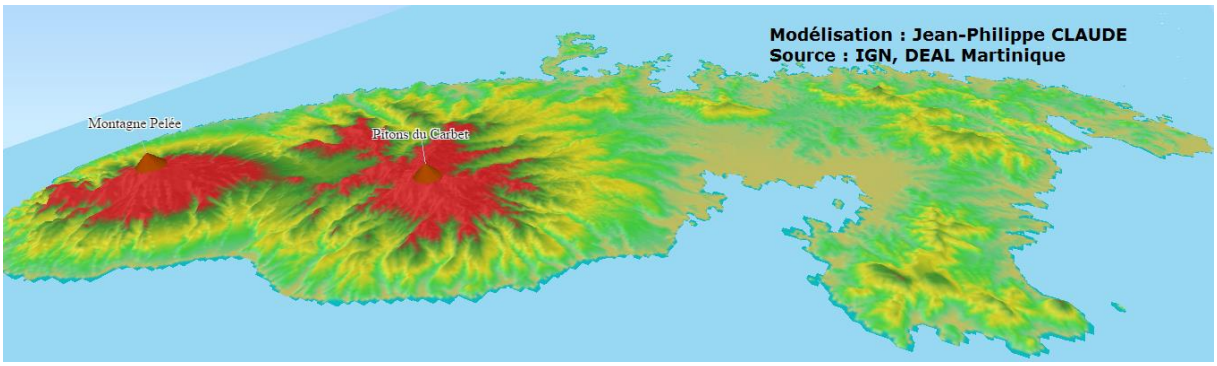
Ainsi même si l'altitude n'est pas un facteur prépondérant et qu'il ne sera pris en compte directement que les températures dans le zonage agro-écologique du café, on a tout de même une idée de ce que pourrait être la localisation de la production de café dans l'île : essentiellement dans le Nord entre 500 et 1387 mètres d'altitude.

Carte 3



Les zones en rouges sur la carte correspondent ainsi aux milieux propices à la culture du café, à partir des environs des 500 mètres d'altitude comme définit dans la littérature scientifique mondiale.

Figure 2[4] : Modélisation 3D de l'altitude en Martinique.



Puis après l'altitude, d'autres critères sont importants et on peut ainsi mettre en avant par exemple les pentes, et leurs rôles dans l'organisation des cultures.

2) Les pentes et les autres facteurs éco-climatiques

Même si les pentes ne font pas parties des facteurs prépondérants pour le zonage, il convient d'en tenir compte pour deux raisons. Premièrement les cultures sur de fortes pentes sont soumises à de fortes érosions des sols, puis deuxièmement de trop fortes pentes rendent la récolte difficile, la culture devient moins aisée pour les agriculteurs, ainsi il serait conseillé selon la littérature, des pentes inférieures à 40/45%.

A partir des mêmes données pour l'altitude (BDALTI 25 mètres de l'IGN), un fichier raster avec les pentes a pu être généré et pourrais être pris en compte parmi les autres facteurs retenues comme prépondérants pour la carte globale des potentialités de la relance du café.

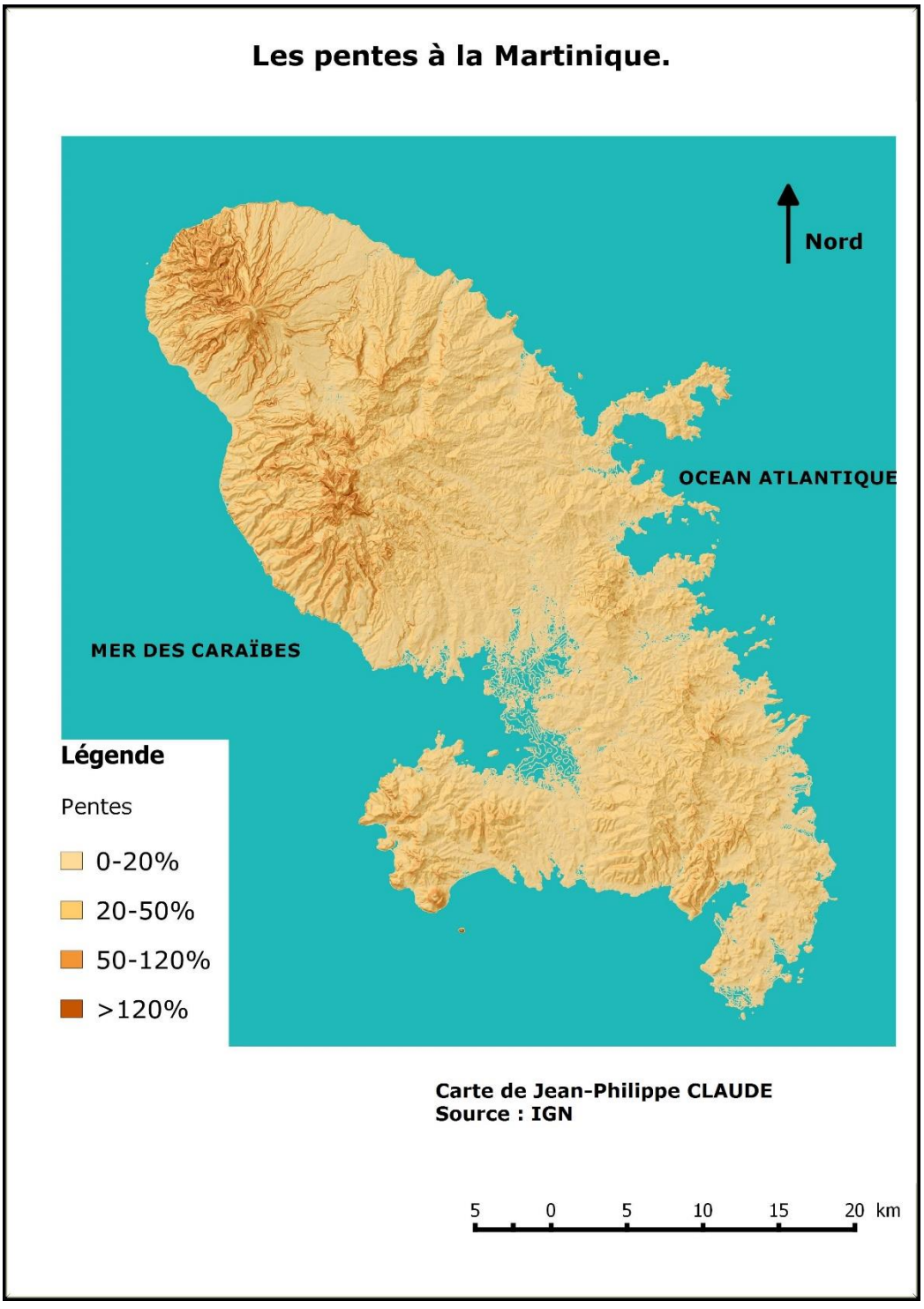
Toutefois ce critère ne sera pas pris en compte pour la réalisation de la carte des potentialités afin de vraiment faire apparaître toutes les zones qui seraient propices au café en fonction des températures, des précipitations et des sols sans aucun autre facteur restrictif.

Ce critère des pentes, sera pris en compte que par la suite sur le terrain, avec d'autres critères qui n'apparaissent pas dans cette présente étude mais qui ont un rôle dans le choix des zones optimales : tels que l'ensoleillement où l'exposition au vent. Une fois que la carte des potentialités sera réalisée, les zones cultivables propices seront approximativement identifiées et c'est à ce moment-là que sur le terrain il sera vérifié, la profondeur du sol, le pH, la pente, le niveau d'ensoleillement et l'exposition au vent. Il ne restera alors que les parcelles vraiment optimales au vue de tous les critères possibles ; et une nouvelle cartographie devra alors être créée.

Il n'y a pas grand intérêt à réaliser une carte à l'échelle de l'île avec l'ensemble des pentes acceptables, puisque celle-ci serait peu intelligible, toutefois la carte ci-dessous (Carte 4) présente globalement les pentes en Martinique pour se faire une idée du territoire.

[4] Modélisation obtenue à partir de la BDALTI 25 mètres de l'IGN, à l'aide de QGIS 2.8.1 et de l'extension Qgis2threejs.

Carte 4



Parmi les facteurs prépondérants à prendre en compte maintenant pour un zonage qui ne sera finalement que pédoclimatique et de ce fait plus efficace, car révélant tous les milieux propices sans autres restrictions, il y a les facteurs climatiques.

3) Le climat

Les données climatiques utilisées ici, proviennent de Météo France sous forme de données Excel, et de données SIG sous format raster. Les données SIG ont pu être ensuite traitées sous QGIS 2.8.1 pour les besoins de l'étude en y créant des classes de couleurs pour mettre en évidence les différentes températures où l'étagement pluviométrique. Les données Excel contenant les valeurs quotidiennes sur 30 ans, ont permis de calculer les moyennes annuelles et de réaliser des graphiques, toujours avec Excel.

Ces données météos ainsi utilisées[5] ici sont tirées des simulations ALADIN-Climat sur le domaine des Petites Antilles à une résolution de 10km. Les données contenues sont les valeurs quotidiennes des précipitations, des températures minimales et des températures maximales, sur la période de 1971-2000 (modèles forcés par les observations du climat présent), à partir desquelles les moyennes annuelles sur ces trente années ont été calculées. Ces données ont été mesurées à partir d'un certains nombres de postes météos (Tableau 4 et Carte 5).

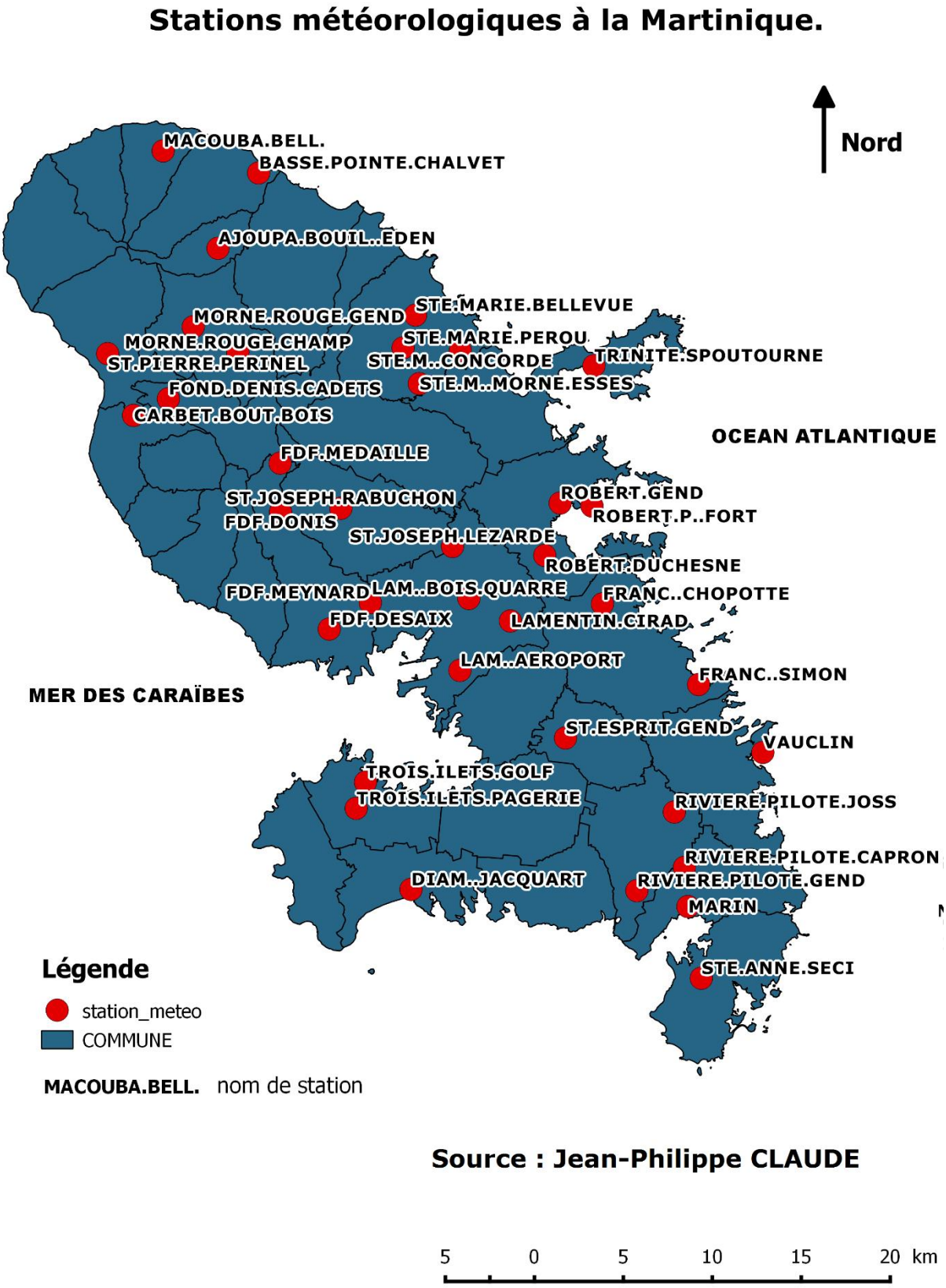
Stations météorologiques en Martinique				
Nombre	Nom de station	Numéro station	Latitude	Longitude
1	AJOUPA.BOUIL..EDEN	97201001	14.81167	-61.12000
2	BASSE.POINTE.CHALVET	97203003	14.85000	-61.09833
3	CARBET.BOUT.BOIS	97204001	14.72667	-61.16500
4	DIAM..JACQUART	97206001	14.48333	-61.02167
5	FOND.DENIS.CADETS	97208001	14.73500	-61.14667
6	FDF.MEDAILLE	97209001	14.70167	-61.08833
7	FDF.DONIS	97209002	14.67667	-61.08833
8	FDF.MEYNARD	97209003	14.63000	-61.04167
9	FDF.DESAIX	97209004	14.61667	-61.06333
10	FRANC..CHOPOTTE	97210001	14.62833	-60.92000
11	FRANC..SIMON	97210004	14.58667	-60.87000
12	LAMENTIN.CIRAD	97213001	14.62000	-60.96833
13	LAM..BOIS.QUARRE	97213002	14.63167	-60.99000
14	LAM..AEROPORT	97213004	14.59500	-60.99500
15	MACOUBA.BELL.	97215001	14.86167	-61.14833
16	MARIN	97217003	14.47333	-60.87667
17	MORNE.ROUGE.GEND	97218001	14.77167	-61.13333
18	MORNE.ROUGE.CHAMP	97218002	14.75833	-61.11000
19	RIVIERE.PILOTE.JOSS	97220001	14.52167	-60.88333
20	RIVIERE.PILOTE.GEND	97220004	14.48167	-60.90333
21	RIVIERE.PILOTE.CAPRON	97220005	14.49333	-60.87833
22	ROBERT.P..FORT	97222002	14.67833	-60.92500
23	ROBERT.GEND	97222003	14.68000	-60.94167
24	ROBERT.DUCHESNE	97222005	14.65333	-60.95000
25	ST.ESPRIT.GEND	97223001	14.56000	-60.94000
26	ST.JOSEPH.RABUCHON	97224001	14.67833	-61.05667
27	ST.JOSEPH.LEZARDE	97224004	14.65833	-60.99833
28	ST.PIERRE.PERINEL	97225001	14.75833	-61.17833
29	STE.ANNE.SECI	97226004	14.43667	-60.87000
30	STE.MARIE.BELLEVUE	97228002	14.77667	-61.01667
31	STE.M..CONCORDE	97228004	14.75833	-60.99333
32	STE.M..MORNE.ESSES	97228005	14.74167	-61.01500
33	STE.MARIE.PEROU	97228006	14.76000	-61.02333
34	TRINITE.SPOUTOURNE	97230002	14.75000	-60.92333
35	TROIS.ILETS.GOLF	97231002	14.53833	-61.04500
36	TROIS.ILETS.PAGERIE	97231004	14.52500	-61.05000
37	VAUCLIN	97232003	14.55167	-60.83667

Tableau 2[6]

[5] Projection Climatique régionalisée en Martinique, Météo-France Antilles Guyane, DEAL Martinique, 2012 Rapport disponible à la demande.

[6] Les coordonnées géographiques sont au système de projection : IGNF:MART38GEO - Martinique Fort-Desaix.

Carte 5


Stations météorologiques à la Martinique.
Nord
MACOUBA.BELL.
BASSE.POINTE.CHALVET
AJOUPA.BOUIL..EDEN
STE.MARIE.BELLEVUE
MORNE.ROUGE.GEND
MORNE.ROUGE.CHAMP
STE.MARIE.PEROU
ST.PIERRE.PERINEL
STE.M..CONCORDE
TRINITE.SPOUTOURNE
FOND.DENIS.CADETS
STE.M..MORNE.ESSES
CARBET.BOUT.BOIS
OCEAN ATLANTIQUE
FDF.MEDAILLE
ST.JOSEPH.RABUCHON
ROBERT.GEND
FDF.DONIS
ROBERT.P..FORT
ST.JOSEPH.LEZARDE
ROBERT.DUCHESNE
FDF.MEYNARD
LAM..BOIS.QUARRE
FRANC..CHOPOTTE
FDF.DESAIX
LAMENTIN.CIRAD
LAM..AEROPORT
FRANC..SIMON
MER DES CARAÏBES
ST.ESPRIT.GEND
VAUCLIN
TROIS.ILETS.GOLF
TROIS.ILETS.PAGERIE
RIVIERE.PILOTE.JOSS
RIVIERE.PILOTE.CAPRON
DIAM..JACQUART
RIVIERE.PILOTE.GEND
MARIN
STE.ANNE.SECI
Légende
station_meteo
COMMUNE
MACOUBA.BELL. nom de station
Source : Jean-Philippe CLAUDE
5 0 5 10 15 20 km

A partir de ces données on peut étudier cas par cas les facteurs climatiques prépondérants pour le zonage du Coffea arabica.

a) Les températures moyennes minimales

A partir du fichier raster de Météo-France présentant les données pour les températures moyennes minimales sur la période de 1971-2000, issues de la simulation ALADIN-Climat forcé par les observations du climat présent, on peut faire une première analyse pour les zones propices à la relance de la production de café arabica.

A partir du fichier raster, des classes de couleurs ont été réalisées afin de distinguer les différentes températures minimales qui peuvent être atteintes sur l'île (Carte 6).

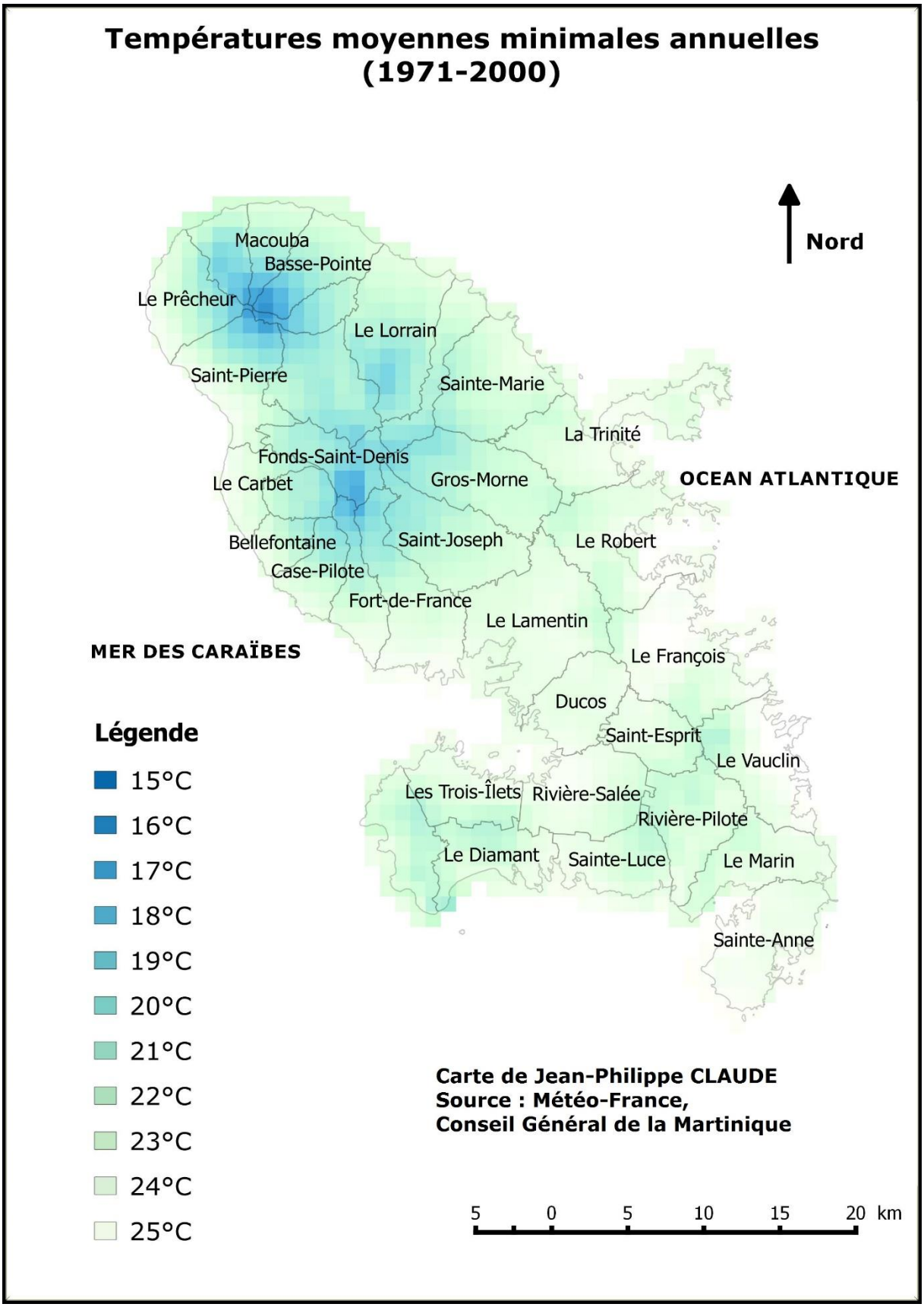
Globalement en Martinique les températures minimales varient entre 15° et 25°C ; étant donné que les températures ne descendent pas largement au-dessous des 15°C, le risque de gel est donc inexistant sur l'île. Les températures restent propices à la culture du café au regard des températures minimales, même s'il existe des zones où les températures minimales sont supérieures à 22°/23°C.

En effet si les températures minimales atteignent déjà les 23°/25°C, alors que la gamme des températures admises pour le café est de 16-25°C, les zones où les températures minimales sont déjà élevées, leurs températures maximales le seront aussi, les rendant inappropriées pour la culture du café.

Ainsi sans utiliser les données d'amplitude thermique du territoire, on sait que les milieux à moins de 23°C de températures minimales semblent être plus appropriés pour le café et sur la carte on peut voir qu'il s'agit essentiellement du Nord de l'île.

Il faut donc maintenant analyser les températures moyennes maximales sur l'ensemble du territoire.

Carte 6


Températures moyennes minimales annuelles
(1971-2000)
Nord
Macouba
Basse-Pointe
Le Prêcheur
Le Lorrain
Saint-Pierre
Sainte-Marie
La Trinité
Fonds-Saint-Denis
Le Carbet
Gros-Morne
OCEAN ATLANTIQUE
Bellefontaine
Saint-Joseph
Le Robert
Case-Pilote
Fort-de-France
Le Lamentin
MER DES CARAÏBES
Le François
Ducos
Saint-Esprit
Le Vauclin
Les Trois-Îlets
Rivière-Salée
Rivière-Pilote
Le Diamant
Sainte-Luce
Le Marin
Sainte-Anne
Légende
15°C
16°C
17°C
18°C
19°C
20°C
21°C
22°C
23°C
24°C
25°C
Carte de Jean-Philippe CLAUDE
Source : Météo-France,
Conseil Général de la Martinique
5 0 5 10 15 20 km

b) Les températures moyennes maximales

A partir du fichier raster de Météo-France présentant les données pour les températures moyennes maximales sur la période de 1971-2000, issues de la simulation ALADIN-Climat forcé par les observations du climat présent, on peut faire une analyse pour les zones propices à la relance de la production de café arabica vis-à-vis cette fois des températures maximales.

A partir du fichier raster, là aussi des classes de couleurs ont été réalisées afin de distinguer les différentes températures maximales qui peuvent être atteintes sur l'île (Carte 7).

Globalement en Martinique les températures maximales varient entre 21° et 32°C. De plus une bonne partie du territoire connaît des températures maximales pouvant atteindre plus de 28°C dans l'année, ce qui est excessif au vue de la pourtant large gamme des températures moyennes acceptables pour le café.

Les zones dont les températures maximales ne dépasseraient pas les 25°C se retrouvent essentiellement dans le Nord, et de plus les zones qui seraient considérées comme optimales avec des températures inférieures à 22°C se retrouvent essentiellement cantonnées sur les sommets de l'île. Les milieux propices semblent ainsi très limités.

Néanmoins la gamme des températures requises pour la production de café recueillies dans la littérature, à savoir 16° à 25°C et un optimum de 18 à 22°C sont des températures moyennes annuelles.

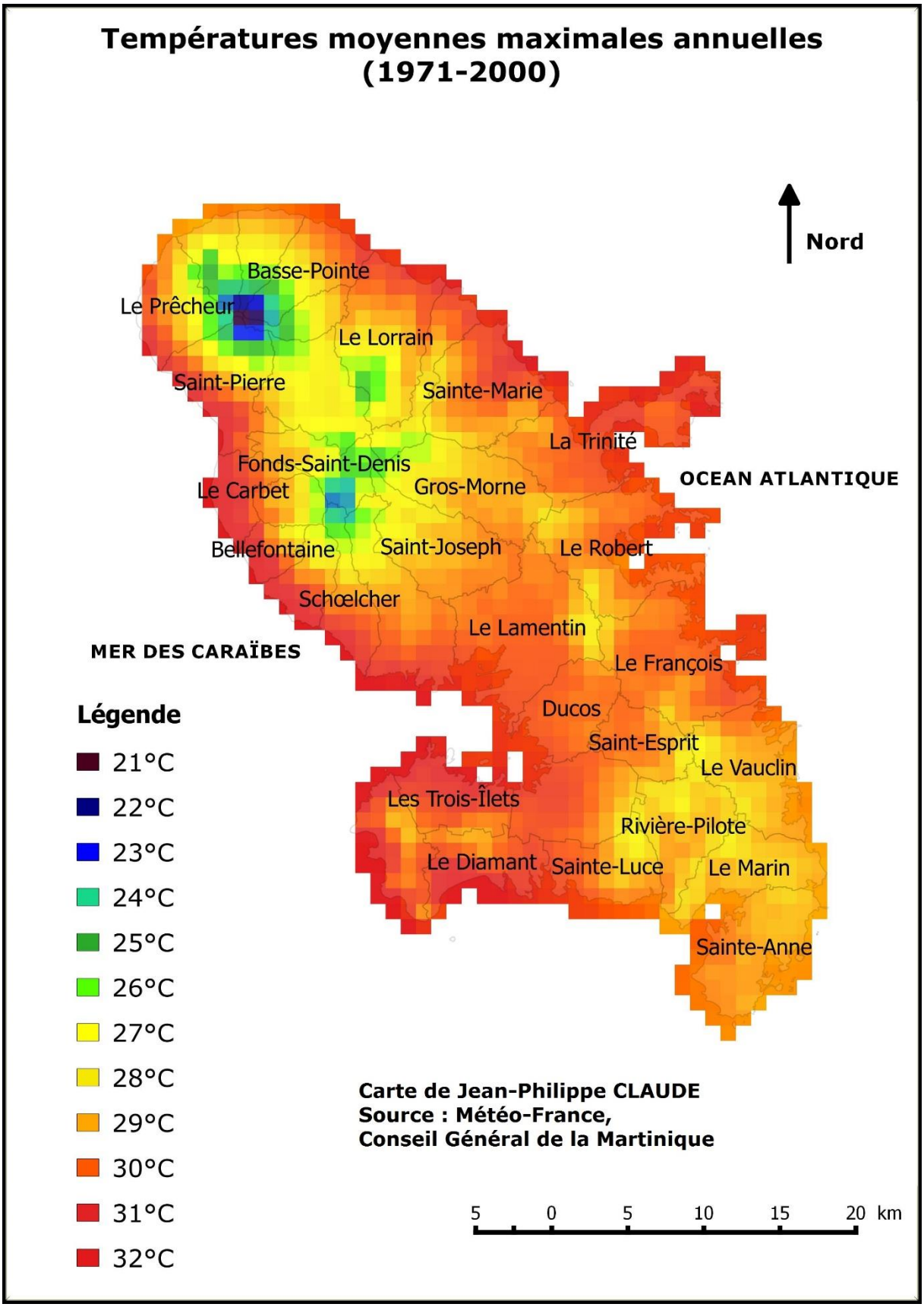
Ainsi ne disposant pas directement d'une carte avec les températures moyennes annuelles en Martinique qui serait beaucoup plus simple pour faire le zonage, il faut donc déterminer les températures maximales limites à ne pas dépasser, afin de pouvoir utiliser la carte des températures maximales comme indicatrice des zones propices.

Pour cela on peut prendre les données Excel des températures minimales et des températures maximales, en calculer les températures moyennes théoriques par station et à l'aide de graphiques, on peut analyser les tendances thermiques pour chaque station, pour éliminer ensuite les zones qui ne rentrent pas au final dans les limites de températures acceptables pour le café.

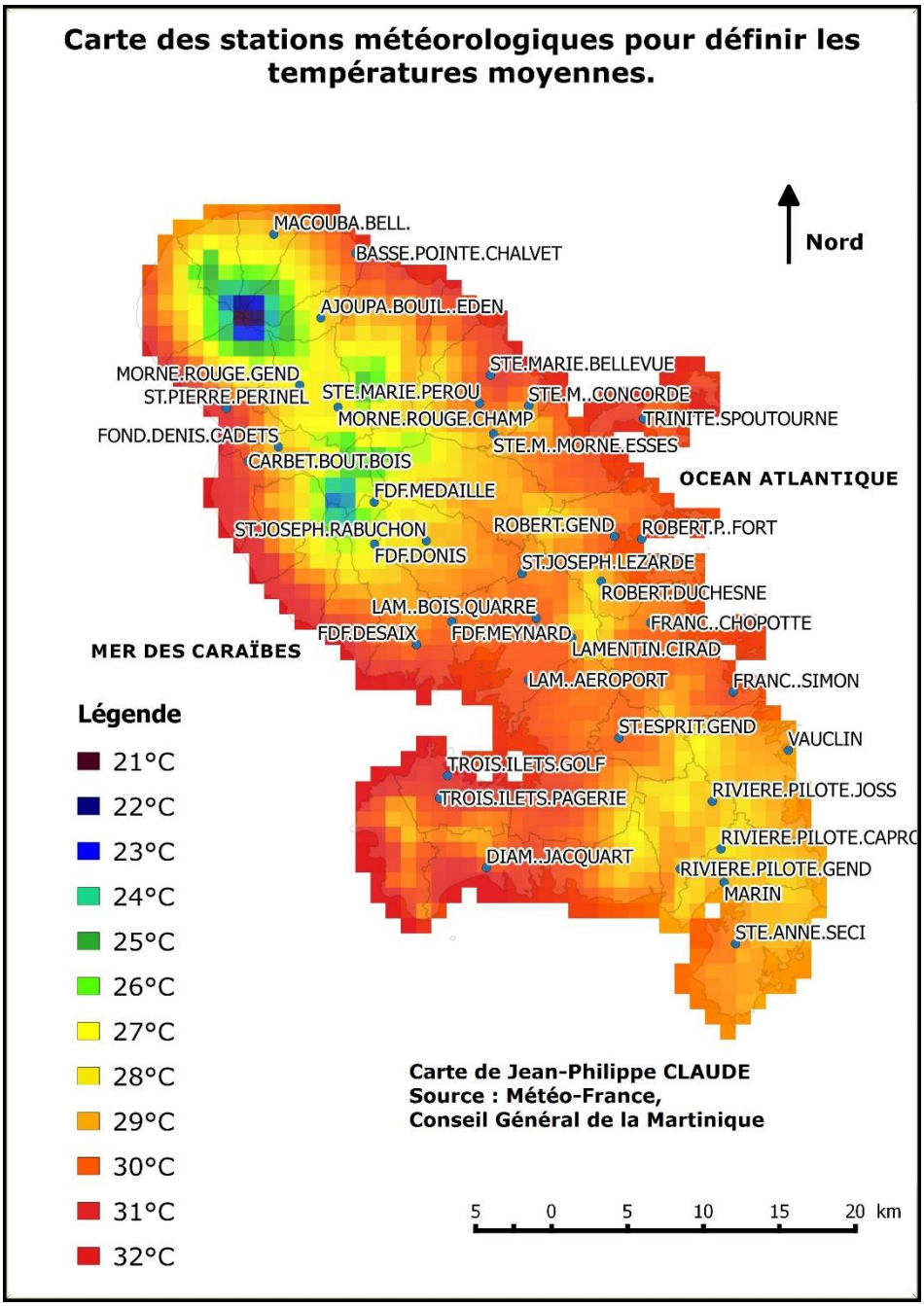
Le but étant de pouvoir revenir à notre carte des températures maximales et de l'utiliser dans le zonage final en ne retenant que les classes de températures maximales désignées finalement comme acceptables pour le café.

Pour cela on reprend la carte des températures maximales et on y affiche dessus la localisation de chaque station (Carte 8), puis on prend un certain nombre de stations réparties sur chaque classes de couleur afin d'y déterminer les vraies tendances thermiques de chaque zone.

Carte 7


Températures moyennes maximales annuelles
(1971-2000)
Nord
Basse-Pointe
Le Prêcheur
Le Lorrain
Saint-Pierre
Sainte-Marie
La Trinité
Fonds-Saint-Denis
Le Carbet
Gros-Morne
OCEAN ATLANTIQUE
Bellefontaine
Saint-Joseph
Le Robert
Schœlcher
Le Lamentin
MER DES CARAÏBES
Le François
Ducos
Saint-Esprit
Le Vauclin
Les Trois-Îlets
Rivière-Pilote
Le Diamant
Sainte-Luce
Le Marin
Sainte-Anne
Légende
21°C
22°C
23°C
24°C
25°C
26°C
27°C
28°C
29°C
30°C
31°C
32°C
Carte de Jean-Philippe CLAUDE
Source : Météo-France,
Conseil Général de la Martinique
5 0 5 10 15 20 km

Carte 8

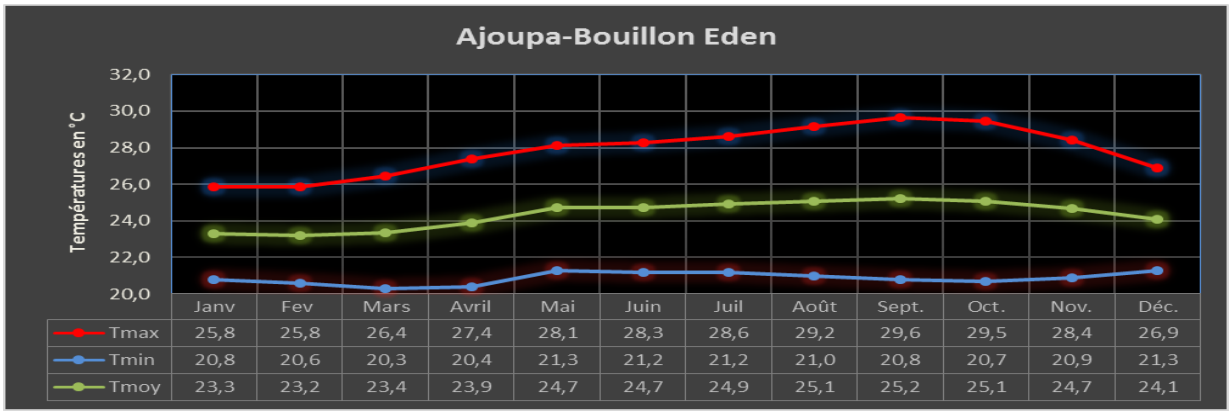


Premièrement si on prend dans le nord les stations d'Ajoupa-Bouillon Eden et Fonds-Saint-Denis Cadets situées dans le jaune-orangé sur la carte (Carte 8), donc avec des températures maximales de 28°/29°C on peut à l'aide des graphiques ci-dessous définir les tendances thermiques durant l'année (normales de 1971-2000).

Ajoupa-Bouillon (Graphique 1) à des températures minimales et maximales pouvant atteindre respectivement 20° et 29°C et des températures moyennes comprises entre 23° et 25°C, ce qui est approprié pour le café.

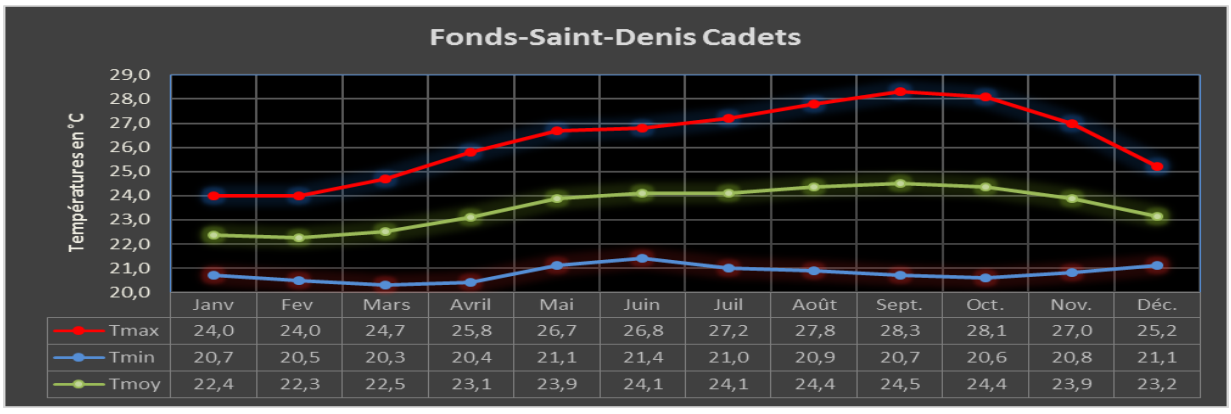
Fonds-Saint-Denis (Graphique 2) à des températures minimales et maximales pouvant atteindre respectivement 20° et 28°C, sachant que les températures maximales oscillent entre 24°C et 28°C. Les températures moyennes sont comprises entre 22° et 25°C, ce qui est aussi approprié pour le café.

Graphique 1 : Températures (normales 1971-2000) à Ajoupa-Bouillon.



	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Tmax	25,8	25,8	26,4	27,4	28,1	28,3	28,6	29,2	29,6	29,5	28,4	26,9
Tmin	20,8	20,6	20,3	20,4	21,3	21,2	21,2	21,0	20,8	20,7	20,9	21,3
Tmoy	23,3	23,2	23,4	23,9	24,7	24,7	24,9	25,1	25,2	25,1	24,7	24,1

Graphique 2 : Températures (normales 1971-2000) à Fonds-Saint-Denis.



	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Tmax	24,0	24,0	24,7	25,8	26,7	26,8	27,2	27,8	28,3	28,1	27,0	25,2
Tmin	20,7	20,5	20,3	20,4	21,1	21,4	21,0	20,9	20,7	20,6	20,8	21,1
Tmoy	22,4	22,3	22,5	23,1	23,9	24,1	24,1	24,4	24,5	24,4	23,9	23,2

Puis on peut caractériser les tendances thermiques pour les stations qui sont situées dans le rouge sur la carte (Carte 8), donc avec des températures maximales d'au moins 30°C, dont Basse-Pointe Chalvet sur la côte Nord Est Atlantique, Diamant Jacquart dans le Sud-Ouest, le Lamentin Aéroport au Centre Ouest et Saint-Joseph Lézarde au Centre (normales de 1971-2000).

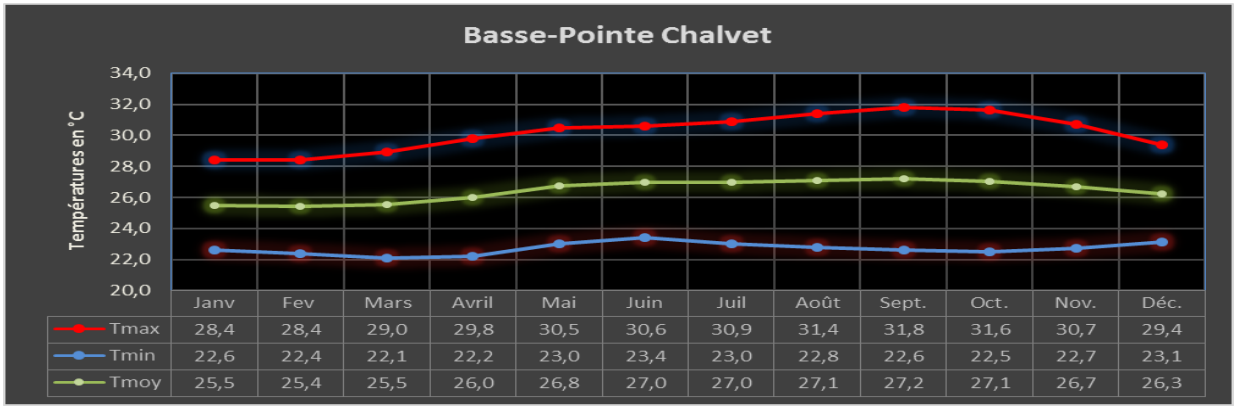
Basse-Pointe (Graphique n°3) est caractérisé par des températures minimales et maximales pouvant atteindre respectivement 22° et 32°C et des températures moyennes de 25° à 27°C, ce qui est inapproprié pour le café.

Le Diamant (Graphique n°4) est caractérisé par des températures minimales et maximales pouvant atteindre respectivement 23° et 32°C et des températures moyennes de 25° à 27°C, ce qui est inapproprié pour le café.

Le Lamentin (Graphique n°5) est caractérisé par des températures minimales et maximales pouvant atteindre respectivement 23° et 32°C et des températures moyennes de 26° à 27°C, ce qui est inapproprié pour le café.

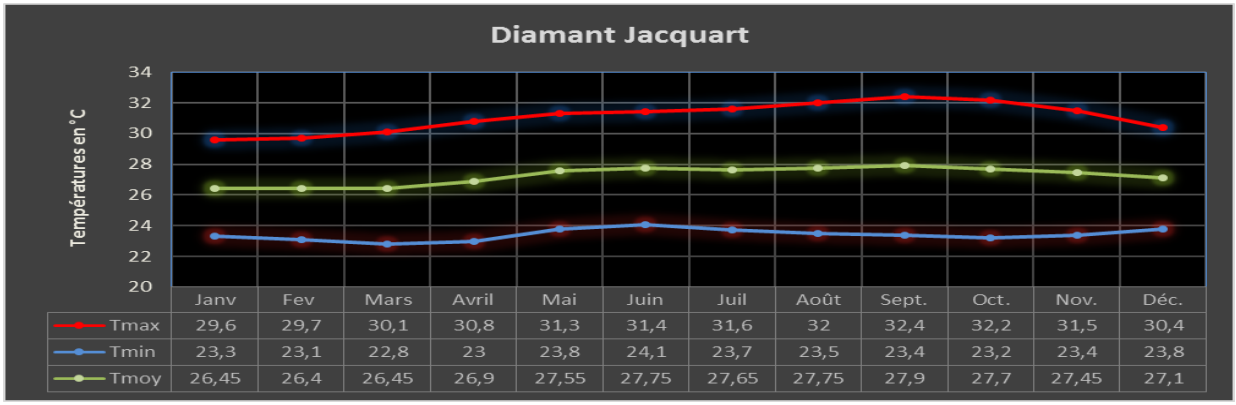
Saint-Joseph (Graphique n°6) est caractérisé par des températures minimales et maximales pouvant atteindre respectivement 22° et 31°C et des températures moyennes de 25° à 27°C, ce qui est inapproprié pour le café.

Graphique n°3 : Températures (normales 1971-2000) à Basse-Pointe.



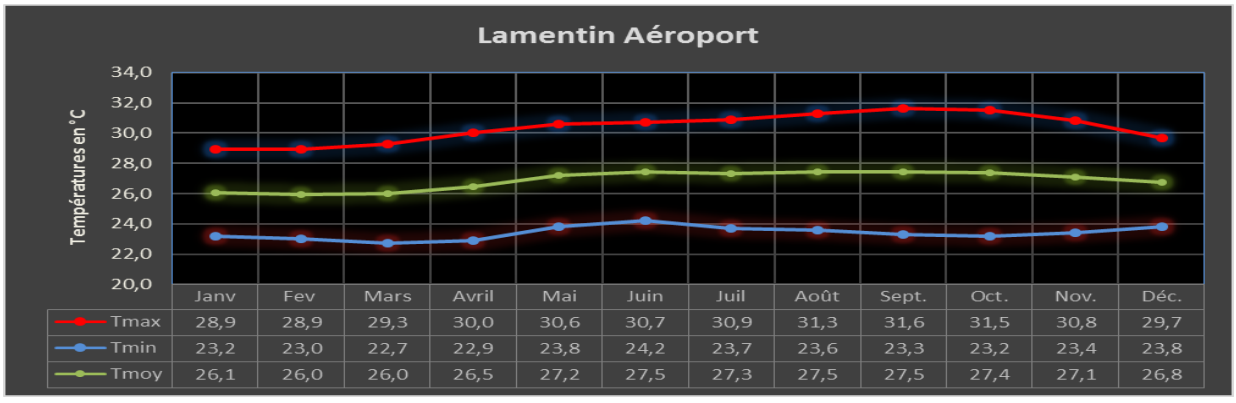
	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Tmax	28,4	28,4	29,0	29,8	30,5	30,6	30,9	31,4	31,8	31,6	30,7	29,4
Tmin	22,6	22,4	22,1	22,2	23,0	23,4	23,0	22,8	22,6	22,5	22,7	23,1
Tmoy	25,5	25,4	25,5	26,0	26,8	27,0	27,0	27,1	27,2	27,1	26,7	26,3

Graphique n°4 : Températures (normales 1971-2000) au Diamant.



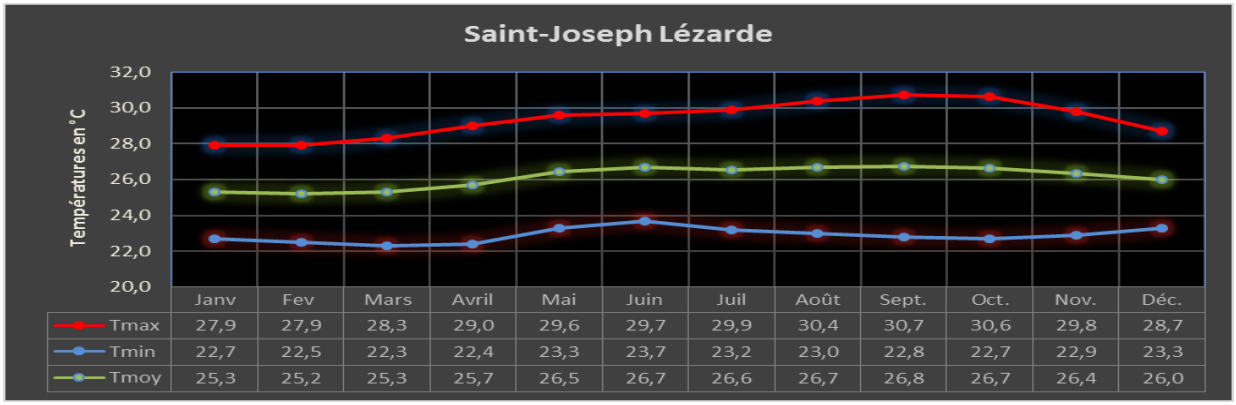
	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Tmax	29,6	29,7	30,1	30,8	31,3	31,4	31,6	32	32,4	32,2	31,5	30,4
Tmin	23,3	23,1	22,8	23	23,8	24,1	23,7	23,5	23,4	23,2	23,4	23,8
Tmoy	26,45	26,4	26,45	26,9	27,55	27,75	27,65	27,75	27,9	27,7	27,45	27,1

Graphique n°5 : Températures (normales 1971-2000) au Lamentin.



	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Tmax	28,9	28,9	29,3	30,0	30,6	30,7	30,9	31,3	31,6	31,5	30,8	29,7
Tmin	23,2	23,0	22,7	22,9	23,8	24,2	23,7	23,6	23,3	23,2	23,4	23,8
Tmoy	26,1	26,0	26,0	26,5	27,2	27,5	27,3	27,5	27,5	27,4	27,1	26,8

Graphique n°6 : Températures (normales 1971-2000) à Saint-Joseph.

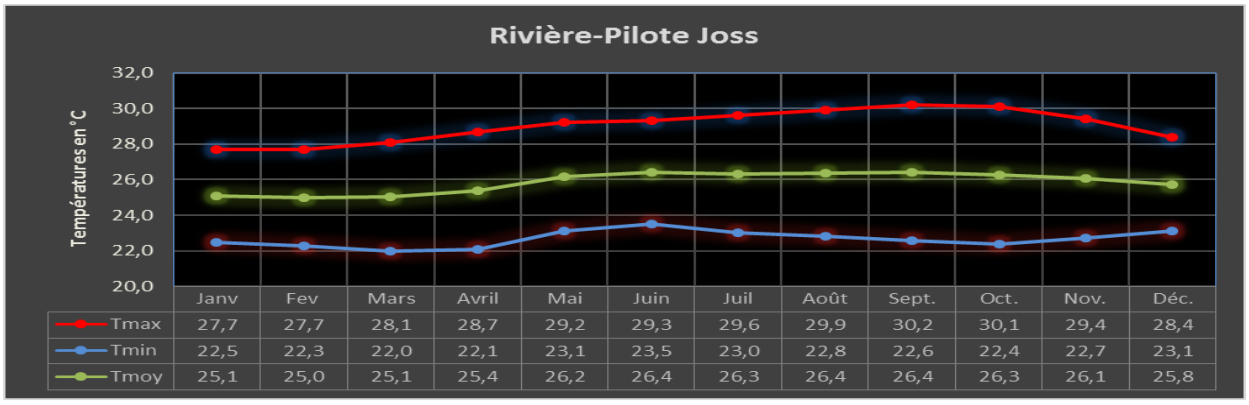


	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Tmax	27,9	27,9	28,3	29,0	29,6	29,7	29,9	30,4	30,7	30,6	29,8	28,7
Tmin	22,7	22,5	22,3	22,4	23,3	23,7	23,2	23,0	22,8	22,7	22,9	23,3
Tmoy	25,3	25,2	25,3	25,7	26,5	26,7	26,6	26,7	26,8	26,7	26,4	26,0

Puis dans le Sud, on peut voir une zone jaune-orangé (Carte 8) correspondant au 28°/29°/30°C qui cette fois à la différence des zones au Nord qui ont les mêmes températures maximales et qui sont propices au café du point de vue des températures moyennes, ici ce n'est pas le cas.

Rivière-Pilote (Graphique n°7) qui est l'une des stations situées dans cette zone est en effet caractérisée par des températures minimales et maximales pouvant atteindre respectivement 22° et 30°C mais avec des températures moyennes de 25° à 26°C durant l'année, ce qui est inapproprié pour le café.

Graphique 7 : Températures (normales 1971-2000) à Rivière-Pilote.

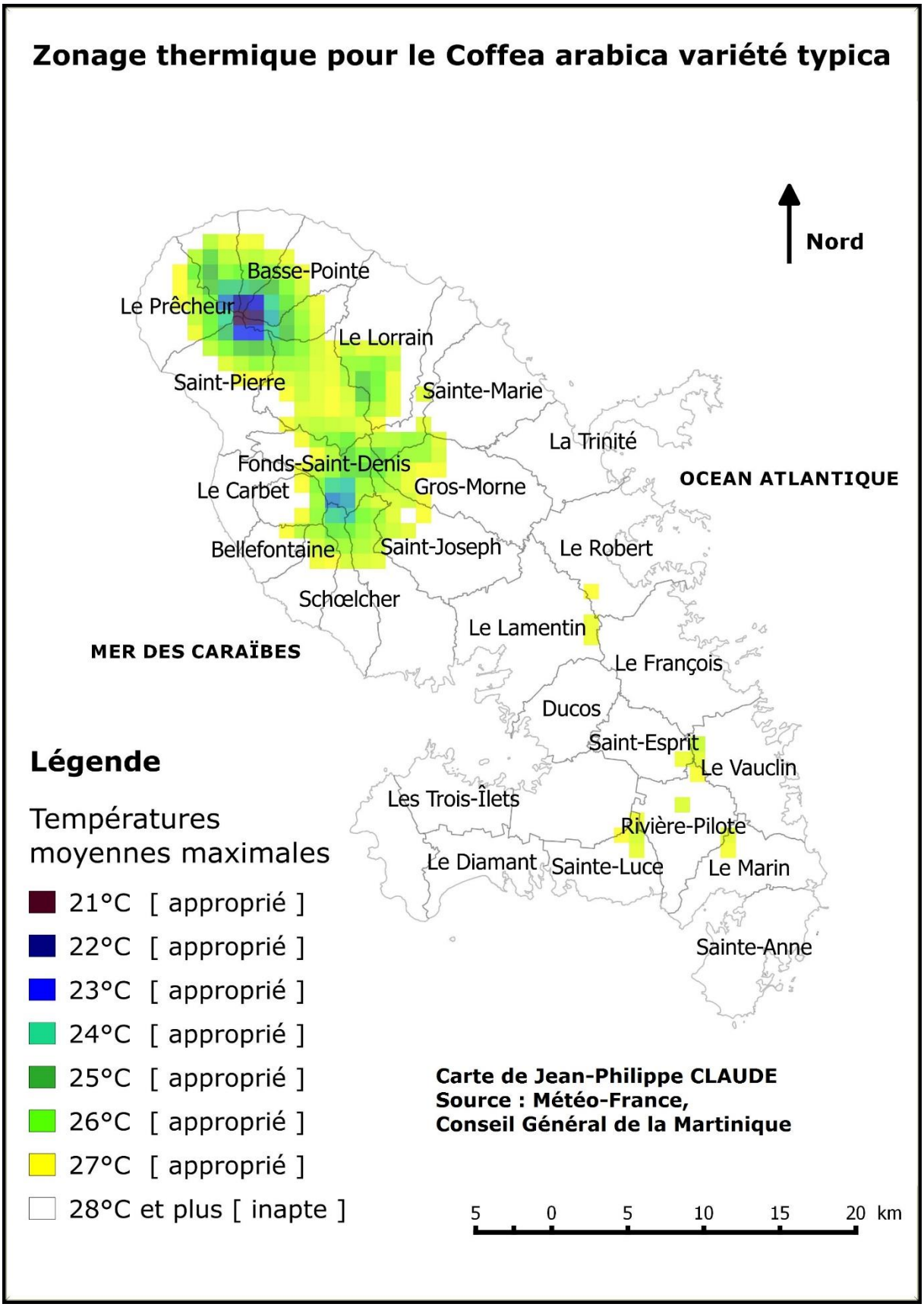


	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Tmax	27,7	27,7	28,1	28,7	29,2	29,3	29,6	29,9	30,2	30,1	29,4	28,4
Tmin	22,5	22,3	22,0	22,1	23,1	23,5	23,0	22,8	22,6	22,4	22,7	23,1
Tmoy	25,1	25,0	25,1	25,4	26,2	26,4	26,3	26,4	26,4	26,3	26,1	25,8

Ainsi globalement en regardant la carte des températures maximales, les zones propices sont celles dont les températures moyennes maximales sont inférieures à 28°C (Carte 9). Ainsi par exemple : Fonds-Saint-Denis est parmi les stations présentant les meilleurs conditions thermiques pour la culture du café avec des températures moyennes comprises entre 22° et 25°C et des minima et maxima respectivement de 20° et 28°C.

Les zones pouvant être considérées comme très optimales du point de vue de la carte des températures maximales sont celles représentées dans la gamme de couleur allant du violet au vert clair (21° à 26°C) et qui correspondent au sommet des plus hautes montagnes de l'île.

Carte 9


Zonage thermique pour le Coffea arabica variété typica
Nord
Basse-Pointe
Le Prêcheur
Le Lorrain
Saint-Pierre
Sainte-Marie
La Trinité
Fonds-Saint-Denis
Le Carbet
Gros-Morne
OCEAN ATLANTIQUE
Bellefontaine
Saint-Joseph
Le Robert
Schœlcher
Le Lamentin
MER DES CARAÏBES
Le François
Ducos
Saint-Esprit
Le Vauclin
Les Trois-Îlets
Rivière-Pilote
Le Diamant
Sainte-Luce
Le Marin
Sainte-Anne
Légende
Températures moyennes maximales
21°C [approprié]
22°C [approprié]
23°C [approprié]
24°C [approprié]
25°C [approprié]
26°C [approprié]
27°C [approprié]
28°C et plus [inapte]
Carte de Jean-Philippe CLAUDE
Source : Météo-France,
Conseil Général de la Martinique
5 0 5 10 15 20 km

Les précipitations sont un autre facteur prépondérant à prendre en compte.

c) Les précipitations

A partir du fichier raster de Météo-France présentant les données pour les précipitations annuelles sur la période de 1971-2000, issues de la simulation ALADIN-Climat forcé par les observations du climat présent, on peut analyser les zones propices à la relance de la production de café arabica vis-à-vis des régimes pluviométriques.

A partir de ce fichier raster en noir et blanc, obtenu auprès de Météo-France, des classes de couleurs ont été réalisées afin de distinguer le gradient pluviométrique sur l'île (Carte 10).

La Martinique se compose globalement d'un gradient pluviométrique allant de 1200 mm d'eau annuel à plus de 6000 mm d'eau annuel, du Sud vers le Nord en raison des nombreux reliefs surtout dans le Nord.

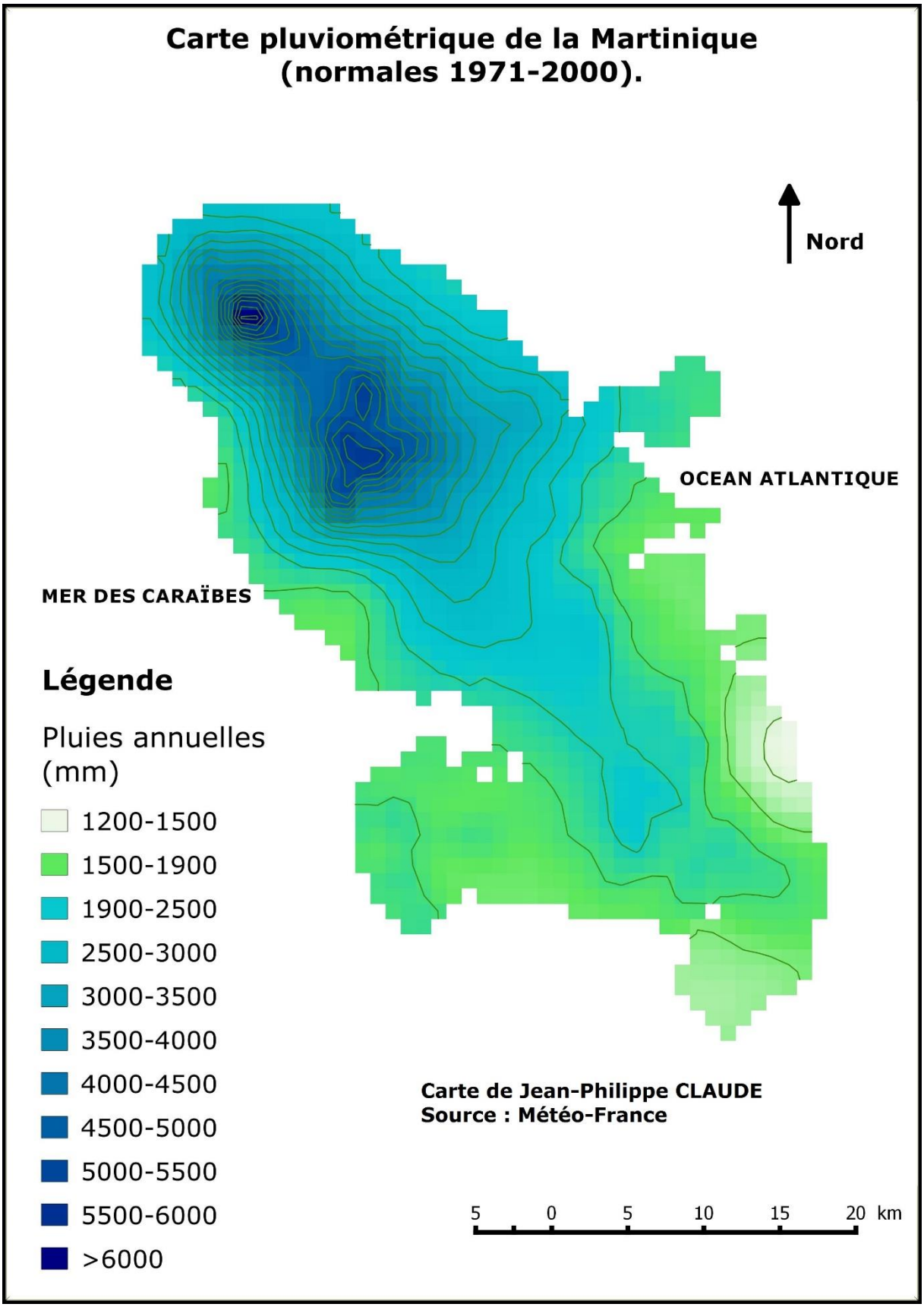
Ainsi tout comme le fort gradient thermique que connaît l'île, il y a également un fort gradient pluviométrique, et qui de ce fait rend prépondérant et indispensable de prendre en compte ce facteur climatique pour le zonage pédoclimatique.

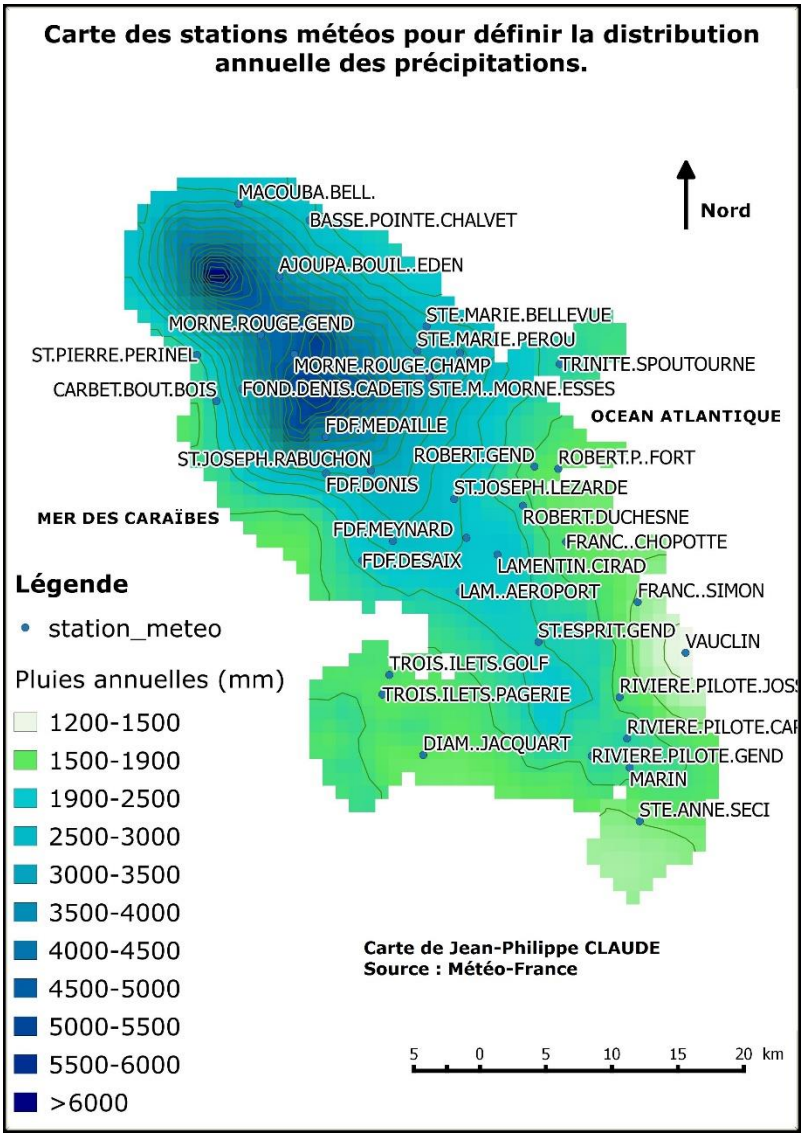
Selon la littérature mondiale, au regard des critères requis au niveau des précipitations pour la culture de l'arabica, les zones propices sont celles où les précipitations sont supérieures à 1200 mm d'eau annuel, sachant que l'optimum est compris entre 1800 et 2000 mm d'eau annuel, voire même 2400 mm d'eau annuel selon certains auteurs.

Si on peut tenir compte des précipitations à partir de 1200 mm d'eau annuel, il faut que les précipitations soit équilibrées toute l'année, ainsi 1200 divisé par 12 mois de l'année donne un minimum de 100 mm d'eau mensuel à avoir en théorie. Cette espèce peut supporter et a besoin (vis-à-vis de sa phénologie) d'une saison sèche allant de deux à quatre mois mais il faut s'assurer que durant cette période les déficits hydriques n'atteignent pas les 100 mm, d'autant plus qu'il faudrait regarder s'il s'agit en plus d'une zone où les températures sont très élevées et où l'évapotranspiration le serait aussi. L'objectif est qu'il y ait de l'eau dans le sol tout le temps, pour que le caféier soit vert toute l'année.

Pour cela, à partir des données Excel des précipitations quotidiennes sur la période de 1971-2000, fournies par Météo-France, on peut calculer les moyennes mensuelles et réaliser des graphiques par station afin de vérifier la distribution des pluies sur l'année. Tout comme les températures précédemment, ici on reprend la carte des précipitations et on y affiche les stations météos (Carte 11), puis on sort les stations situées sur la carte dans les différentes classes de couleurs représentées afin d'y vérifier la distribution des pluies.

Carte 10

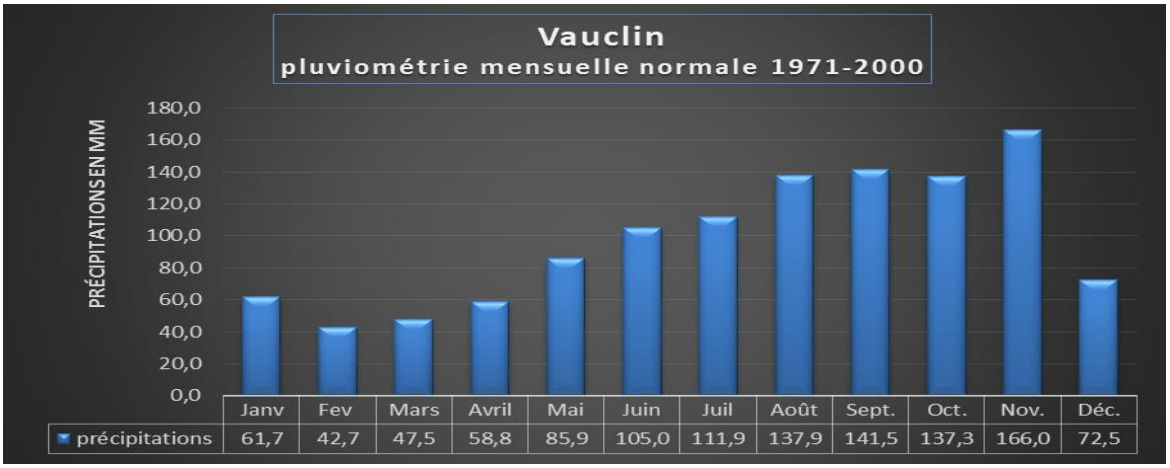

Carte pluviométrique de la Martinique
(normales 1971-2000).
Nord
OCEAN ATLANTIQUE
MER DES CARAÏBES
Légende
Pluies annuelles
(mm)
1200-1500
1500-1900
1900-2500
2500-3000
3000-3500
3500-4000
4000-4500
4500-5000
5000-5500
5500-6000
>6000
Carte de Jean-Philippe CLAUDE
Source : Météo-France
5 0 5 10 15 20 km



Carte 11

Ainsi si on prend la station situées exactement sur la carte dans la tranche 1200-1500 mm d'eau annuel, à savoir la station du Vauclin, on obtient le graphique n°8.

Graphique 8 : Pluviométrie au Vauclin

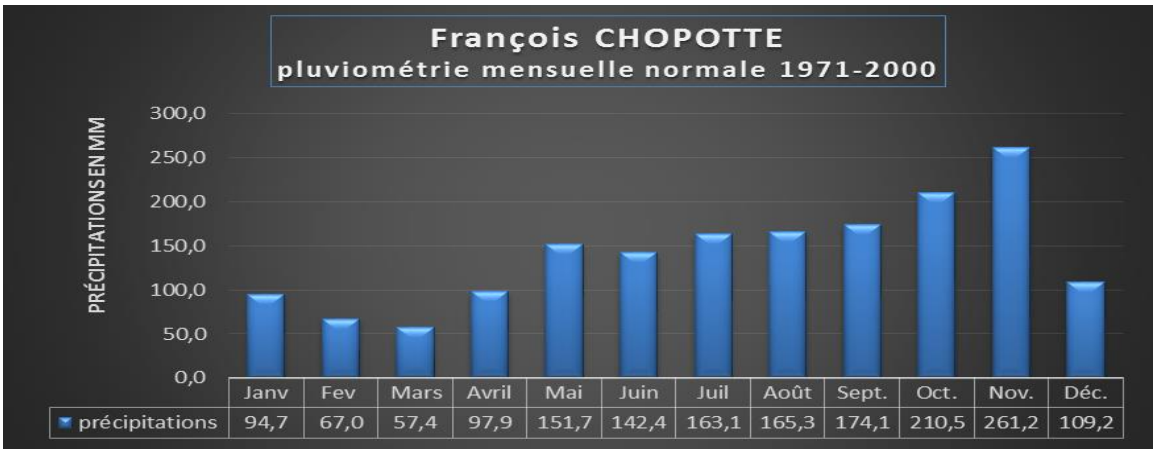


La période sèche qu'on appelle ici « carême » est centrée sur les mois de février et mars, hors on peut constater qu'il y a plus de six mois consécutifs (décembre à mai) où les précipitations sont inférieures à 100 mm d'eau. Toutefois le déficit hydrique mensuel pour la période sèche, varie que d'environ 14 à 57 mm, de plus on sait que des réservoirs d'eau existent dans le sud de l'île et sont à disposition des agriculteurs pour pallier à d'éventuelles sécheresses, ce qui fait de cette zone, un milieu pas trop restrictif pour le café au regard des précipitations.

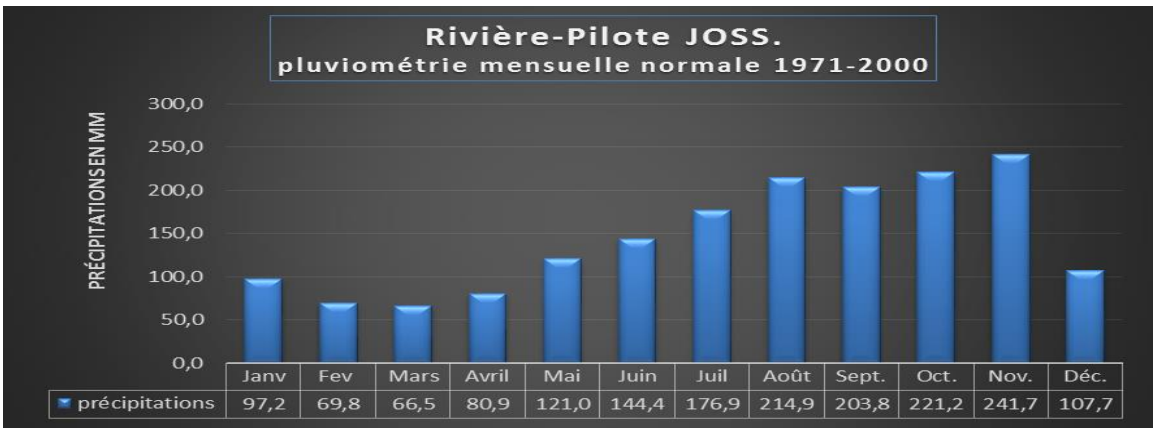
Si on prend maintenant quelques stations situées exactement sur la carte dans la tranche 1500-1900 mm d'eau annuel, à savoir les stations du François et de Rivière-Pilote, on obtient les graphiques n°9 et 10.

On observe déjà que les précipitations sont plus élevées durant les périodes des pluies. Les mois où les précipitations sont inférieures à 100 mm d'eau sont au nombre de 4 pour le François (Janvier à Avril) et 4 aussi pour Rivière-Pilote (Janvier à Avril) ; et le déficit hydrique mensuel pour la période sèche, pour les deux stations est de 2 à 33 mm. Ces conditions restent acceptables pour la culture du café d'autant qu'on sait qu'en cas de sécheresse des réservoirs d'eau existent dans le Sud de l'île.

Graphique 9 : Pluviométrie au François



Graphique 10 : Pluviométrie à Rivière-Pilote

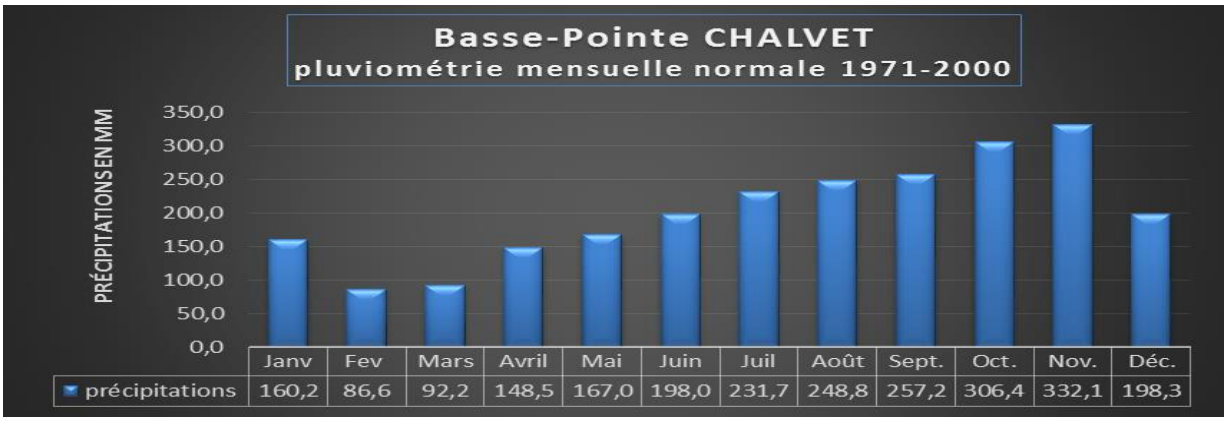


Si on prend maintenant quelques stations situées exactement sur la carte dans la tranche 1900-2500 mm d'eau annuel, c'est-à-dire la tranche des précipitations considérées comme optimales pour le café (1800 à 2200 voire 2400mm), à savoir les stations de Basse-Pointe, du Carbet, du Lamentin et de Saint-Joseph, on obtient les graphiques n°11 à 14.

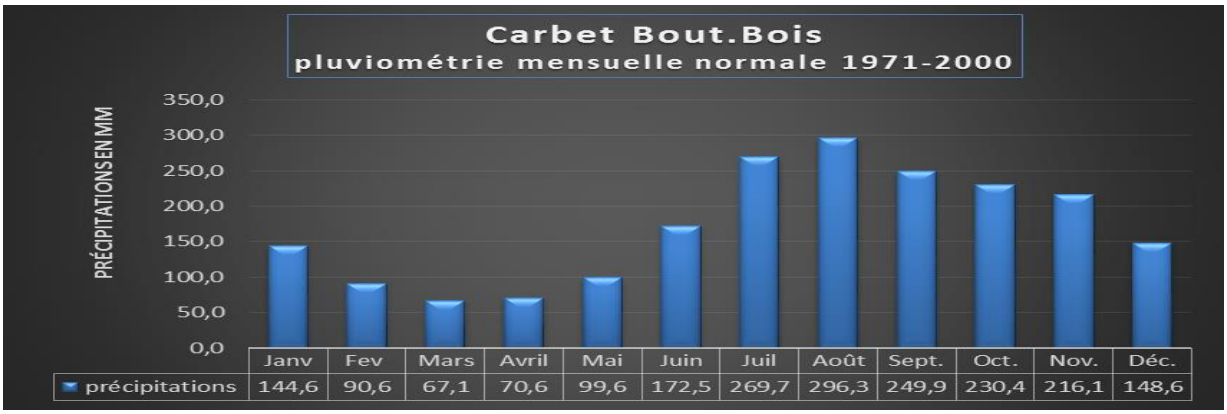
D'ores et déjà on peut comparer la station de Basse-Pointe située au Nord est sur la côte au vent plus arrosée (Graphique n°11) et la station du Carbet située au Nord-ouest sur la côte sous le vent mois arrosée en période sèche (Graphique n°12). Le Carbet a 2056 mm d'eau annuel et Basse-Pointe 2427 mm d'eau annuel. La période sèche est plus marquée pour le Carbet de Février à Mai (soit quatre mois avec des précipitations inférieures à 100 mm) qu'à Basse-Pointe de Février à Mars (deux mois avec des précipitations inférieures à 100 mm).

Le déficit hydrique mensuel pour la période sèche pour le Carbet varie de 0.4 à 33 mm, et pour Basse-Pointe de 7,8 à 13 mm, ce qui correspond à des restrictions très faibles pour le café. Nous sommes donc bien ici dans les configurations pluviométriques optimales pour le café avec une saison sèche pouvant aller de deux à quatre mois sans déficit hydrique excessif.

Graphique 11 : Pluviométrie à Basse-Pointe



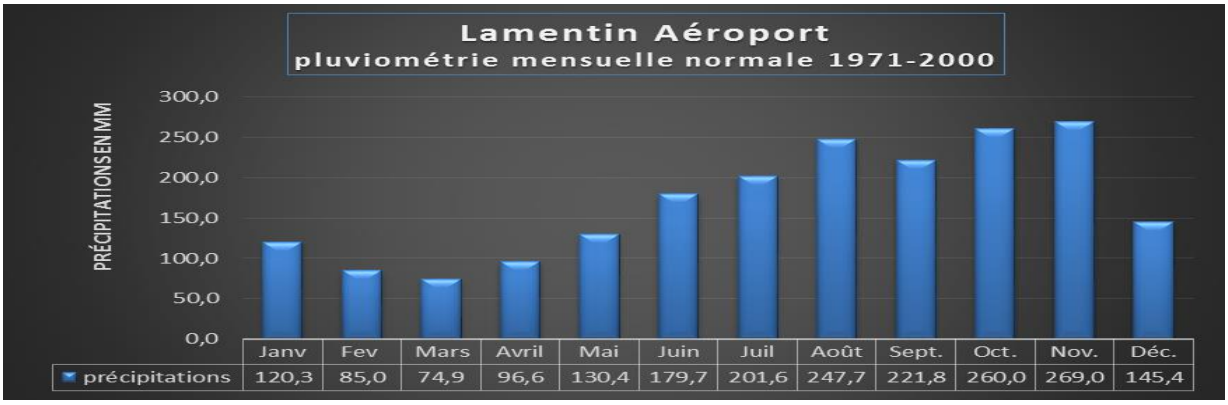
Graphique 12 : Pluviométrie au Carbet



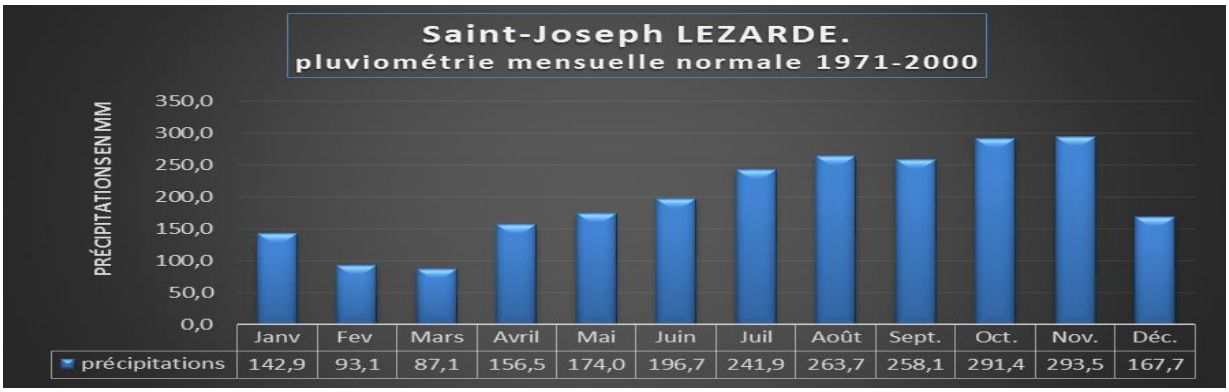
Parmi les autres stations situées dans cette même tranche optimale pour le café, on a le Lamentin et Saint-Joseph avec respectivement des précipitations annuelles de 2032 et 2366 mm d'eau. La période sèche s'étend de Février à Avril pour le Lamentin (soit trois mois avec moins de 100

mm d'eau) et de Février à Mars pour Saint-Joseph (deux mois avec moins de 100 mm d'eau). Le déficit hydrique mensuel pour la période sèche varie de 3 à 25mm pour le Lamentin et de 7 à 13 mm pour Saint-Joseph, soit des restrictions faibles pour le café.

Graphique 13 : Pluviométrie au Lamentin



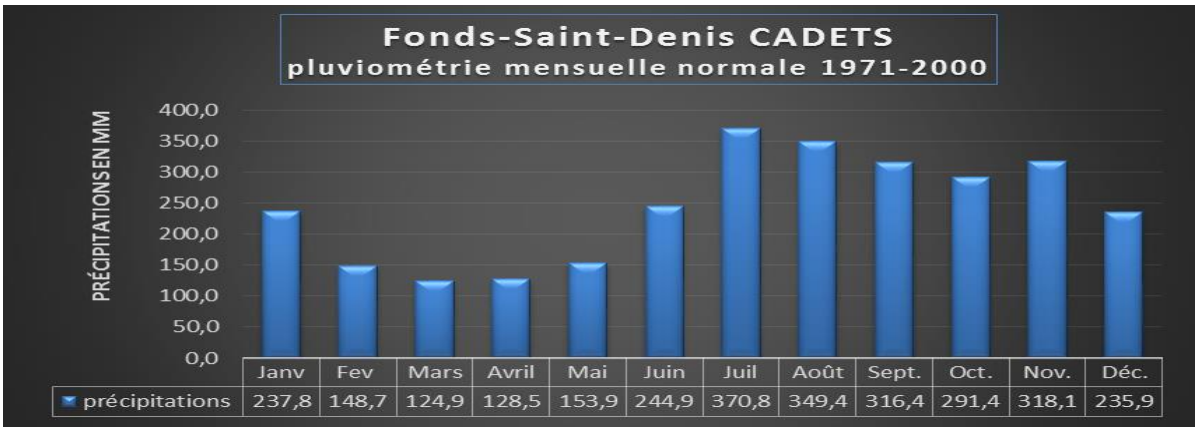
Graphique 14 : Pluviométrie à Saint-Joseph



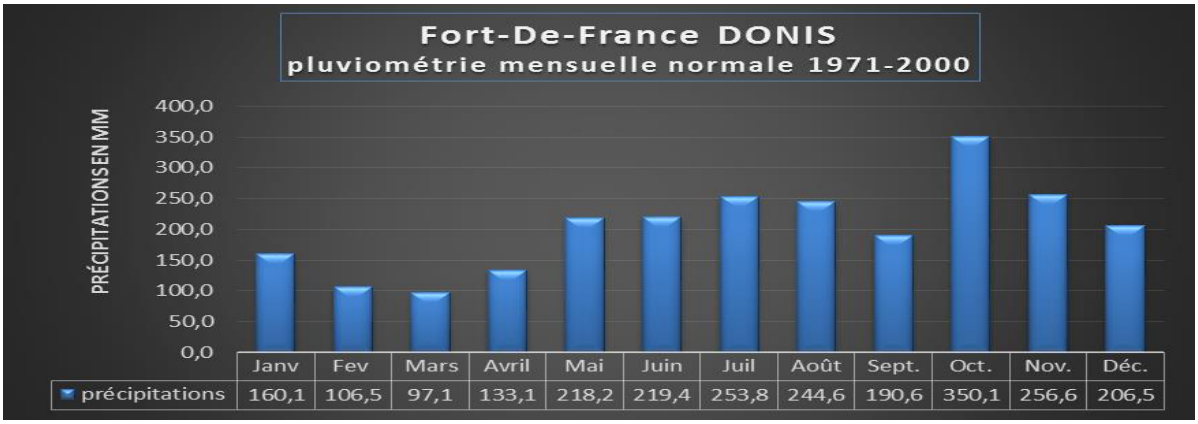
Maintenant si on regarde la tranche supérieure des précipitations allant d'environ 2500 à 3000 mm d'eau annuelle, On a Fonds-Saint-Denis (2920 mm d'eau annuel, Graphique n°15), Fort-De-France (2436 mm d'eau annuel, Graphique n°16).

On remarque, que les mois apparaissant comme les plus secs vont de Février à Mai pour Fonds-Saint-Denis (soit quatre mois), et de Février à Avril pour Fort-De-France (soit trois mois), en observant la répartition des pluies par mois. Néanmoins il n'y a presqu'aucun mois sur les deux stations ayant des précipitations inférieures à 100 mm, mais il y a quand même une période moins arrosée qui se distingue de la période très pluvieuse. Le café ayant besoin d'une période sèche par rapport à sa phénologie pour l'ouverture des boutons floraux, mais sans qu'il y ait un déficit hydrique excessif, ici cette tranche de précipitations de 2500 à 3000 mm d'eau apparaît comme la limite acceptable pour le café avec une différenciation entre période pluvieuse et moins pluvieuse, tout en évitant un déficit hydrique.

Graphique 15 : Pluviométrie à Fonds-Saint-Denis

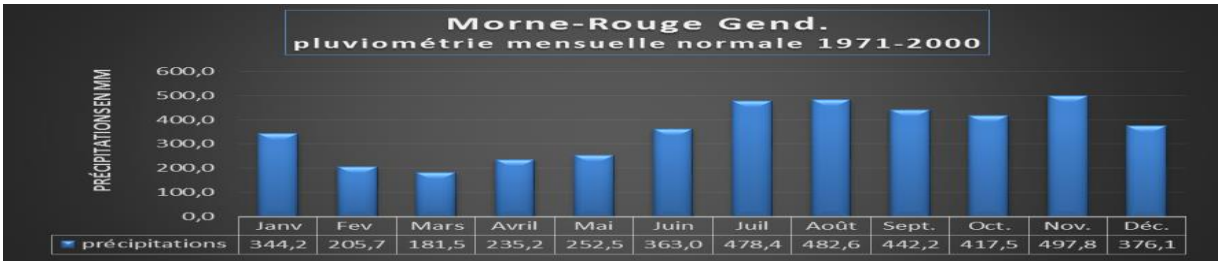


Graphique 16 : Pluviométrie à Fort-De-France



Au-delà de 3000 mm d'eau, on est plus du tout dans des zones acceptables pour le café, on a dépassé largement les zones optimales comme définies dans la littérature. La période sèche est moins observable et il faudrait mieux parler dans ce cas de période arrosée et un peu moins arrosée (hors le café a besoin d'une période sèche pour la phase de floraison). De plus à cause de ces fortes précipitations, il y a de fortes possibilités d'avoir des nappes phréatiques à moins de 2 mètres de profondeurs sur les parcelles (hors le café à besoin de 1 à 2 mètres de profondeur dans les sols). Tout ceci peut être confirmé en prenant l'exemple de la station du Morne Rouge Gend. avec des précipitations annuelles de 4276 mm d'eau, et mensuelles de 200 à 482 mm d'eau (Graphique 17).

Graphique 17 : Pluviométrie au Morne-Rouge

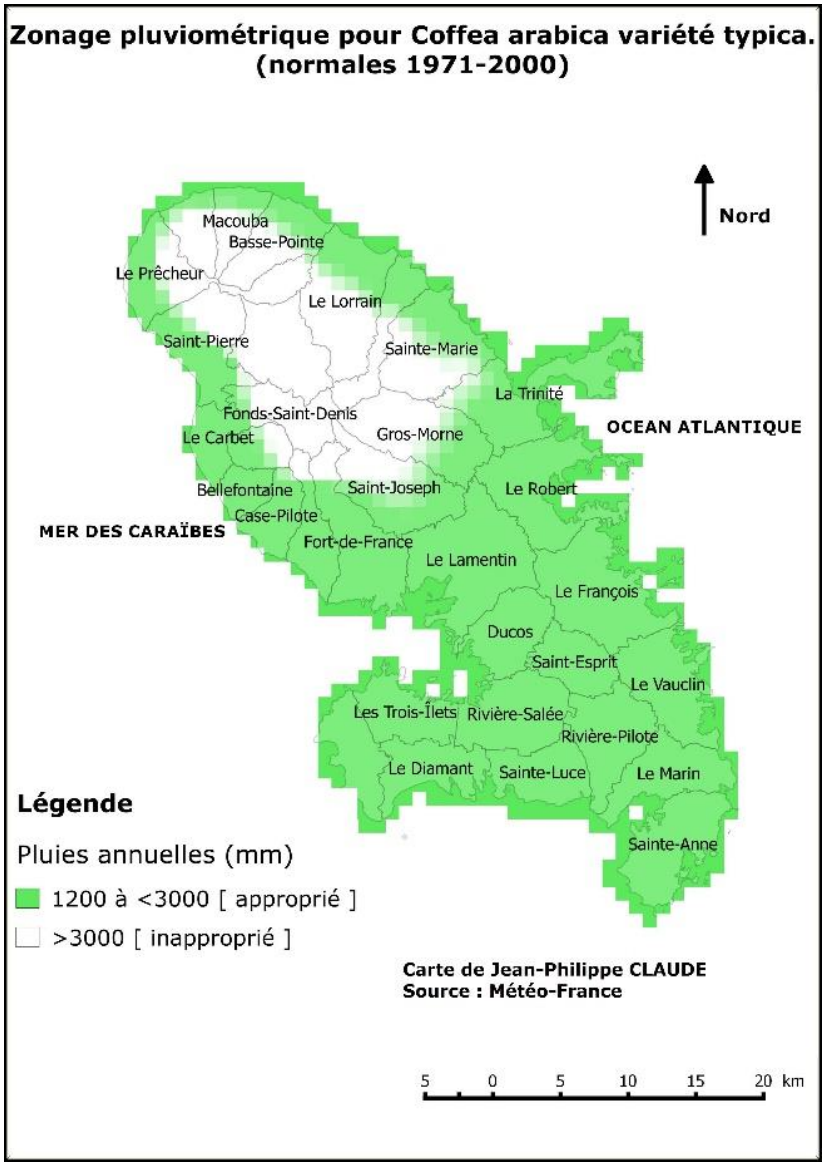


Finalement les milieux appropriés pour la culture du café en Martinique du point de vue des précipitations sont ceux compris dans les gammes de précipitations allant de 1200 à moins de 3000 mm d'eau annuel (Carte 12).

Il est à noter que les milieux optimaux pour un très bon café, avec 1800 à 2200 mm d'eau annuel pour les précipitations ne correspondent pas du tout à la carte des températures maximales propices avec 18 à 22°C de températures moyennes annuelles, qui se situeraient au niveau des sommets de la Montagne Pelée et des Pitons qui correspondent plutôt à des précipitations atteignant les 6000 mm d'eau annuel. Autrement dit il n'y a pas de milieux optimaux pour le café arabica en Martinique en prenant les critères optimaux à la fois des températures et des précipitations, mais il y a des zones acceptables.

Les milieux acceptables les plus propices sont à l'image de Fonds-Saint-Denis avec des températures moyennes annuelles allant de 22° à 25°C et des minima et maxima de 20°à 28°C, mais avec des précipitations annuelles de 2920 mm.

Carte 12



Les sols peuvent maintenant être pris en compte pour le zonage pédoclimatique.

4) Les sols

Pour obtenir la carte des sols de la Martinique, l'IRD (Institut de recherche pour le développement) a été contacté. Un jeu de cartes des sols version papier a pu être obtenu mais la version numérique pour être utilisée dans un SIG n'a pas pu être récupérée. Il a été mis à disposition pour cette étude, qu'une image scannée de la version papier des cartes des sols en Martinique, mais qui n'est pas utilisable dans un SIG (Annexe 1 : Scan de la carte détaillée des sols de l'IRD), malheureusement ces cartes version papier sont très détaillées mais inutilisables dans un SIG.

Ainsi les données qui vont être utilisées ici pour les sols, ont été récupérées auprès du laboratoire de Géode à l'université des Antilles, sous forme de donnée SIG au format shape, qui se nomme : « pedo_IRD_2006 ». Il s'agit d'une carte des sols de la Martinique qui ne donne que globalement les noms et la localisation des différents types de sols sur l'île.

Ainsi, les différentes caractéristiques essentielles à vérifier telles que la profondeur du sol, où le pH, seront à vérifier et vérifiables que sur le terrain. Ici nous ne pouvons faire qu'un zonage grossier à partir des types de sols.

Ainsi à partir de la carte n°13 : « Carte des sols de la Martinique », on peut se rendre compte de la diversité des types de sols de la Martinique, avec globalement au Nord des sols issus de projections volcaniques récentes et à évolution variable, au Centre des sols issus de l'altération de roches de volcanisme plus ancien, et dans les fonds de vallée et la plaine du Lamentin des alluvions (Venkatapen C., 2012).

Pour définir et ne retenir que les types de sols qui détiendraient les caractères favorables pour la culture du café comme définit dans la littérature mondiale **(**voir A) Les exigences écoclimatiques du Coffea arabica variété typica page 50**)**, on peut s'appuyer sur l'article de Mme Venkatapen C., 2012. « Étude des déterminants géographiques et spatialisation des stocks de carbone des sols de la Martinique. », où une description de chaque sol en Martinique y a été faite et le potentiel agronomique y a été défini (page 44 à 60 de ses travaux).

A partir de cet article, on peut réaliser un tableau succinct avec les caractéristiques de chaque sol et leurs potentiels agronomiques tels que définit dans l'article, et ne retenir que ceux qui seraient aptes à la culture du café (tableau n°5).

Carte 13

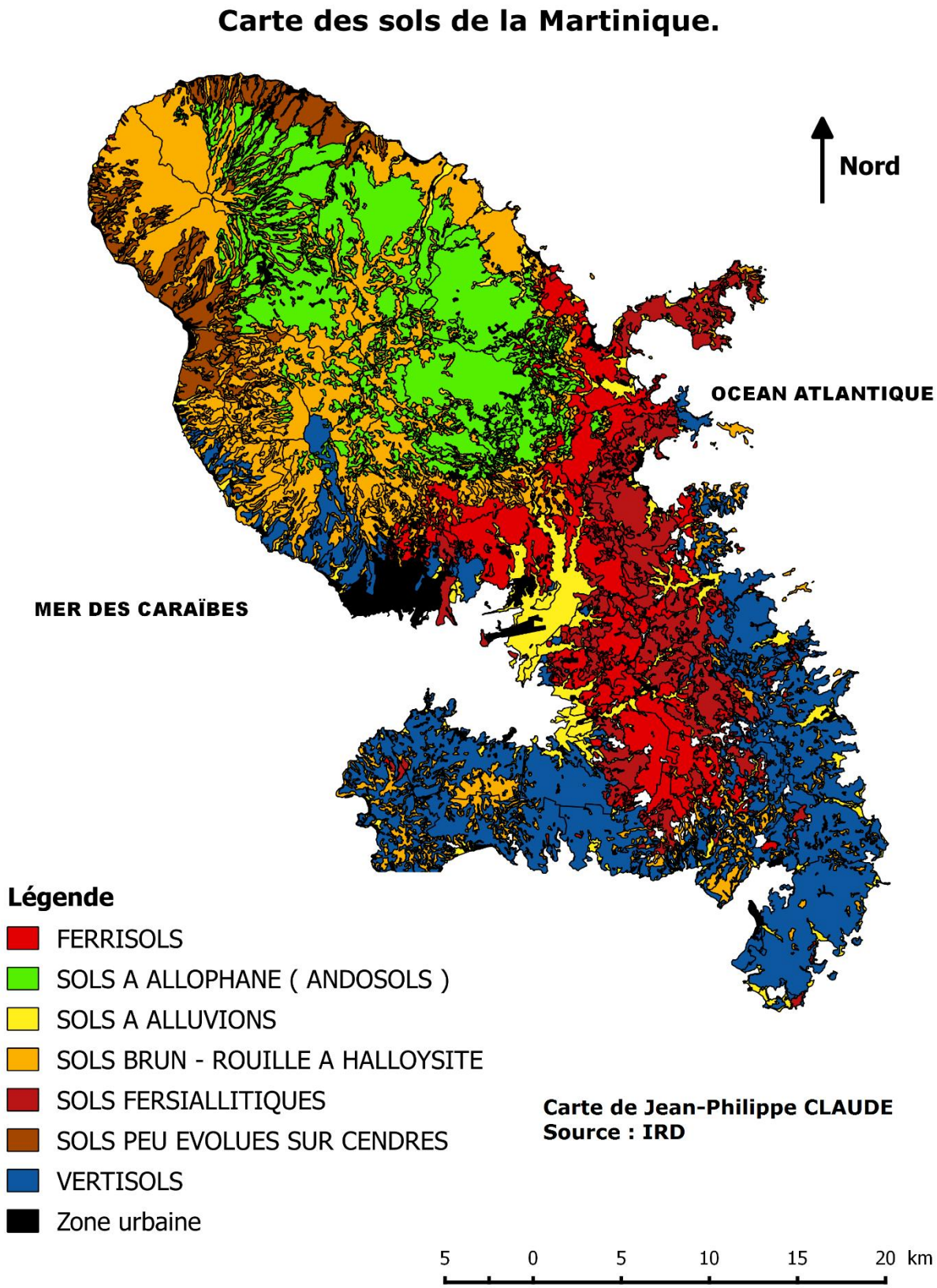

Carte des sols de la Martinique.
Nord
OCEAN ATLANTIQUE
MER DES CARAÏBES
Légende
FERRISOLS
SOLS A ALLOPHANE (ANDOSOLS)
SOLS A ALLUVIONS
SOLS BRUN - ROUILLE A HALLOYSITE
SOLS FERSIALLITIQUES
SOLS PEU EVOLUES SUR CENDRES
VERTISOLS
Zone urbaine
Carte de Jean-Philippe CLAUDE
Source : IRD
5 0 5 10 15 20 km

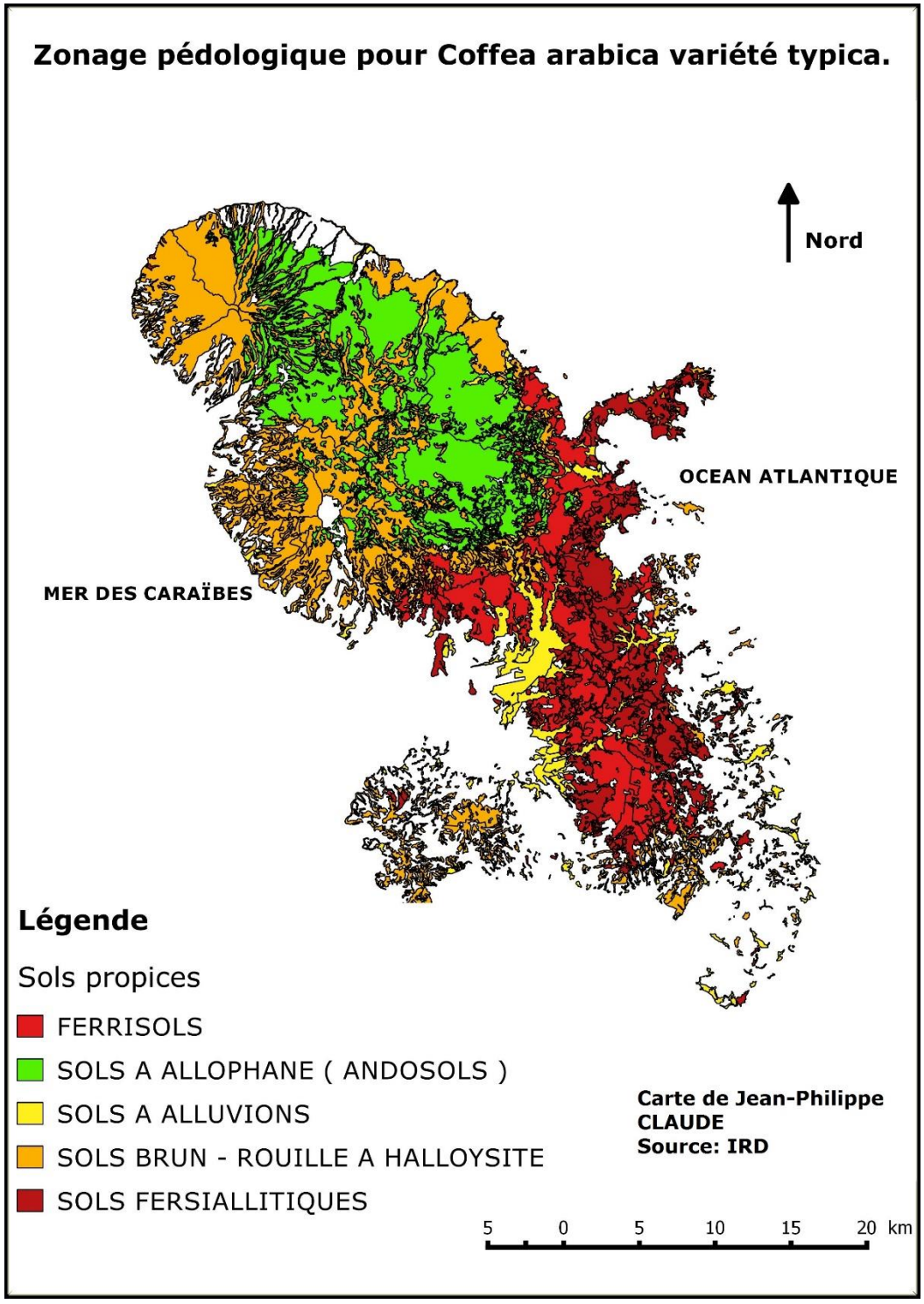
Tableau 3

	Les sols en Martinique.			
	FERRISOLS	SOLS A ALLOPHANE (ANDOSOLS)	SOLS A ALLUVIONS	SOLS BRUN-ROUILLE A HALLOYSITE
Caractéristiques	Sols profonds (plusieurs mètres), compacts, peu perméables. Structure d'ensemble du sol peu nette et la texture est argileuse. Teneur en matière organique dans l'horizon labouré de l'ordre de 2-4 %.	Très perméables. L'horizon A : très friable sur 10-15 cm d'épaisseur. L'horizon B: peut atteindre plusieurs mètres. La texture : pseudo-limon. Le sol est peu dur mais avec une nette cohésion. Les teneurs en matière organique sont variées de 3-15 %. Forte rétention d'eau.	Peu abondants, présent dans les fonds de vallée et la plaine du Lamentin. Il faut vérifier l'origine de ces alluvions par zone.	Teneur en argile: 10-60 %. L'horizon A est plus léger avec une bonne structure, et est plus sableux. L'horizon B1 est rarement supérieur à 1,20 m. Bonne perméabilité. L'horizon B3 a une épaisseur < 40 cm. Teneur en matières organiques: 2,5-4 %. Le pH généralement > à 5,5.
Potentiel agronomique	Faible perméabilité, drainage fréquent nécessaire. Forte compacité du sol, même dans l'horizon de surface, constitue un handicap pour l'agriculture mécanisée de type intensif.	Maintien d'une fertilité naturelle. Taux de matière organique importante. Propices à l'enracinement et l'exploitation du substrat par les racines des plantes. Faibles vitesses d'infiltration de l'eau, pouvant contribuer à l'hydromorphie temporaire et à l'asphyxie racinaire. L'excès d'humidité atmosphérique, le manque d'insolation, limitent les possibilités culturales en altitude.	Fertilité naturelle, drainage régulier indispensable. La présence de pierres interdit souvent la mécanisation.	Maintien d'une fertilité naturelle. Ces sols sont déjà cultivés et le travail du sol y est aisé. Propices à l'enracinement et l'exploitation du substrat par les racines des plantes. Sols propices au développement des parasites. Vitesses d'infiltration de l'eau relativement rapides

	SOLS FERSIALLITIQUES	SOLS PEU EVOLUES SUR CENDRES	VERTISOLS
Caractéristiques	L'horizon A : 15-20 cm, structure friable. L'horizon B: <60 cm, caractère gras, adhérent, plastique et compact. L'horizon C'est très friable et riche en éléments altérables. Teneur en matière organique: 2-4 %, teneur en argile 50/60 %.	Le sol se dessèche complètement sur une certaine épaisseur durant quelques semaines. L'épaisseur du profil rarement >1mètre. Teneur en argile faible (5-15 %), fraction sableuse importante (80-90 %), très érodibles. Teneurs en matières organiques: 1-8 %. Sols relativement acides.	Sols argileux à très argileux (40-80 %). Humide, le sol est plastique et adhérent ; sec, il devient très dur. Teneur en matière organique de l'horizon labouré de 2-4 %.
Potentiel agronomique	Sols très fertiles, largement utilisés par l'agriculture de type intensif ou les jardins familiaux.	Riche en éléments minéraux, grande perméabilité, travail du sol aisé. Propices à l'enracinement et l'exploitation du substrat par les racines des plantes. Mais ces sols sont sans cohésion, fortement érodibles, de faible épaisseur, et les vitesses d'infiltration de l'eau sont élevées.	Gonflement, rétention d'eau, adhérence et compacité. Vitesses d'infiltration de l'eau très faibles. En régime saturé, le gonflement des argiles contribue aux asphyxies racinaires… Les larges fissures en périodes sèches rendent l'irrigation nécessaire.

En prenant en compte la profondeur du sol, la teneur en argile, la vitesse d'infiltration, la fertilité, les éventuels inconvénients majeurs comme l'asphyxie racinaire, mais tout en sachant qu'avec les techniques modernes en agriculture on peut améliorer les potentiels agronomiques des sols, et en observant les sols sur lesquels sont positionnées les cultures de café dans le monde, les sols qui apparaissent comme acceptables pour la culture du café sont : les Ferrisols, les Andosols, les alluvions, les sols Brun-Rouille à Halloysite, et les sols fersiallitiques.

Carte 14



5) Zonage pédoclimatique : carte des potentialités.

Maintenant il est possible de réaliser le zonage en fonction des critères précédemment définis et en utilisant les facteurs prépondérants suivants : les températures maximales (parce que l'on ne dispose pas d'une carte des températures moyennes) pour bien délimiter les zones dont les températures seraient excessives et inappropriées, (les températures minimales ne sont pas utilisées car il n'y a pas de réelles restrictions, de risques de gel par exemple) ; les précipitations et leurs distributions spatiales, ainsi que les sols.

En fonction des diverses analyses que l'on a fait précédemment pour chaque facteur, voici la base des critères retenus pour le zonage pédoclimatique du café arabica en Martinique dans ce tableau ci-dessous.

Tableau 4 : Base du zonage pédoclimatique pour le café arabica

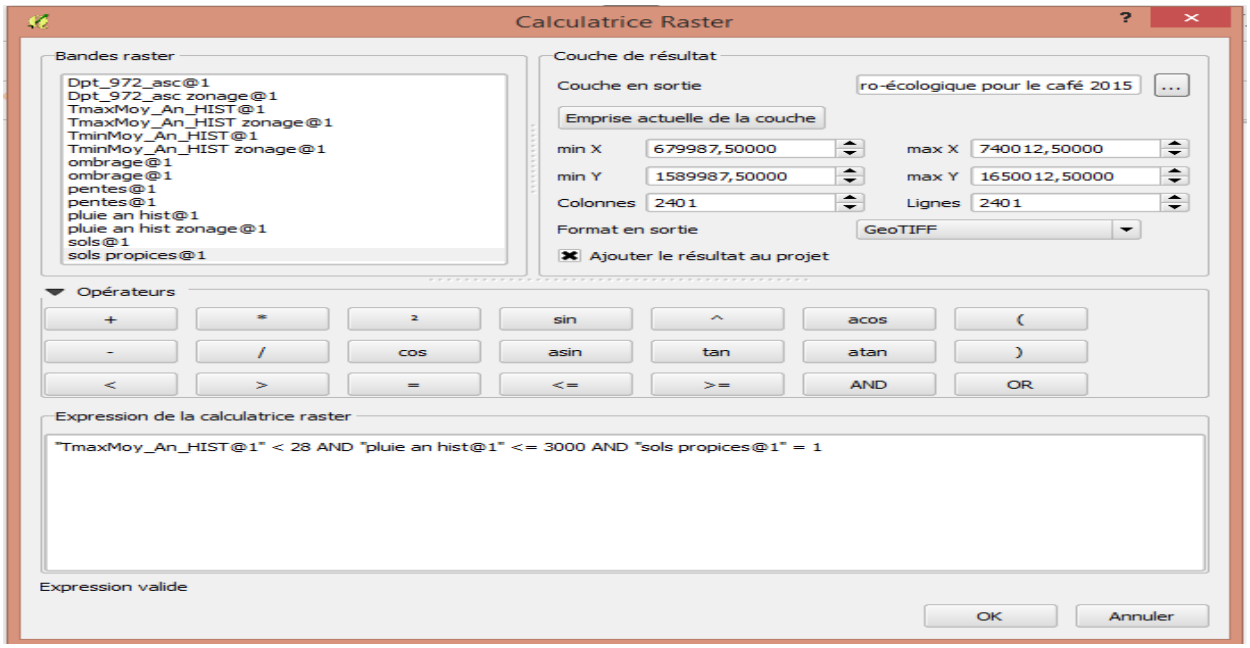
	Acceptable	Inapte
Températures moyennes maximales	< 28°C	> 28°C
Précipitations annuelles	1200 à 3000 mm	> 3000 mm
Types de sols	.Ferrisols .Sols à Allophane (Andosols) .Sols à Alluvions .Sols Brun-Rouille à Halloysite . Sols Fersiallitiques	. Sols peu évolués sur cendres .Vertisols . Zone urbaine

Pour réaliser la carte à l'aide de QGIS 2.8.1, on utilise la fonction « calculatrice raster ». On y intègre les couches raster des températures, des précipitations. La couche des sols qui est en vecteur est transformé en couche raster afin d'y être intégré aussi, et pour faciliter la formulation dans la calculatrice, on recrée une couche des sols qu'avec tous les sols propices.

A l'aide de ces trois couches (températures, précipitations, sols), on intègre dans la calculatrice des formulations avec les critères définis afin d'effectuer le zonage.

Ainsi le zonage pédoclimatique avec les critères définis : températures moyennes maximales inférieures à 28°C, précipitations supérieures à 1200 mm d'eau annuel et inférieur ou égal à 3000 mm d'eau annuel, et les différents types de sols propices sont intégrés dans la calculatrice de la façon dont il est montré sur la capture d'écran : figure n°3.

Figure 3 : « Calculatrice raster »



On obtient alors cette carte n°15.

Carte 15

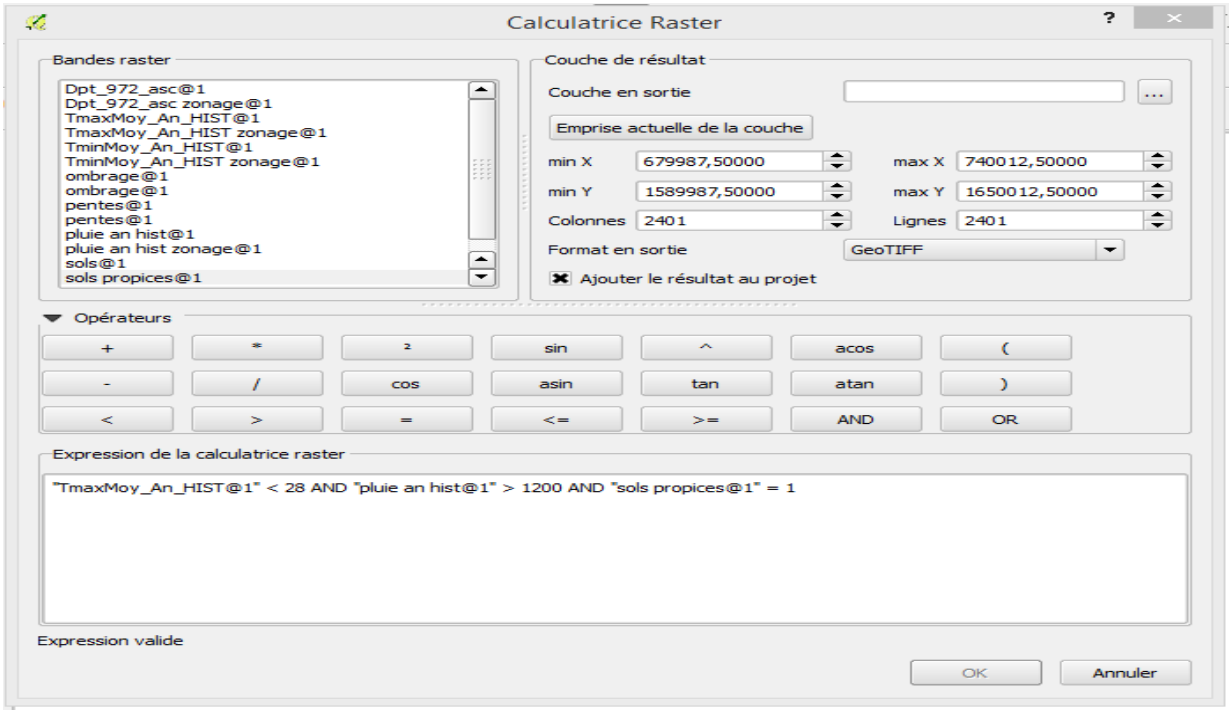


Cette carte démontre qu'il n'y a pas de zones propices avec l'ensemble des critères définis. On ne peut pas diminuer sur le critère des températures maximales (28°C) parce que cela enlèverait des milieux acceptables, et on ne peut pas non plus augmenter car au-delà de 28°C les températures seraient vraiment trop élevées pour le café. De plus pour les sols on ne peut pas rajouter des sols qui ne sont pas appropriés où en enlever ceux qui sont déjà considérés comme acceptables.

Ainsi ce sont les critères pour les précipitations qu'il faudrait modifier, en supprimant par exemple la limite fixée à 3000 mm d'eau par an, et en ne prenant que toutes les gammes de précipitations à partir de 1200mm d'eau annuel comme définit dans la littérature.

La formulation de ces nouveaux critères s'effectue de la façon dont il est montré dans la figure n°4.

Figure 4 : « Calculatrice raster »

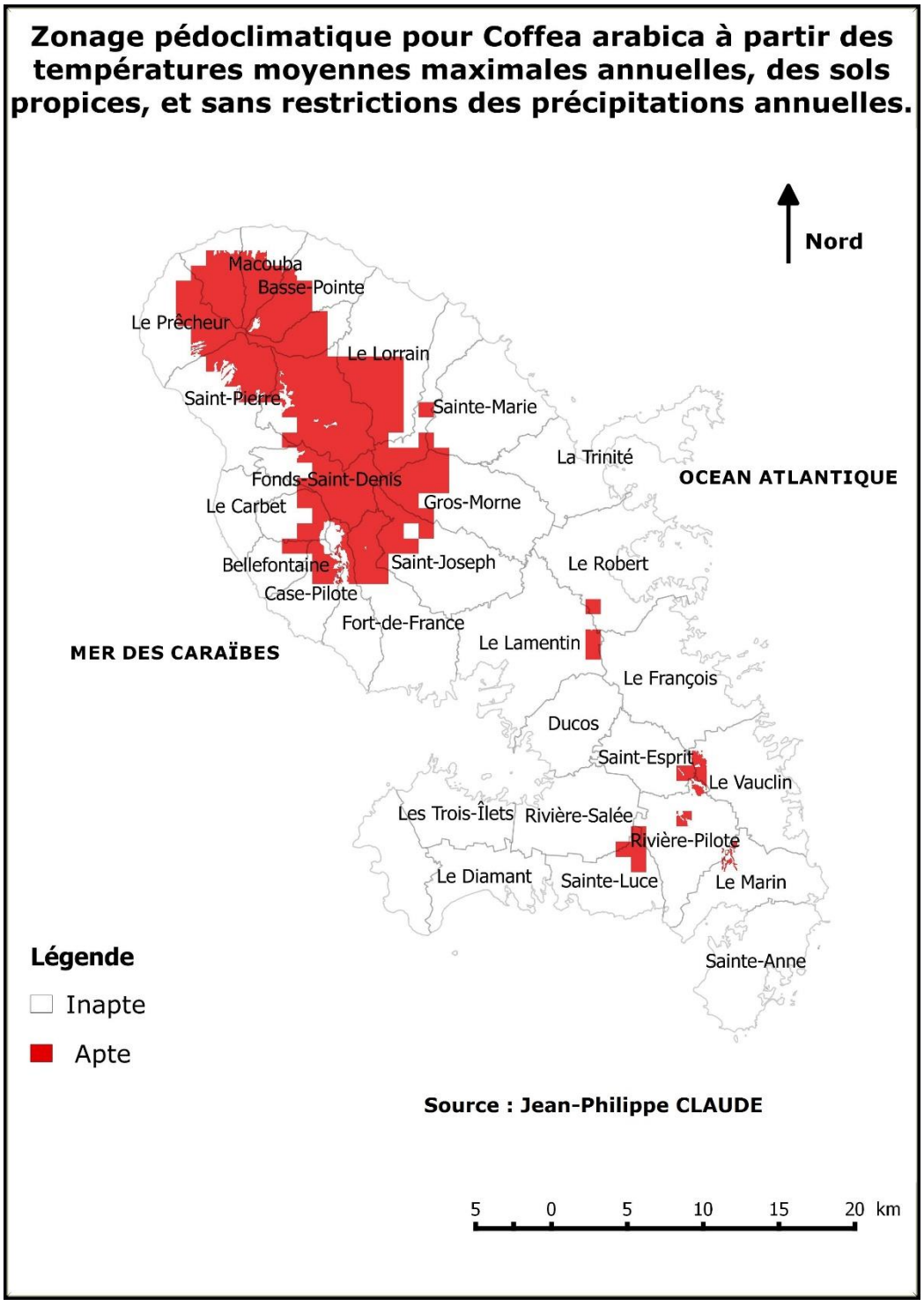


On obtient alors une nouvelle carte (Carte 16) avec les classes de températures considérées comme acceptables depuis le début (inférieures à 28°C pour les températures maximales), avec les différents types de sols définis comme acceptables depuis le début (Ferrisols, Andosols, Sols à Alluvions, Sols Brun-Rouille à Halloysite, Sols fersiallitiques), mais cette fois avec aucunes restrictions des précipitations, en prenant pour seul critère : supérieures à 1200 mm comme il est vu assez souvent dans la littérature.

On peut voir que finalement les milieux propices seraient essentiellement dans le Nord de l'île, avec quelques-uns dans le Sud de manière très localisée. En utilisant l'outil « mesurer une aire » dans QGIS, approximativement les milieux propices correspondent à 165.67 km^2, soit 16567 hectares, soit 14.7% du territoire (la superficie totale de l'île étant de 1128km^2).

Ces zones nécessiteraient surtout de nombreux drainages dues aux fortes précipitations.

Carte 16



Si on veut maintenant réaliser de la modélisation 3D c'est possible à l'aide de « Qgis2threejs » et d'un certain nombre de données SIG. Dans ce cas présent pour modéliser les milieux propices, on utilise la carte obtenue précédemment, présentant les milieux propices (Carte n°16), puis on rajoute la BD ORTHO® Version 2 de l'IGN (orthophotographie de la Martinique) en fond d'image, et on utilise les couches shape des « Chef_lieu » transmis par le Conseil Général de la Martinique et les « Oronymes » transmis par la DEAL Martinique afin de localiser les zones.

Figure 5 : Modélisation Milieux propices : Montagne Pelée

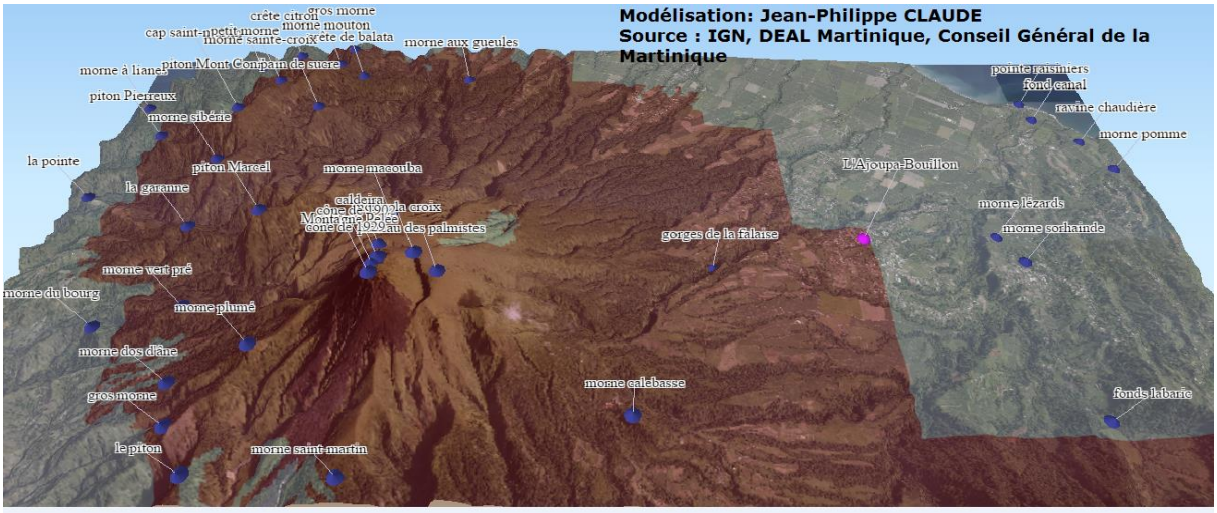


Figure 6 : Modélisation Milieux propices : Morne Rouge

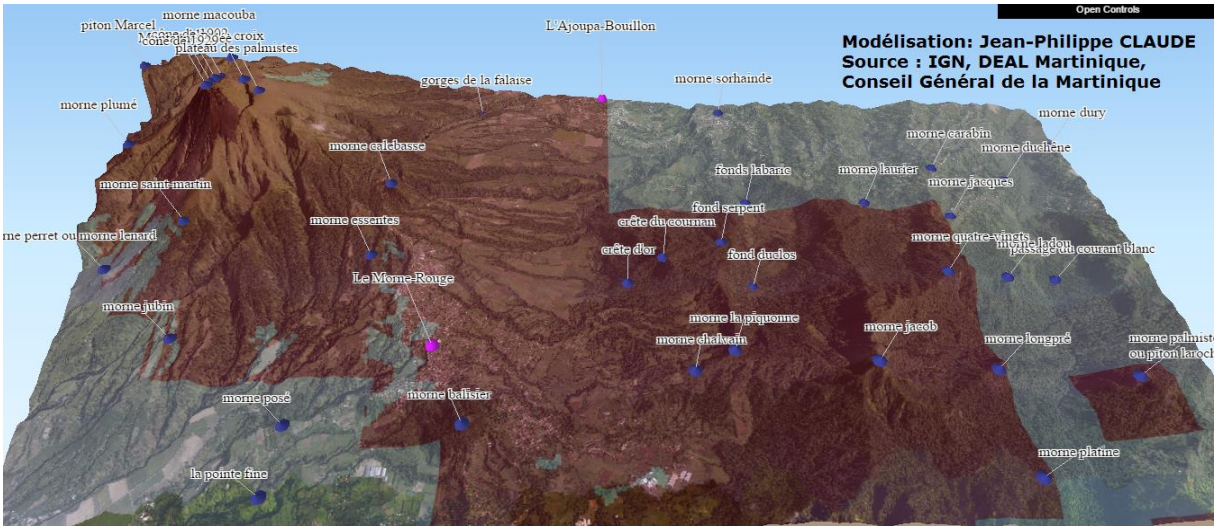
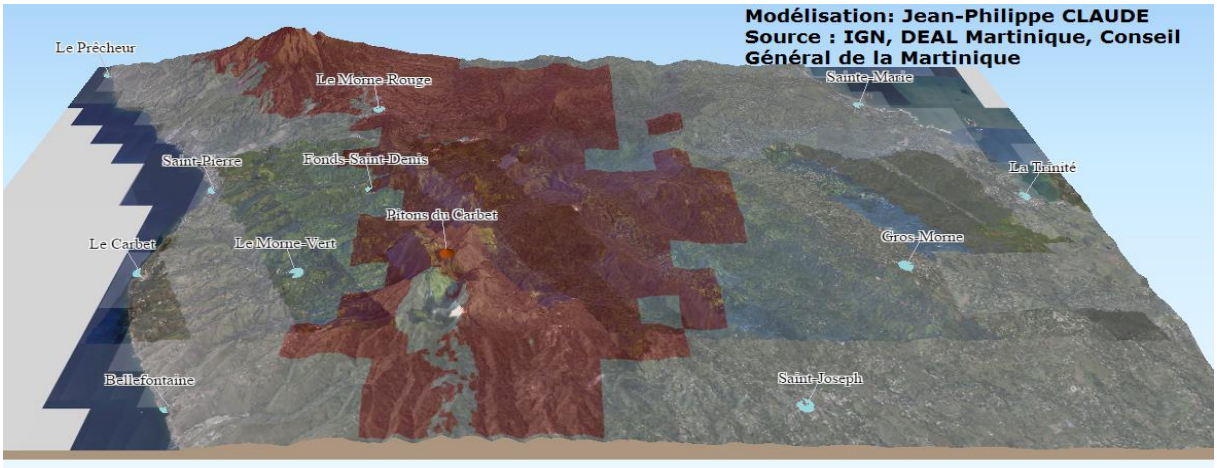


Figure 7 : Modélisation Milieux propices : Pitons du Carbet



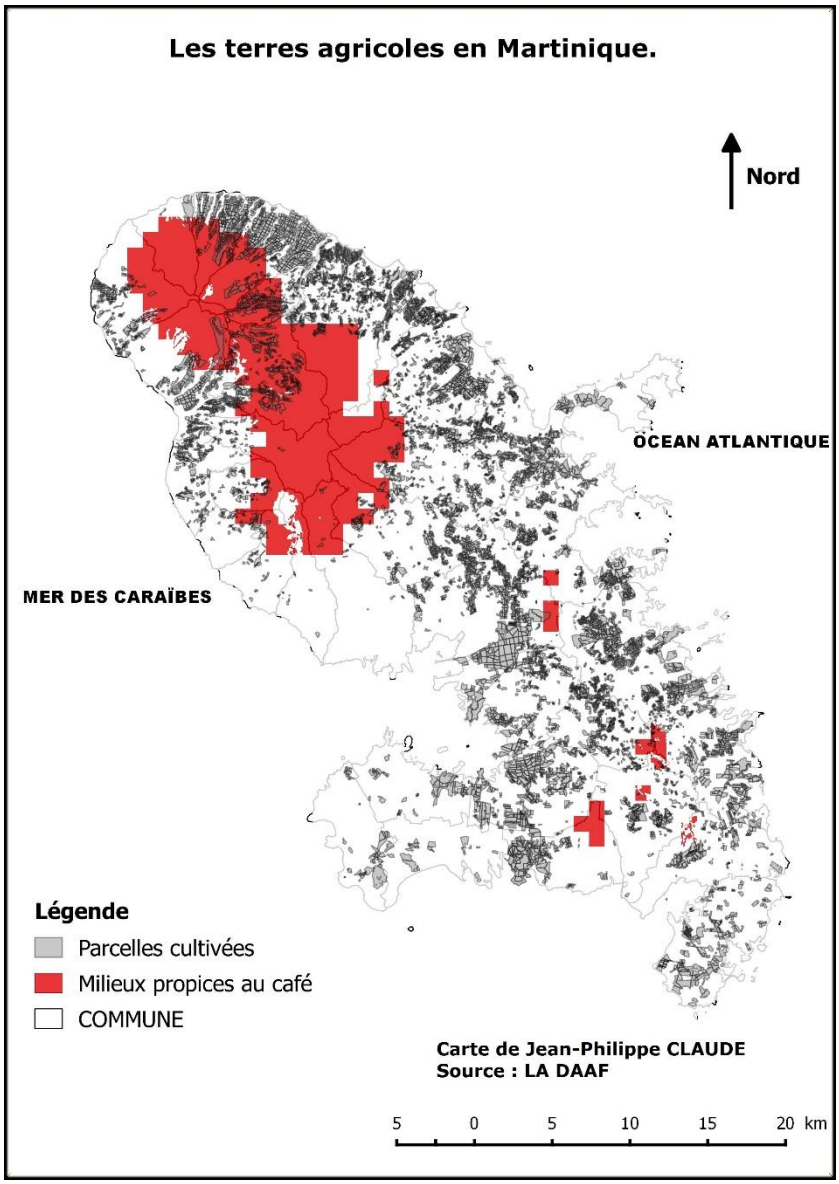
Maintenant on peut tenter de savoir parmi les milieux propices représentés, quelles sont les zones déjà cultivées, quelles sont les terres agricoles, leurs nombres et leurs surfaces ?

6) Les terres agricoles propices à la culture du café.

Pour tenter de savoir de combien d'hectares de surface agricoles sont concernées pour la culture du café, on peut utiliser des données SIG telles que la couche shape fournit par la DAAF Martinique (Direction de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt) qui se nomme « RPG2014-anonyme » et qui présente des îlots de terres agricoles en Martinique, et comme image de fond, les communes de la Martinique fournis par le Conseil Général de la Martinique.

On obtient ainsi cette carte (Carte 17), ou en superposant les îlots de surfaces agricoles sur les milieux propices, on peut voir approximativement de combien de surfaces agricoles il s'agit.

Carte 17



A l'aide du logiciel Qgis 2.8.1, de l'outil intersection (entre milieux propices et surfaces agricoles, puis avec l'option calculatrice de champs et d'Excel, on peut voir que :

1236 îlots de terres agricoles sont concernés, ce qui fait une superficie totale d'environ 2610 hectares soit environ 26 km^2, soit moins de 2.3% du territoire. Ces îlots sont en majorité des surfaces d'environ un hectare où on y cultive déjà de la banane, des légumes, de la canne à sucre, on y fait de l'horticulture, des vergers, d'autres sont en jachère ou sont des surfaces en herbe. Quelques-uns de ces îlots font aussi plus de 10 hectares, voire même 150 hectares.

Il ne reste plus qu'à transmettre à la DAAF, la cartographie des îlots propices pour le café, afin d'identifier les parcelles et de pouvoir prendre contact avec les agriculteurs concernés.

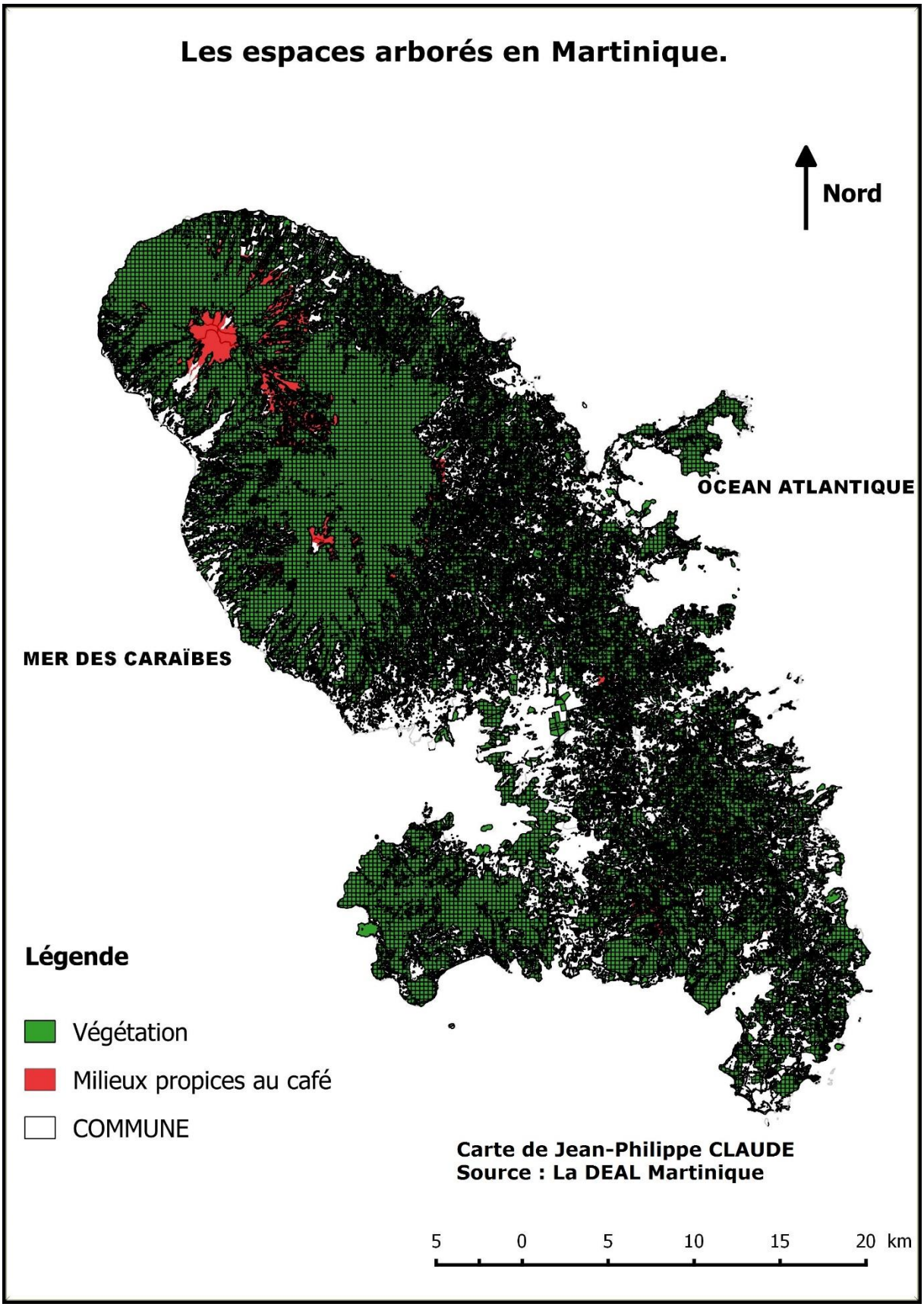
Les autres zones libres de toutes cultures et qui sont situées parmi les milieux propices correspondent à quels types d'occupation du sol ? Est-ce qu'il s'agit d'aires protégées ?

7) Végétation

Afin de répondre à cette problématique, Il a été tenté de récupérer des données SIG concernant la spatialisation des aires naturelles protégées en Martinique, mais la seule donnée qui a pu être récupérée est une carte SIG au format shape des espaces arborés en Martinique auprès de la DEAL Martinique, mais qui en aucun cas ne précise de quel type d'espace arboré il s'agit.

En effet il n'est pas possible de savoir si c'est une réserve naturelle protégée, si c'est un espace privé etc., et de plus en comparant avec la carte des terres agricoles, il semble que les espaces arborés soient mélangés aux espaces cultivés, rendant la carte difficilement exploitable. Néanmoins si on la retient et que l'on croise ces espaces arborés avec les milieux propices, il apparaît que la majorité des milieux propices à la culture du café soit déjà occupé en grande partie par des espaces arborés et très probablement des aires protégées (Carte 18).

Carte 18


Les espaces arborés en Martinique.
Nord
OCEAN ATLANTIQUE
MER DES CARAÏBES
Légende
Végétation
Milieux propices au café
COMMUNE
Carte de Jean-Philippe CLAUDE
Source : La DEAL Martinique
5 0 5 10 15 20 km

8) Potentialités de la culture du café arabica en 2015 et Histoire du café (1785)

On l'a vu précédemment, si l'on garde les critères comme définit dans la littérature mondiale pour le café arabica, au final il n'y aucune zone en Martinique qui présente à la fois les bonnes températures et les gammes de précipitations optimales, voire même acceptables pour une bonne croissance et production de café.

C'est le fort gradient pluviométrique qui rend le zonage difficile, puisque les zones présentant à la fois des températures optimales ou acceptables ainsi que des sols propices, sont en revanche caractérisées par de très fortes précipitations allant au-delà des critères définis dans la littérature.

Il y a donc écologiquement aucunes zones propices à la production de café arabica. Néanmoins si on élargit les critères des précipitations (c'est-à-dire en prenant en compte dans le zonage, des précipitations supérieures à 3000 mm d'eau annuel), on obtient une certaine carte avec des potentialités. Celle-ci peut alors être comparée à la carte représentant les habitations caféières en 1785. Cette carte de 1785 a pu être réalisée dans cette présente étude, à partir des données d'une thèse en histoire à l'Université des Antilles en 2014 où les habitations caféières de 1785 ont été recensées et classées par commune par Marie Hardy. Même s'il reste à vérifier que la délimitation communale que l'on connait aujourd'hui ne soit pas trop différente de celle de cette époque-là, cette carte reste un indicateur des milieux propices au café arabica en 1785.

De plus les deux cartes ne présentent pas les mêmes types de données pour une comparaison aisée: la première présentant les milieux propices en 2015 pour une bonne croissance et production d'arabica et la seconde les habitations caféières en 1785. Néanmoins il n'est pas interdit de tenter une comparaison. En effet la littérature en histoire parle d'une ère caféière en Martinique très importante à cette époque-là, basée sur le fameux Coffea arabica variété Typica qui aurait été apporté en 1720 en Martinique par Mr De Clieu et dont la culture ce serait développé jusqu'au XIXème siècle.

Pourtant lorsque l'on compare cette carte des habitations caféières en 1785 et notre carte des potentialités en 2015 pour la même espèce, il y a très peu de similitude (Carte 16 et 2). Ceci ferait croire qu'au XVIII^{ème} et XIX^{ème} siècle toute l'île était en partie propice à l'arabica et qu'aujourd'hui ceci n'est plus possible.

Premièrement la partie centrale du Nord de l'île qui est propice pour le café arabica en 2015, n'était pas occupé par des habitations caféières en 1785. Soit peut-être par une occupation inexistante de cette partie du territoire à cette époque, ou l'occupation de cet espace par d'autres cultures, ou encore effectivement des précipitations trop importantes pour le café arabica malgré des températures favorables. Tout ceci reste à vérifier sur les conditions éco-climatiques de cette époque et sur l'occupation du sol de cette époque.

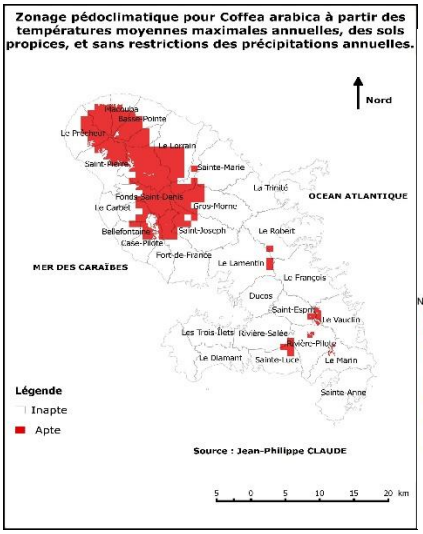
Ensuite tout le reste de l'île semble avoir été planté en caféier, hors il s'agit en grande partie des zones limites au niveau écologique pour le café arabica ; qui n'apprécie que la fraicheur de 16 à 25°C de température moyenne, et supporte mal les températures approchant les 30°C.Il semble alors difficile de pouvoir faire du café de qualité en mettant l'espèce aux limites de ses exigences écologiques, que l'on veuille faire du haut rendement ou peu.

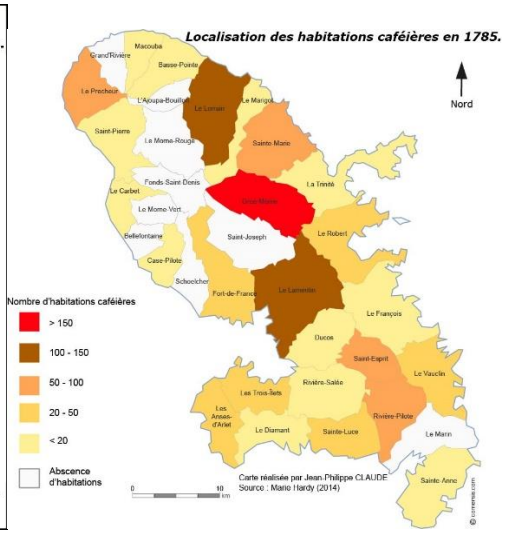
Malgré un manque de données climatiques de cette époque, et tout en sachant qu'il n'y a pas eu de modifications importantes du climat de l'ordre de plusieurs degrés sur ces trois derniers siècles, les zones ayant abritées des habitations caféières en 1785 semblent à la limite des potentialités écologiques de l'arabica. Sous réserve de pouvoir vérifier les microclimats à cette époque, notamment dans le Sud, on peut émettre l'hypothèse qu'en 1785, ce n'était pas complètement de l'arabica qui y était cultivé.

S'il existe encore de nombreuses réponses à apporter à ces multiples questionnements, qui ne sont que des hypothèses émises à partir de peu d'éléments, dors-et-déjà au regard des exigences écologiques du café arabica et des faibles potentialités de sa culture en Martinique de nos jours, (et qui, si des potentialités existent, elles sont limitées au Nord de l'île), le « café Martinique » de 1785 n'était pas totalement ou en majorité à base de Coffea arabica variété Typica. Cela remet donc en cause l'enjeu de patrimonialisation…

La question qui se pose est alors, s'il y a bien eu du café planté ici quelle était cette espèce de café associée ou pas aux peu d'arabica cultivés ? Cette énigme sera résolue en utilisant dans une autre étude, ultérieurement, la même méthode de zonage pédoclimatique ou agro-écologique réalisée pour Coffea arabica. En effet en recherchant dans la littérature, les exigences éco-climatiques des autres espèces de café (telle que le Libérica, le Canéphora…), un zonage et donc une cartographie des milieux propices à chacune de ces espèces sera réalisée, et par comparaison avec la carte de 1785, il sera révélé l'espèce qui aura été la plus probablement cultivée en majorité en Martinique.

Carte 16





Carte 2

Quoiqu'il en soit, il peut être étudié ici une autre problématique intéressante, en lien cette fois avec le réchauffement climatique. Sachant qu'actuellement les zones propices à l'arabica en Martinique restent limitées, et sachant qu'on connait un phénomène de réchauffement global sur la planète conduisant à une réduction significative des zones propices à l'arabica dans le monde, il serait ainsi intéressant de le démontrer ici à notre échelle. Ceci venant encore désavantager le projet de relance de la culture du café arabica dans l'île.

V. Résultats et Discussion : Zonage agro-climatique pour Coffea arabica variété Typica pour 2071-2100, en Martinique.

A) Résultats et Discussion

Il est proposé ici de faire un zonage agro-climatique pour le Coffea arabica, pour la période de 2071-2100, en tenant compte que des températures et des précipitations attendues pour cette période grâce à des simulations. Les autres facteurs éco-climatiques (altitude, pentes…) ne sont pas pris en compte tout comme les critères pédologiques parce que d'une part les premiers ne sont pas prépondérants, et d'autre part les derniers peuvent faire l'objet même légères, de modification à l'échelle du temps.

Le zonage agro-climatique pour le Coffea arabica sera fait à l'aide de l'un des deux simulations d'Aladin-Climat sur le domaine des Petites Antilles à une résolution de 10km de Météo-France[7]. Le modèle qui sera utilisé est le premier avec un scénario nommé RCP 4.5, même s'il y a un deuxième modèle avec un scénario nommé RCP 8.5, les deux s'étendant sur la période de 2071 à 2100. Il faut savoir qu'il s'agit de projections réalisées par des spécialistes en fonction de leurs critères et d'autres projections sont peut-être possible. Ici nous utilisons le premier modèle, tout comme il aurait pu être utilisé le deuxième modèle ou bien d'autres encore…

Il s'agit juste ici de se faire une idée des conditions climatiques attendues pour les années à venir, et les effets pour la culture de l'arabica dont il y a un projet de relance en cours de sa culture dans l'île, et dont la littérature mondiale parle de nettes diminutions pour les prochaines années des milieux propices à sa culture dans le monde.

Ainsi les données contenues dans ce modèle RCP 4.5 et qui sont utilisées ici sont les températures minimales, maximales, et les précipitations attendues pour la période de 2071-2100. Etant donné que ce sont les valeurs quotidiennes de ces variables qui ont été transmises par Météo-France, il a fallu calculer les moyennes annuelles sur la période 2071-2100. Ces projections climatiques ont été réalisées à partir des mêmes stations météorologiques déjà citées dans le zonage pour 2015.

1) Le modèle avec le scénario nommé RCP 4.5 : facteurs climatiques

a) Les températures moyennes minimales

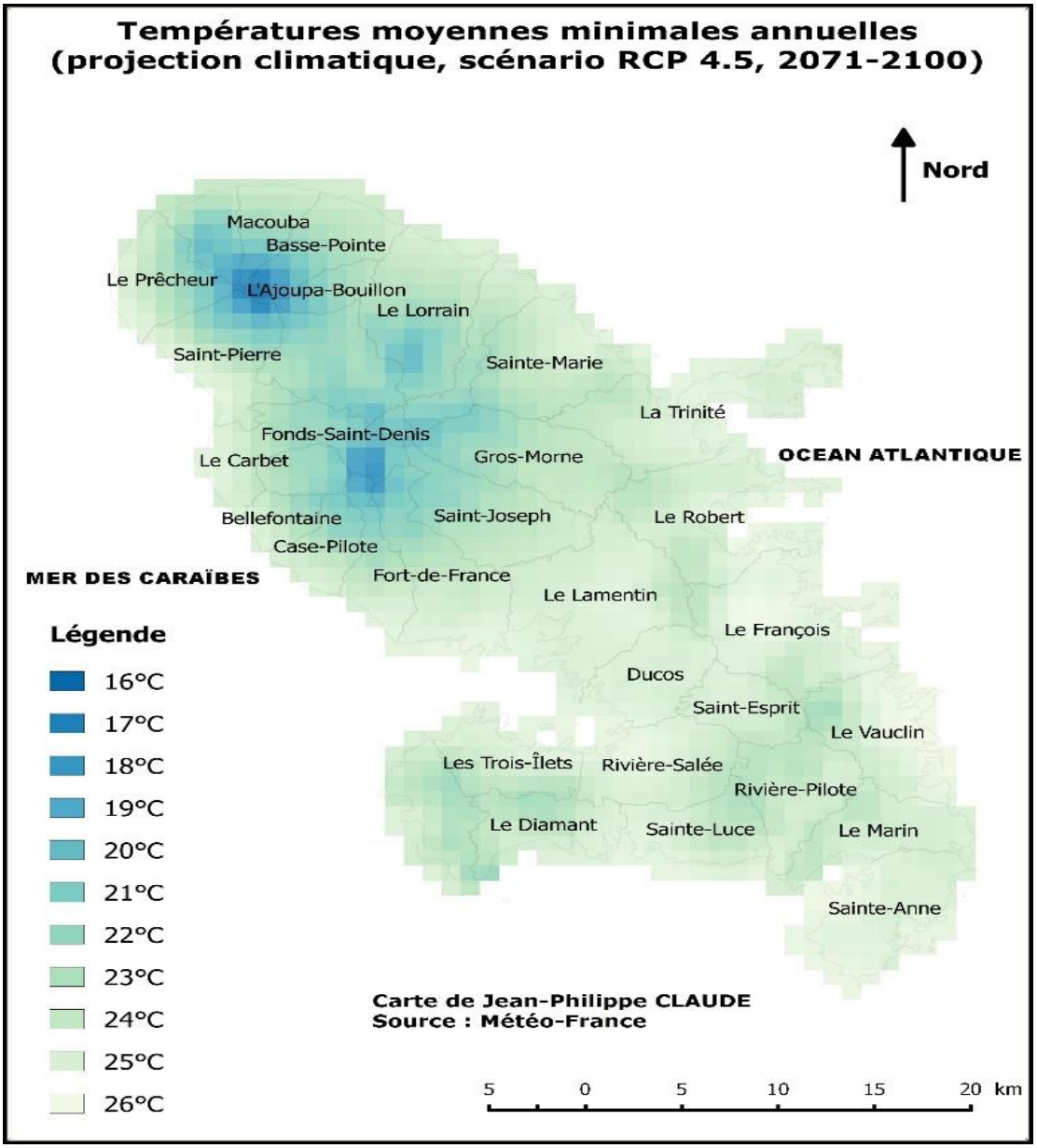
A partir du fichier raster de Météo-France présentant les données pour les températures moyennes minimales sur la période de 2071-2100, on peut faire une première analyse concernant une éventuelle modification du climat vis-à-vis des températures minimales.

[7] Cantet et al. (2014) : Cantet, P.; Déqué, M.; Palany, P. & Maridet, J.-L.
The importance of using a high-resolution model to study the climate change on small islands: the Lesser Antilles case, Tellus A, Tellus, 2014, 66

A partir du fichier raster, là aussi il a fallu créer des classes de couleurs par rapport aux données brutes fournies, afin de distinguer les différentes températures minimales qui peuvent être atteintes sur l'île (Carte 19). En comparant cette carte des températures minimales obtenues pour ce premier modèle par rapport à celle que l'on a fait pour 2015, on constate qu'il y a une légère modification puisque les températures minimales vont de 16° à 26°C et non plus de 15° à 25°C comme c'est le cas actuellement.

En fait ce sont les températures minimales au centre, au sud et sur les zones côtières qui augmentent d'un degré, mais la partie nord de l'île reste à des températures plus fraîches. Ainsi cela confirme que les zones propices pour la culture du café au vue des températures minimales restent dans le Nord. Il est à noter qu'on assiste à une augmentation des températures et non au contraire à une baisse, et donc le risque de gel est toujours largement écarté.

Carte 19



b) Les températures moyennes maximales

A partir du fichier raster de Météo-France présentant les données pour les températures moyennes maximales sur la période de 2071-2100, on peut continuer notre analyse pour caractériser le climat pour cette période. Des classes de couleurs ont été réalisées afin de distinguer les différentes températures maximales qui peuvent être atteintes sur l'île (Carte n°20).

Globalement en Martinique on assistera selon ce modèle de projection, à une forte augmentation des températures. Premièrement les températures moyennes maximales pour l'ensemble de l'île passeront de 21° à 32°C actuellement, à 23° à 32°C pour 2071-2100. Autrement dit, au niveau des plus hauts sommets de l'île les températures augmenteront et deviendront moins fraiches qu'auparavant, les zones élevées en altitude dans le Nord seront les seules à avoir des températures maximales n'excédant pas 28°C alors que tout le reste du territoire sera au-delà de cette limite.

Sachant que pour le café les températures avoisinant les 30°C sont particulièrement défavorables, on peut se rendre compte déjà, que les milieux propices pour cette période, selon ce modèle, seront particulièrement limités aux plus hautes altitudes de l'île, qui ne sont d'ailleurs pas adaptés à la culture car étant en pente, et en plus des aires protégées.

La gamme des températures moyennes requises pour une bonne croissance et production de café arabica recueillie dans la littérature, est toujours la même : à savoir 16° à 25°C et un optimum de 18° à 22°C. Nous avions définis pour 2015 que ces zones correspondaient à des températures maximales d'environ 28°C.

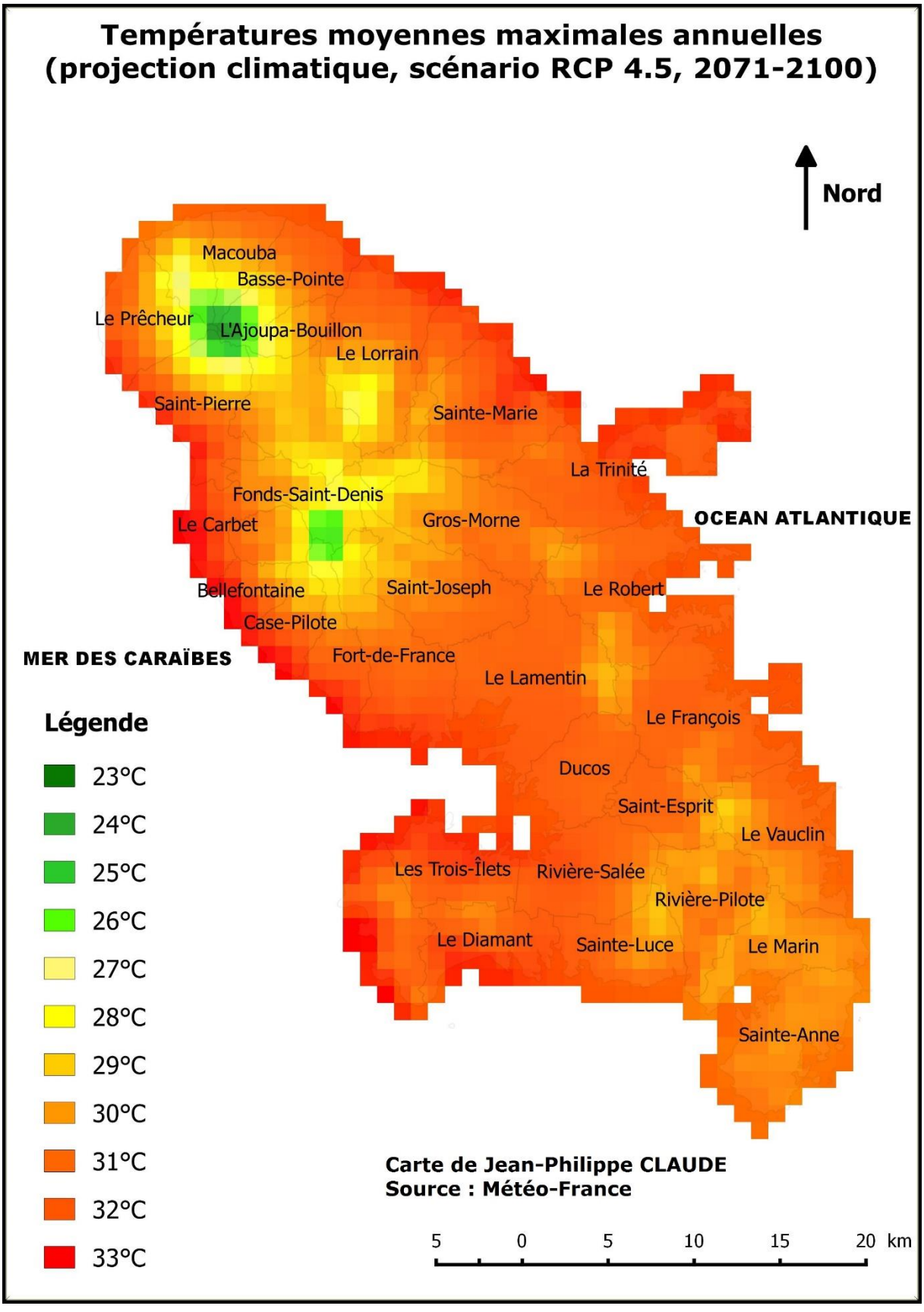
Ne disposant toujours pas directement d'une carte avec les températures moyennes annuelles en Martinique même pour cette période, qui serait beaucoup plus simple pour faire le zonage, il faut donc déterminer à nouveau les températures maximales limites à ne pas dépasser, afin de pouvoir utiliser la carte des températures maximales comme indicatrice des zones propices.

Pour cela on peut de nouveau récupérer les données Excel des températures minimales et des températures maximales, en calculer les températures moyennes théoriques par station et à l'aide de graphiques, analyser les tendances thermiques pour chaque station, pour éliminer ensuite les zones qui ne rentrent pas au final dans limites de températures acceptables pour le café.

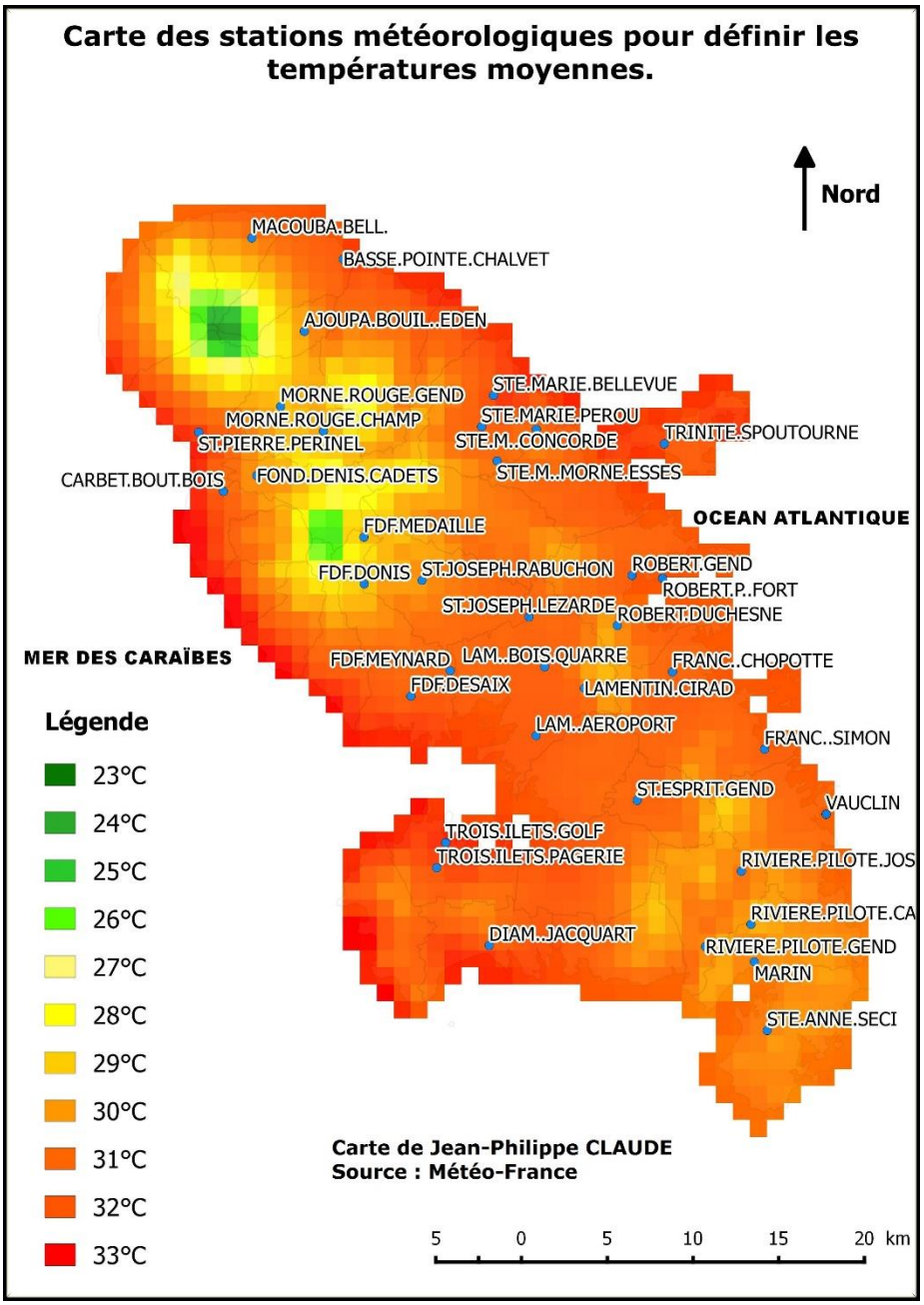
Le but étant de pouvoir revenir de nouveau à notre carte des températures maximales et de l'utiliser dans le zonage final en ne retenant que les classes de températures maximales désignées finalement comme acceptables pour le café.

Cette fois-ci en observant la carte n°20, on se rend compte que les zones où les températures sont inférieures à 28°C sont essentiellement dans le Nord. Et si l'on reprend les mêmes stations météos qu'on avait analysées pour le premier zonage, à savoir Fonds-Saint-Denis et Ajoupa-Bouillon, on peut se rendre compte qu'ils ne sont plus favorables à la culture du café selon ce modèle de projection climatique.

Carte 20


Températures moyennes maximales annuelles
(projection climatique, scénario RCP 4.5, 2071-2100)
Nord
Macouba
Basse-Pointe
Le Prêcheur
L'Ajoupa-Bouillon
Le Lorrain
Saint-Pierre
Sainte-Marie
La Trinité
Fonds-Saint-Denis
Le Carbet
Gros-Morne
OCEAN ATLANTIQUE
Bellefontaine
Saint-Joseph
Le Robert
Case-Pilote
MER DES CARAÏBES
Fort-de-France
Le Lamentin
Le François
Légende
23°C
24°C
25°C
26°C
27°C
28°C
29°C
30°C
31°C
32°C
33°C
Ducos
Saint-Esprit
Le Vauclin
Les Trois-Îlets
Rivière-Salée
Rivière-Pilote
Le Diamant
Sainte-Luce
Le Marin
Sainte-Anne
Carte de Jean-Philippe CLAUDE
Source : Météo-France
5 0 5 10 15 20 km

Carte 21

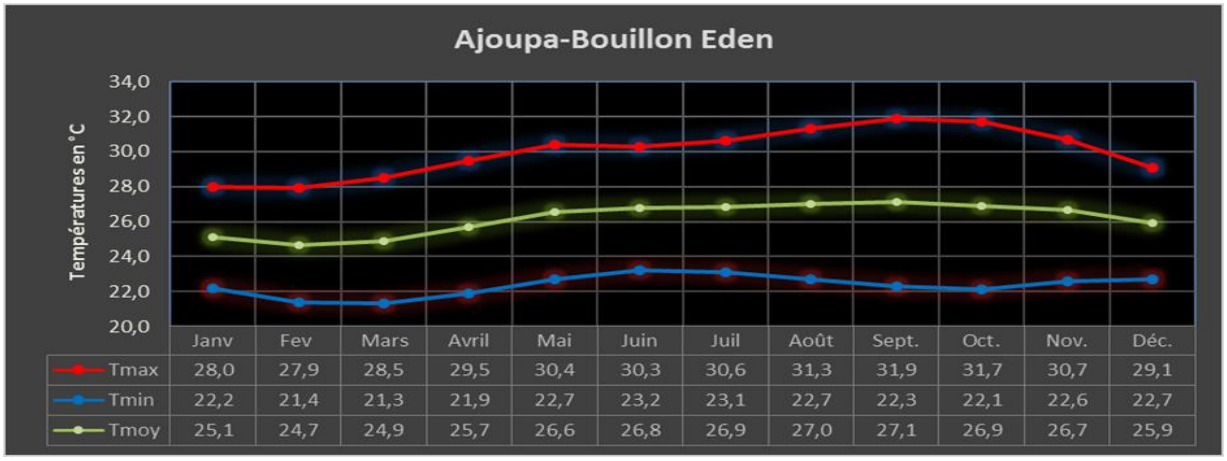


En effet si on prend la station d'Ajoupa-Bouillon Eden située à la limite entre 29°/30°/31°C de température maximale annuelle dans le Nord (Carte n°21), on peut à l'aide du graphique n°18 définir ses différentes températures.

Ajoupa-Bouillon aurait pour 2071-2100, des températures minimales et maximales pouvant atteindre respectivement 21° et 32°C et des températures moyennes comprises entre 24° et 27°C, ce qui n'est pas du tout approprié pour le café arabica.

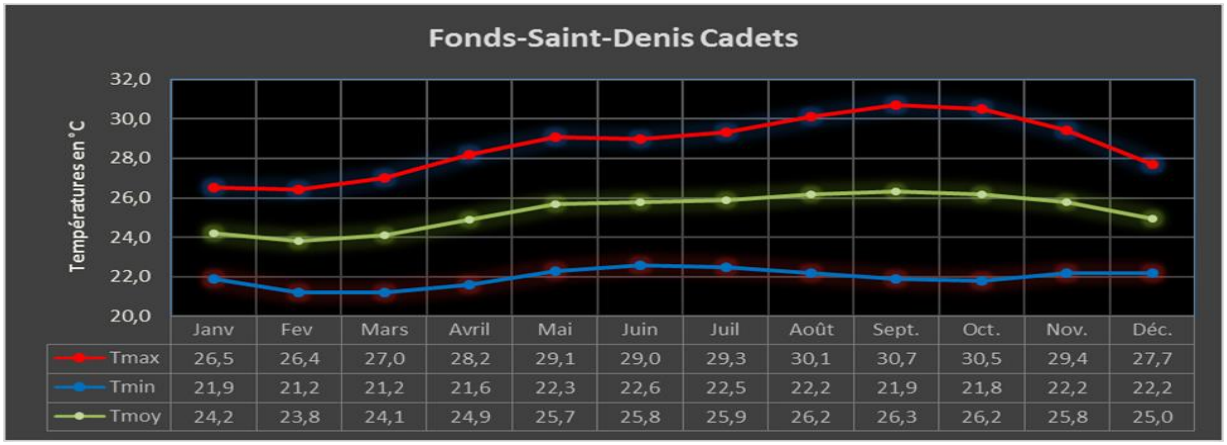
Fonds-Saint-Denis situé aussi à la limite entre 30°/31°C dans le Nord (Carte n°21), à l'aide du graphique n°19, présentera des températures minimales et maximales pouvant atteindre respectivement 21° et 32°C. Les températures moyennes seront comprises entre 24° et 26°C, ce qui n'est pas approprié pour le café.

Graphique 18 : Températures (normales 2071-2100) à Ajoupa-Bouillon



	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Tmax	28,0	27,9	28,5	29,5	30,4	30,3	30,6	31,3	31,9	31,7	30,7	29,1
Tmin	22,2	21,4	21,3	21,9	22,7	23,2	23,1	22,7	22,3	22,1	22,6	22,7
Tmoy	25,1	24,7	24,9	25,7	26,6	26,8	26,9	27,0	27,1	26,9	26,7	25,9

Graphique 19 : Températures (normales 2071-2100) à Fonds-Saint-Denis



	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Tmax	26,5	26,4	27,0	28,2	29,1	29,0	29,3	30,1	30,7	30,5	29,4	27,7
Tmin	21,9	21,2	21,2	21,6	22,3	22,6	22,5	22,2	21,9	21,8	22,2	22,2
Tmoy	24,2	23,8	24,1	24,9	25,7	25,8	25,9	26,2	26,3	26,2	25,8	25,0

Finalement ces deux stations qui se trouvaient sur la carte des températures maximales du premier zonage pour 2015 à 28°C se retrouvent pour 2071-2100 à des températures atteignant les 30/31°C. Nous ne disposons pas de stations sur les hauts sommets de l'île où la carte n°21 démontre des températures de 23 à 26°C maximales, voire même 27°/28°C.

Nous proposons donc pour ce zonage agro-climatique de garder cette limite de 28°C de température moyenne maximale pour le café arabica, tout en sachant que les températures moyennes doivent rester comprises entre 16° et 25°C, et que les températures moyennes maximales avoisinant les 30°C lui sont défavorables.

c) Les précipitations

A partir du fichier raster de Météo-France présentant les données pour les précipitations annuelles pour cette même période de 2071-2100, nous pouvons caractériser les précipitations attendues pour les prochaines années.

A partir de ce fichier raster toujours en noir et blanc, obtenu auprès de Météo-France, des classes de couleurs ont été réalisées afin de distinguer le gradient pluviométrique sur l'île (Carte n°22).

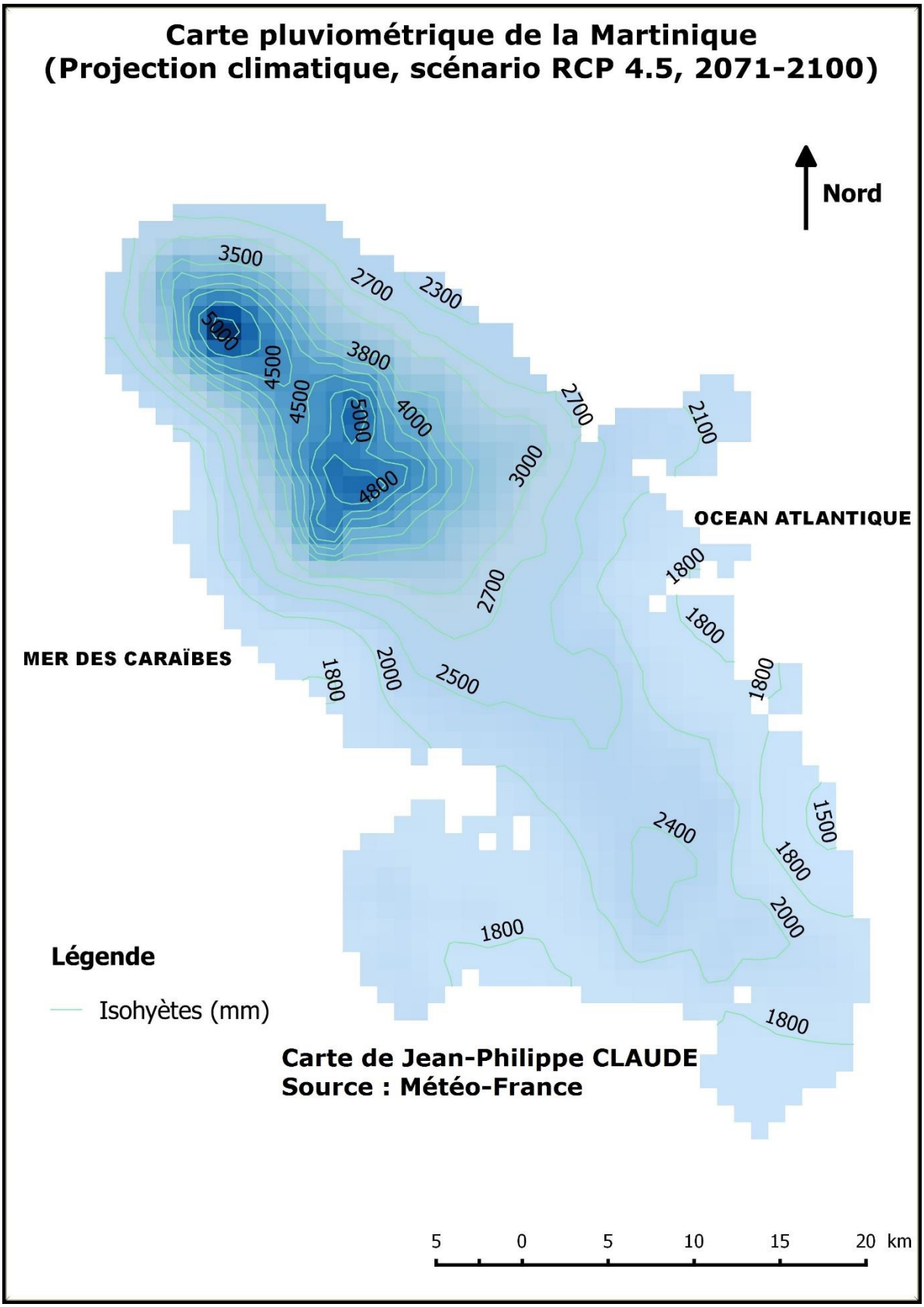
On peut voir que finalement au niveau des précipitations on assistera globalement à une augmentation des précipitations. Il n'y aura plus de zones à 1200 mm d'eau annuel, mais à partir de 1400 mm d'eau annuel. Ainsi des zones côtières en direction des sommets, le gradient pluviométrique sera toujours régulier mais plus important dès le niveau de la mer. En revanche au niveau des sommets de la Montagne pelée et des Pitons du carbet, les précipitations diminuent. Il y aura plus de zones à 5000 mm d'eau annuel qu'à 6000 mm.

Selon la littérature mondiale, les critères requis au niveau des précipitations pour la culture de l'arabica sont : à partir de 1200 mm d'eau annuel, avec un optimum compris entre 1800 et 2000 mm d'eau annuel, voire même 2400 mm d'eau annuel selon certains auteurs.

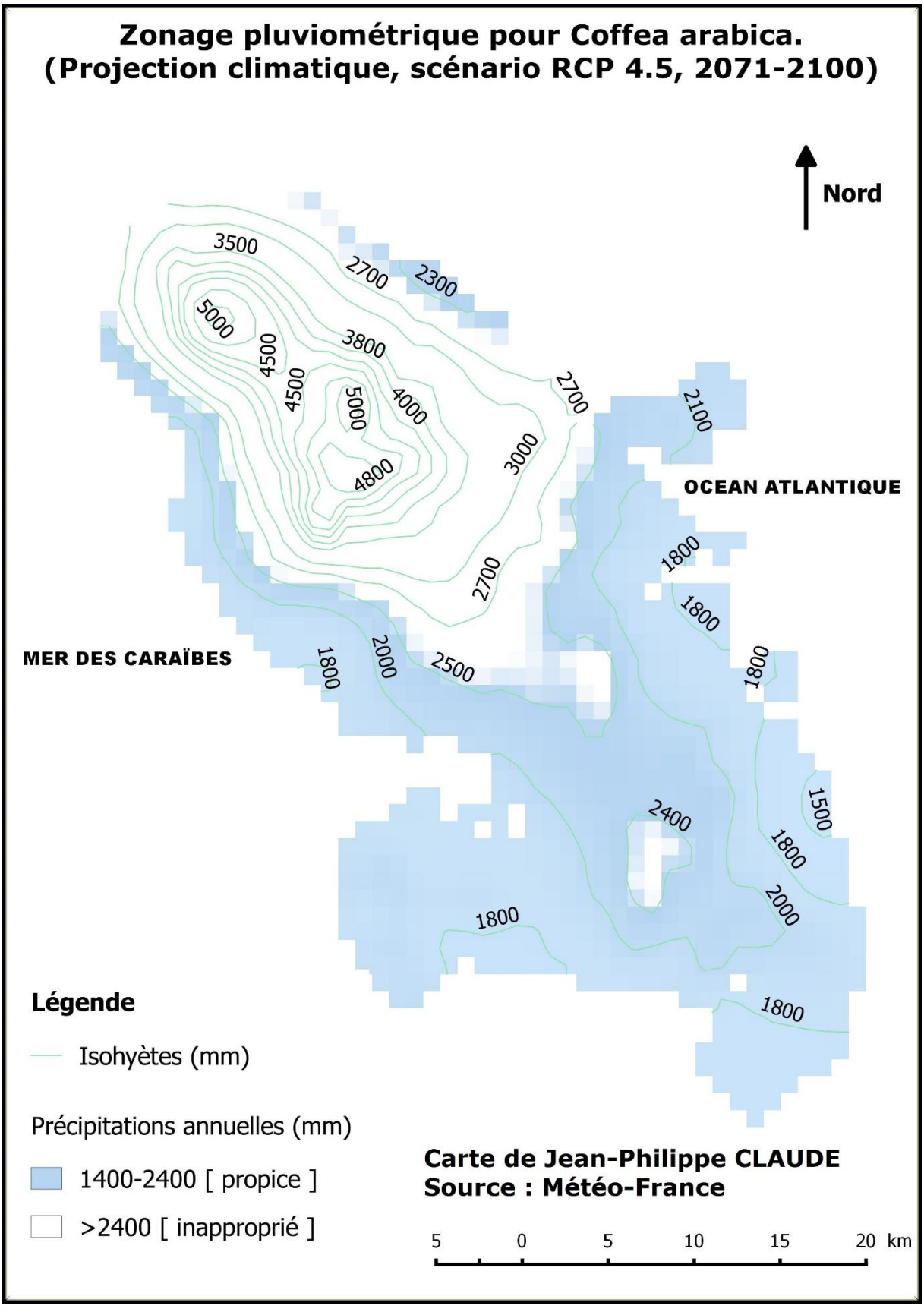
Ainsi en se limitant à ces chiffres on peut retenir comme critères pour le café arabica au niveau des précipitations : >1200mm et <2400mm.

Sans analyser la répartition des pluies sur l'année, en supposant qu'elles le soient, on peut voir avec la carte n°23 qui reprend les précipitations avec les critères évoqués, que les zones où les précipitations seraient possibles, cela ne correspond pas aux températures maximales acceptables qui sont plus au Nord sur les sommets de la Montagne Pelée et des Pitons mais dont les précipitations correspondent à plus de 4500 mm d'eau annuel. Ces fortes précipitations sont largement au-dessus des gammes de précipitations recommandées pour le café arabica.

Carte 22


Carte pluviométrique de la Martinique
(Projection climatique, scénario RCP 4.5, 2071-2100)
Nord
OCEAN ATLANTIQUE
MER DES CARAÏBES
3500
2700
2300
5000
3800
4500
4500
5000
4000
2700
2100
3000
4800
1800
1800
2700
1800
2000
2500
1800
1500
2400
1800
2000
1800
1800
Légende
Isohyètes (mm)
Carte de Jean-Philippe CLAUDE
Source : Météo-France
5 0 5 10 15 20 km

Carte 23


Zonage pluviométrique pour Coffea arabica.
(Projection climatique, scénario RCP 4.5, 2071-2100)
Nord
OCEAN ATLANTIQUE
MER DES CARAÏBES
3500
2700
2300
5000
4500
3800
4500
5000
4000
2700
2100
3000
4800
2700
1800
1800
1800
2000
2500
1800
1500
2400
1800
2000
1800
1800
Légende
Isohyètes (mm)
Précipitations annuelles (mm)
1400-2400 [propice]
>2400 [inapproprié]
Carte de Jean-Philippe CLAUDE
Source : Météo-France
5 0 5 10 15 20 km

2) Zonage agro-climatique : carte des potentialités pour 2071-2100, à l'aide du scénario RCP 4.5.

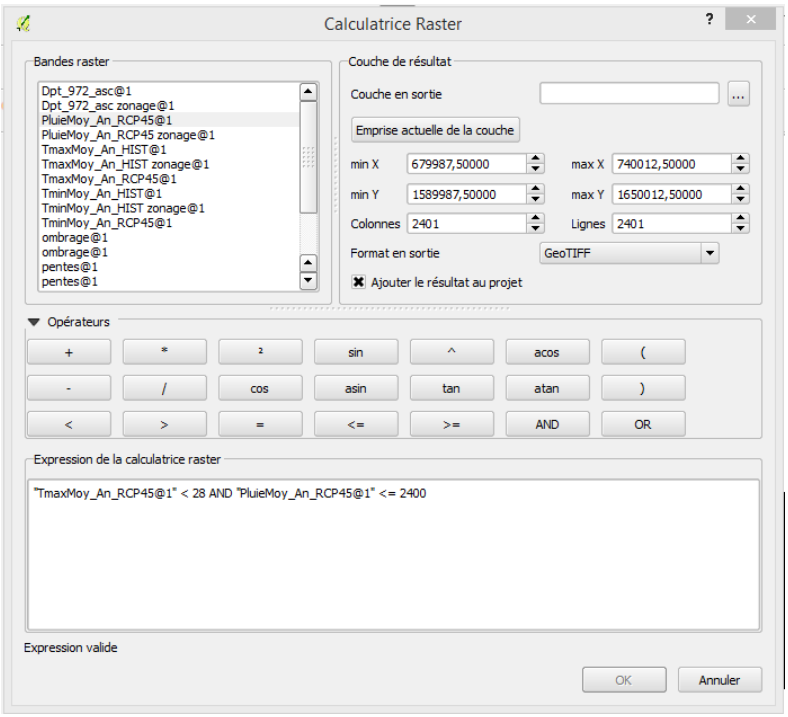
Maintenant il est possible de réaliser le zonage en fonction des critères précédemment définis pour les températures maximales, et pour les précipitations. Les températures minimales ne sont pas pris en compte car les températures maximales, devraient permettre de garder les zones dont les températures restent acceptables pour le café et a fortiori pour les minimales aussi.

Tableau 5 : Base du zonage agro-climatique pour le café arabica

	Acceptable	Inapte
Températures moyennes maximales	< 28°C	> 28°C
Précipitations annuelles	1200 à 2400 mm	>2400 mm

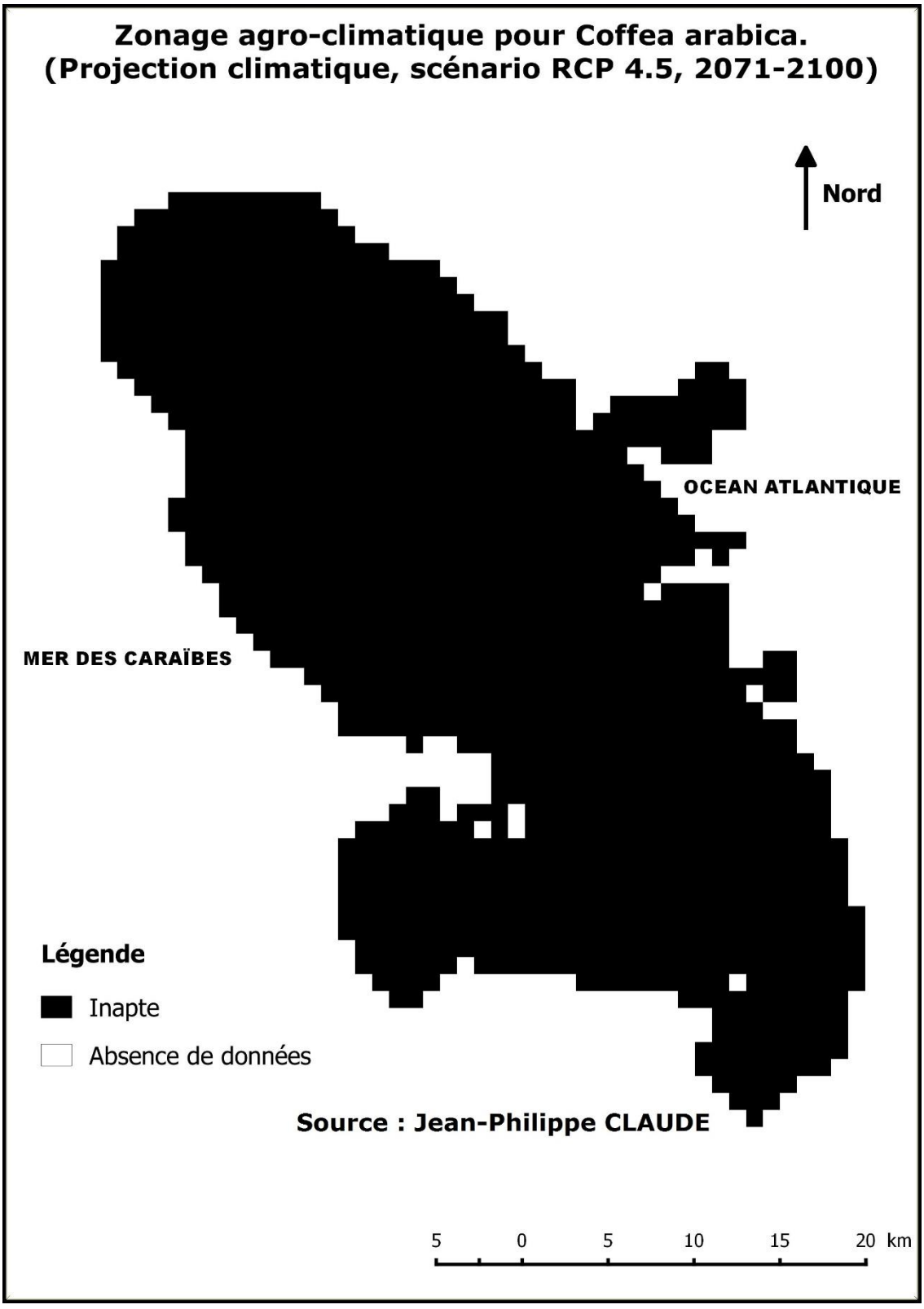
Pour réaliser cette carte de potentialités, on utilise la même méthode que précédemment, c'est-à-dire à l'aide de QGIS 2.8.1, on utilise la fonction « calculatrice raster » (Figure 8). On y intègre les couches raster des températures moyennes maximales annuelles et des précipitations moyennes annuelles, puis grâce à une programmation avec les critères définis afin d'effectuer le zonage, on peut créer une carte de synthèse.

Figure 8 : « Calculatrice raster »



On obtient alors cette carte n°24, où on peut se rendre compte qu'il n'y a pas de zones propices en 2071-2100 selon ce modèle, et selon les critères stricts de la littérature.

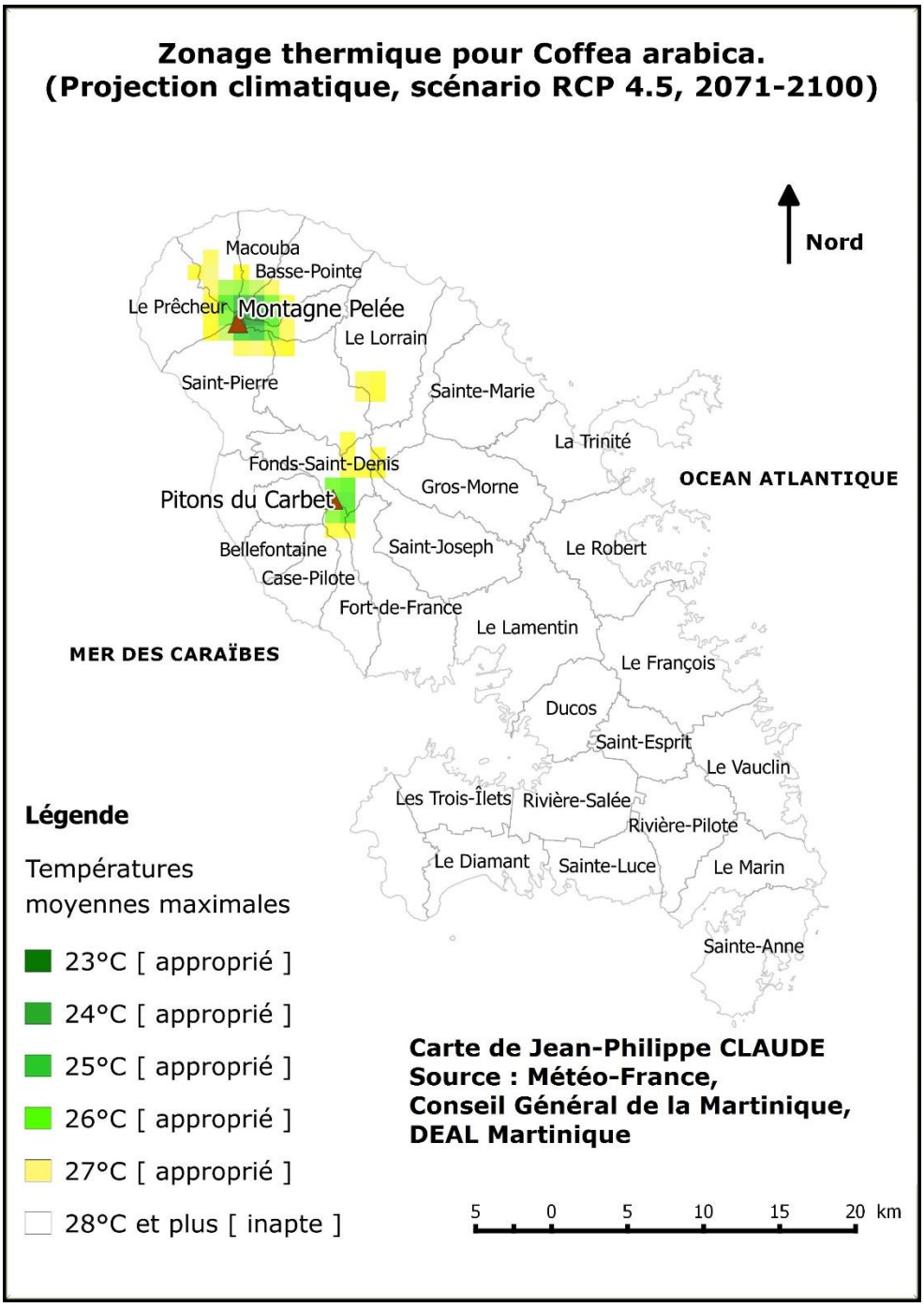
Carte 24



Toutefois, il serait peut-être là encore envisageable de faire abstraction des précipitations, par des techniques de drainage. En effet ce sont les précipitations qui ne permettent pas de trouver des milieux propices, car là où les températures sont acceptables pour le café les précipitations y sont trop importantes.

On peut quand même retenir cette carte ci-dessous pour 2071-2100, permettant de visualiser les zones qui seraient propices pour le café que du point de vue des températures maximales acceptables, mais qui correspondent aux plus hauts sommets de l'île qui sont classés « aires protégées ».

Carte 25



CONCLUSION

Finalement cette étude qui devait conduire à un zonage pour la relance de la culture du café en Martinique a pu être menée, malgré certaines difficultés à recueillir d'une part des données éco-climatiques mais en plus d'avoir les bonnes données utilisables dans un SIG. Il avait déjà été mis en avant dans le bilan de la recherche que ce type d'étude à des limites, notamment celui de l'approximation et du manque de précision.

En effet l'étude qui a été menée rentre dans le cadre de la macro-écologie, donc à des échelles trop importantes qui ne puissent considérer les microclimats. Ainsi, s'il existe même moins d'un hectare, des parcelles qui regrouperaient à la fois de bonnes températures, des précipitations adaptées et de bons types de sols, ainsi que d'autres facteurs éco-climatiques telle qu'une exposition au vent adaptée..., la réalisation de cartes à l'échelle régionale ne peut pas en tenir compte forcément. Dans le cas de la macro-écologie, la précision est directement fonction du type de données utilisées, de leurs précisions et du maillage utilisé pour couvrir l'ensemble du territoire.

Néanmoins les points positifs que l'on peut tirer de cette présente étude sont :

- que cette étude a pu se baser sur des données réalisées directement par des professionnels du domaine, avec par exemple Météo France pour les données climatiques, et l'IRD pour les sols ;
- la méthode utilisée pour le zonage, s'inspire des méthodologies définies dans le monde pour effectuer le zonage d'une culture ;
- de plus, l'étude s'appuie strictement sur les exigences éco-climatiques définies dans le monde pour la culture du café ;
- et s'est réalisée à l'aide des SIG et de l'option « calculatrice raster » pour effectuer le zonage de manière informatique à partir de plusieurs données.

Puis les données manquantes et qui ont fait défaut à cette étude et que l'on peut identifier sont :

- les températures moyennes annuelles sur la période trentenaire choisie, mais il a été utilisé les températures moyennes minimales et maximales qui tout de même permettent de caractériser complètement les zones en analysant les extrêmes ;
- puis concernant les sols, des cartes plus précises encore que la simple dénomination des sols, auraient été souhaitables, mais néanmoins certaines données resteraient à vérifier sur place telles que la profondeur où le pH.

Globalement du point de vue des résultats de l'étude on peut en tirer plusieurs conclusions, même si un ensemble de problématiques a été soulevé et des réponses devront y être apportées.

Premièrement si l'on s'en tient aux exigences éco-climatiques puis strictement aux exigences pédoclimatiques du café arabica pour sa bonne croissance et une bonne production (16° à 25°C, et à partir de 1200 mm d'eau annuel avec un optimum à 1800-2200 mm d'eau…), au regard

des conditions environnementales de la Martinique, il n'y a pas de milieux propices à la culture du café. Et même si l'on sait que l'espèce peut vivre à des températures pouvant dépasser ses limites définies (<16°C, et aux environs des 30°C), il est vite expliqué dans la littérature que l'espèce n'y est pas dans les meilleures conditions même pour sa croissance végétative, au-delà de toutes considérations productivistes.

Ainsi s'il existe dans le Nord de l'île des températures acceptables et des sols acceptables, le fort gradient pluviométrique peut jouer en défaveur de la production, mais l'on sait qu'avec les progrès en agriculture notamment avec les drainages, il n'est pas impossible de planter du café. Quoiqu'il en soit ceci fragilise cette volonté forte de vouloir relancer une culture dont les enjeux sont importants pour le développement économique de l'île.

Deuxièmement, une question s'est imposée à partir de ce zonage pédoclimatique et des potentialités pour le café arabica, à savoir : comment expliquer le peu de potentialités pour cette culture de nos jours, qui (les sources historiques sont unanimes) a bien été plantée un peu partout en Martinique il y a plusieurs siècles et durant une période importante dans l'histoire de l'île, dont le « café de Martinique » a été reconnu mondialement. De plus sur le nombre important de pieds de café typica qui a été dénombrés par les sources historiques pour le XVIIIème siècle, il ne resterait que quelques-uns certifiés Typica (que l'on peut compter sur les doigts d'une main) retrouvés çà et là chez des particuliers.

Il ne s'agit que de multiples questionnements, dont les réponses devront être apportées par une recherche plus poussée dans les sources historiques de la Martinique et par des recherches sur les microclimats et en écologie.

Toutefois, maintenant concernant les zones propices retenues pour relancer le café de nos jours, en supprimant les restrictions pluviométriques, il est possible d'aller sur le terrain et de vérifier maintenant quelles sont les parcelles déjà considérées comme propices, selon les températures et les sols, et qui présentent en plus d'autres facteurs favorables : exposition au vent faible, couverture nuageuse adaptée, pentes douces, mais aussi pour les sols il faut vérifier la profondeur et le pH.

Enfin troisièmement, cette étude a démontré aussi, en se basant sur un seul modèle de projection climatique ; (à cause d'une contrainte de temps pour la présentation des résultats), mais d'autres modèles sont aussi possibles pour comparaison ; que relancer la culture du café typica de nos jours n'est pas sans contraintes du point de vue des zones adaptées, mais qu'en plus les projections climatiques y sont défavorables.

Il a été vérifié ce qui se démontre dans le monde, que les zones propices à la culture de l'arabica en général, feront l'objet de restrictions, de diminutions majeures en lien avec le réchauffement climatique. Au regard du fait que de nos jours, les milieux propices n'existent pas, selon l'ensemble des critères éco-climatiques acceptables (ici on parle de macro-écologie, et les microclimats ne sont pas pris en compte, ce qui pourrait changer les conclusions), pour les projections climatiques de Météo France, à l'horizon 2071-2100 il y aura encore moins de probabilités d'avoir des zones propices.

Le projet de relance de cette culture semble donc très compromis.

A la suite de ces premiers résultats, et de cette étude menée dans le cadre de la fin du MASTER 2 de Géographie (orienté sur la Biogéographie, l'Ecologie et la Botanique appliquée), il est maintenant possible d'aller plus loin dans le cadre d'une thèse par exemple et de définir d'ores et déjà plusieurs objectifs.

Premièrement étant donné que les milieux propices retenus dans cette première étude font l'objet de trop fortes pluviométries, et que d'autres facteurs écologiques doivent être vérifiés vis-à-vis des exigences de l'espèce, il faut ainsi continuer le zonage. Il s'agit d'aller vérifier les autres facteurs écologiques afin de réaliser de nouvelles cartographies avec cette fois les zones qui ne seraient vraiment propices qu'au vue de tous les facteurs possibles.

Et tout en recherchant des techniques agricoles innovantes qui pourraient pallier au surplus des précipitations ou aux autres contraintes que l'on pourrait rencontrer pour les autres facteurs écologiques.

Puis deuxièmement, vis-à-vis de cette problématique liée à l'histoire, il faudra réaliser plusieurs zonages pour toutes les autres espèces de café qui ont été introduites sur l'île, afin de révéler la où les espèces qui auraient été les plus produites sur l'île en majorité pour faire du café martiniquais. Mais des recherches plus approfondies dans les sources historiques, les archives seront nécessaires.

Enfin troisièmement, il serait intéressant, au vue du réchauffement climatique de trouver et proposer des solutions pour cultiver le café, même si pour cette espèce arabica il semble qu'il faudra se diriger vers la culture de manière artificielle... De plus il serait intéressant d'analyser les effets qu'aura le changement climatique mais cette fois-ci sur toutes les autres espèces de café présentes sur l'île. Cela permettrait de mettre en avant ce paradoxe où les zones propices à l'arabica diminuent, mais peut-être que pour les autres les zones propices augmentent.

Quoiqu'il en soit ce travail sur le café en Martinique n'est pas encore terminé et un voile doit être levé sur bien d'autres questions encore, démontrant le côté passionnant de ce sujet.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Jeanguyot, M., Séguier-Guis, M., & Duris, D. (2003). « *Terres de café.* » Editions Quae.

2. Costentin J., Pierre Delaveau (2010). *« Café, thé, chocolat: les bienfaits pour le cerveau et pour le corps. »* Odile Jacob.

3. Dulcire, M. (2005). *« Une culture patrimoniale du mythe à la renaissance, le café "bonifieur" de Guadeloupe. » Anthropology of food*, (4).

4. G.-E Coubard d'Aulnay (1832). *« Monographie du café, ou Manuel de l'amateur de café. »* Paris, Chez Delaunay, au Palais Royal. Source gallica.bnf.fr / Bibliothèque nationale de France

5. Wagner, R. (2003). « *Historía del café de Guatemala*. » Villegas Asociados.

6. Louis Du Bois, 1855. *« Notice sur le chevalier De Clieu et bibliographie du café. »* Caen : Librairie normande de E. Le Gost-clérisse, 26 rue écuyère- 17p. ; 22 cm.- (Bibliographie normande).

7. Fournet J., 2002. *« Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de Martinique. »* (Nouvelle ed.). Montpellier, Trinité (Martinique): CIRAD, Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement Gondwana éd.

8. Steiger, D., Nagai, C., Moore, P., Morden, C., Osgood, R., & Ming, R. (2002). *« AFLP analysis of genetic diversity within and among Coffea arabica cultivars. »Theoretical and applied genetics*, *105*(2-3), 209-215.

9. Anthony, F., Bertrand, B., Quiros, O., Wilches, A., Lashermes, P., Berthaud, J., & Charrier, A. (2001). *« Genetic diversity of wild coffee (Coffea arabica L.) using molecular markers. » Euphytica*, *118*(1), 53-65.

10. Etienne, H., Anthony, F., Dussert, S., Fernandez, D., Lashermes, P., & Bertrand, B. (2002). *« Biotechnological applications for the improvement of coffee (Coffea arabica L.). » In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*,*38*(2), 129-138.

11. Razafinarivo, N. J., Guyot, R., Davis, A. P., Couturon, E., Hamon, S., Crouzillat, D., ... & Hamon, P. (2013). *« Genetic structure and diversity of coffee (Coffea) across Africa and the Indian Ocean islands revealed using microsatellites. » Annals of botany*, *111*(2), 229-248.

12. Anthony, F., Combes, M. C., Astorga, C., Bertrand, B., Graziosi, G., & Lashermes, P. (2002). *« The origin of cultivated Coffea arabica L. varieties revealed by AFLP and SSR markers. » Theoretical and Applied Genetics*, *104*(5), 894-900.

13. Mondego, J. M., Vidal, R. O., Carazzolle, M. F., Tokuda, E. K., Parizzi, L. P., Costa, G. G., ... & Pereira, G. A. (2011). *« An EST-based analysis identifies new genes and reveals distinctive gene expression features of Coffea arabica and Coffea canephora. » BMC plant biology*, *11*(1), 30.

14. Dedecca, D. M. (1957). *« Anatomia e desenvolvimento ontogenético de Coffea arabica L. var. typica Cramer. » Bragantia*, *16*(23), 315-366.

15. Bertrand, B., Montagnon, C., Georget, F., Charmetant, P., & Etienne, H. (2012). *« Création et diffusion de variétés de caféiers Arabica: quelles innovations variétales ? » Cahiers Agricultures*, *21*(2), 77-88.

16. Bertrand, B., Alpizar, E., Lara, L., SantaCreo, R., Hidalgo, M., Quijano, J. M., ... & Etienne, H. (2011). *« Performance of Coffea arabica F1 hybrids in agroforestry and full-sun cropping systems in comparison with American pure line cultivars. » Euphytica*, *181*(2), 147-158.

17. Lecolier, A. (2010). *« Caractérisation de certains impacts de la mutation Laurina chez Coffea arabica L. aux niveaux histo-morphologique et moléculaire. »*(Doctoral dissertation, Université de la Réunion).

18. Krug, C. A. (1949). *« Mutações em Coffea arabica. L. » Bragantia*, *9*, 1-10.

19. Medina, D. M. (1965). *« NOVAS OBSERVAÇÕES CITOLÓGICAS NO ENDOSPERMA DE CAFÉ.* » *Bragantia*, *24*(29).

20. Vidal, R. O., Mondego, J. M. C., Pot, D., Ambrósio, A. B., Andrade, A. C., Pereira, L. F. P., ... & Pereira, G. A. G. (2010). *« A high-throughput data mining of single nucleotide polymorphisms in Coffea species expressed sequence tags suggests differential homeologous gene expression in the allotetraploid Coffea arabica. » Plant physiology*, *154*(3), 1053-1066.

21. Mendes, A. J. T. (1941). *« Cytological observations in Coffea. VI. Embryo and endosperm development in Coffea arabica L. » American Journal of Botany*, 784-789.

22. Charrier, A., & Berthaud, J. (1975). *« Variation de la teneur en caféine dans le genre Coffea. » Café Cacao Thé*, *19*(4), 251-564.

23. Kalberer P., (1965). *« Breakdown of Caffeine in the Leaves of Coffea arabica L. »* Nature 205, 597-598 doi:10.1038/205597a0

24. Mahé, L. (2007). *« Contribution à l'amélioration génétique de la résistance des caféiers (Coffea arabica L.) à la rouille (Hemileia vastatrix): De l'étude des hybrides interspécifiques naturels de Nouvelle-Calédonie à la cartographie d'un locus de résistance »* (Doctoral dissertation, Montpellier, ENSA).

25. Hue T. T. M. (2005). *«Genetic variation in cultivated coffee (Coffea arabica L.) accessions in northern New South Wales, Australia. »* (Doctoral dissertation, MSc. Thesis, Southern Cross University).

26. Leroy, T., Ribeyre, F., Bertrand, B., Charmetant, P., Dufour, M., Montagnon, C., ... & Pot, D. (2006). *« Genetics of coffee quality. » Brazilian Journal of Plant Physiology*, *18*(1), 229-242.

27. Le Pierrès, D. (1999). *« Etude des hybrides naturels entre Coffea arabica et C. canephora de Nouvelle-Calédonie. »* Nouméa, Nouvelle-Calédonie: IRD. mai 1999. 44 p.

28. Antunes Filho, H., & Carvalho, A. (1957). *« Genetics of Coffea XVI: The variety typica as a standard for genetical studies of Coffea arabica. » J. Her*, *48*, 110-117.

29. Noirot, M., Poncet, V., Barre, P., Hamon, P., Hamon, S., & De Kochko, A. (2003). *« Genome size variations in diploid African Coffea species. » Annals of botany*, *92*(5), 709-714.

30. Maurin, O., Davis, A. P., Chester, M., Mvungi, E. F., Jaufeerally-Fakim, Y., & Fay, M. F. (2007). *« Towards a phylogeny for Coffea (Rubiaceae): identifying well-supported lineages based on nuclear and plastid DNA sequences. » Annals of Botany*, *100*(7), 1565-1583.

31. Geletu, K. T. (2006). *« Genetic diversity of wild Coffea arabica populations in Ethiopia as a contribution to conservation and use planning (No. 44).* » Cuvillier Verlag.

32. Tesfahun, A. S. (2009). *Genetic diversity and genome introgression in coffee*(Doctoral dissertation, Universidade Federal de Viçosa).

33. Aerts, R., Berecha, G., Gijbels, P., Hundera, K., Glabeke, S., Vandepitte, K., ... & Honnay, O. (2013). *« Genetic variation and risks of introgression in the wild Coffea arabica gene pool in south-western Ethiopian montane rainforests. » Evolutionary applications*, *6*(2), 243-252.

34. ARTERO A.S. (2006). *« Caracterização citomolecular da espécie Coffea arabica L., variedade typica.Cramer e cultivar Mundo Novo. »* 61f. Dissertação (Mestrado em Melhoramento Genético Vegetal) –Pós-Graduação – IAC.

35. MEKONEN HAILEMICHAEL SALLA, (2009). *«Influence of genotype, location and processing methods on the quality of coffee (Coffea arabica L.). »* HAWASSA UNIVERSITY, ETHIOPIA, DEPARTEMENT OF PLANT SCIENCES.

36. Golea, Tadesse Woldemariam, Demel, T., Denich, M., & Bosch, T. (2001). *«Diversity of traditional coffee production systems in Ethiopia and their contribution to the conservation of coffee genetic diversity. »* In Proceedings of the Conference on International Agricultural Research for Development, Deutscher Tropentag-Bonn, Bonn (pp. 1-11).

37. Carvalho A., Medina Filho, H. P., Fazuoli, L. C., Fiiho, O. G., & Lima, M. M. A. (1991). *« Aspectos genéticos do cafeeiro (Genetics Aspects of the Coffee tree). »* Rev.

Brasil.genet. 14,1, 135-183. Section génétique, Institut agronomique de Campinas (IAC), Brésil

38. Hein, L., & Gatzweiler, F. (2006). *« The economic value of coffee (Coffea arabica) genetic resources. » Ecological Economics*, *60*(1), 176-185.

39. Eira, M. T., Silva, E. A., De Castro, R. D., Dussert, S., Walters, C., Bewley, J. D., & Hilhorst, H. W. (2006). *« Coffee seed physiology. » Brazilian Journal of Plant Physiology*, *18*(1), 149-163.

40. Jesus, A. M. S., Carvalho, S. P., Castro, E. M., & Gomes, C. N. (2010). « Observações anatômicas em plantas de Coffea arabica L. obtidas por enraizamento de estacas. » *Revista Ceres*, *57*(2), 175-180.

41. Clarindo, W. R., & Carvalho, C. R. (2008). *« First Coffea arabica karyogram showing that this species is a true allotetraploid. » Plant Systematics and Evolution*, *274*(3-4), 237-241.

42. Morais, H., Caramori, P. H., Koguishi, M. S., & Ribeiro, A. M. D. A. (2008). *« Escala fenológica detalhada da fase reprodutiva de Coffea arabica. » Bragantia*,*67*(1), 257-260.

43. Meyer, F. G. (1965). *« Notes on wild Coffea arabica from southwestern Ethiopia, with some historical considerations. » Economic Botany*, *19*(2), 136-151.

44. Teressa, A., Crouzillat, D., Petiard, V., & Brouhan, P. (2010). *« Genetic diversity of Arabica coffee (Coffea arabica L.) collections. » EJAST*, *1*(1), 63-79.

45. Shimekit Tadele, Firew Mekbib, Kassahun Tesfaye, (2014). *« Genetic Diversity of Coffee (Coffea arabica L.) Landraces from Southern Ethiopia as Revealed by Inter Simple Sequence Repeat Marker. »* Global Advanced Research Journal of Agricultural Science (ISSN: 2315-5094) Vol. 3(1) pp. 024-034, January, 2014.

46. Santana-Buzzy, N., Rojas-Herrera, R., Galaz-Ávalos, R. M., Ku-Cauich, J. R., Mijangos-Cortés, J., Gutiérrez-Pacheco, L. C., ... & Loyola-Vargas, V. M. (2007). *« Advances in coffee tissue culture and its practical applications. » In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*, *43*(6), 507-520.

47. Aguilar, P., Ribeyre, F., Escarramán, A., Bastide, P., & Berthiot, L. (2012). *« Sensory profiles of coffee in the Dominican Republic are linked to the terroirs. » Cahiers Agricultures*, *21*(2), 169-178.

48. Gutiérrez, G., León, J., Montoya, L. A., & Pérez, J. (1968). *« Pruebas de rendimiento de nuevas introduciones de café en Costa Rica, 1962-1967. » Café, Lima (IICA)*, *9*(2), 12-18.

49. Puerta, G. I. (1998). *« Calidad en taza de las variedades de Coffea arabica L. cultivadas en Colombia. »* Centre de recherche nationale du café, Cenicafé. Chinchiná, Colombie

50. Bertrand, B., Etienne, H., Cilas, C., Charrier, A., & Baradat, P. (2005). « Coffea arabica hybrid performance for yield, fertility and bean weight. » *Euphytica*, *141*(3), 255-262.

51. Pinard, F. (2008). *« Sur les chemins des caféiers. » Etudes rurales*, (2), 15-34.

52. Bart, F. (2008). *« Café des montagnes, café des plaines. » Etudes rurales*, (2), 35-48.

53. Sylvain, P. G. (1958). *« Ethiopian coffee—its significance to world coffee problems. » Economic botany*, *12*(2), 111-139.

54. Jaramillo-Botero, C., Santos, R. H. S., Martinez, H. E. P., Cecon, P. R., & Fardin, M. P. (2010). *« Production and vegetative growth of coffee trees under fertilization and shade levels. » Scientia Agricola*, *67*(6), 639-645.

55. Tulet, J. C. (1998). *« Le «meilleur café du monde». » Caravelle (1988-)*, 75-92.

56. Lamah, D. (2013). *« L'insertion de la caféiculture dans les structures de production en Guinée forestière »* (Doctoral dissertation, Université Toulouse le Mirail-Toulouse II).

57. Urquhart, D. H., & Sarlin, P. (1953). *« La culture du Caféier en Nouvelle-Calédonie. » Revue internationale de botanique appliquée et d'agriculture tropicale*, *33*(367-368), 202-215.

58. Bizimana, J. P. & Harorimana, D.(2007). *« Le café et les caféiculteurs au Rwanda: cas du district de Maraba,(Butare) dans la province du sud. »* Editions Publibook.

59. Rutunga, V., KavamahangaT, F., & Nsengimana, C. (1994). *« Synthèse des résultats de recherche sur I'agronomie du caféier arabica (Coffea arabica L.) au Rwanda. » DGGI*, 130.

60. Gomez, C. (2009). *« Etude de l'hybridation inter-spécifique entre espèces du genre Coffea en Nouvelle-Calédonie: distribution des niches favorables et structuration de la diversité.»* UNIVERSITE de la NOUVELLE-CALEDONIE, Ecole Doctorale du Pacifique, Milieux Insulaires Ultra-Marins ED-469 ; Doctorat BIOLOGIE DES POPULATIONS.

61. Pohlan, H. A. J., & Janssens, M. J. (2012). *« Growth and production of coffee. » Soil, Plant Growth Crop Produc*, *3*, 1-11.

62. Barel, M. (2008). *« Café: de la cerise à la tasse. »* Ed. Techniques Ingénieur.

63. Bote, A. D., & Struik, P. C. (2011). *« Effects of shade on growth, production and quality of coffee (Coffea arabica) in Ethiopia. » Journal of Horticulture and Forestry*, *3*(11), 336-341.

64. Elzebroek, A. T. G. (2008). *« Guide to cultivated plants. »* Wageningen University Netherlands. Botany, Economic-Handbooks, manuals ; CABI international 2008

65. Van Oijen, M., Dauzat, J., Harmand, J. M., Lawson, G., & Vaast, P. (2010). *« Coffee agroforestry systems in Central America: I. A review of quantitative information on physiological and ecological processes. » Agroforestry systems*, *80*(3), 341-359.

66. de Brito Ferreira, E. P., Partelli, F. L., Didonet, A. D., Marra, G. E. R., & Braun, H. (2013). *« Crescimento vegetativo de Coffea arabica L. influenciado por irrigação e fatores climáticos no Cerrado Goiano. » Semina: Ciências Agrárias*, *34*(6Supl1), 3235-3244.

67. DaMatta, F. M., Ronchi, C. P., Maestri, M., & Barros, R. S. (2007). *« Ecophysiology of coffee growth and production. » Brazilian Journal of Plant Physiology*, *19*(4), 485-510.

68. DaMatta, F. M. (2007). *« Ecophysiology of tropical tree crops: an introduction. » Brazilian Journal of Plant Physiology*, *19*(4), 239-244.

69. Alvim, P. D. T., & Kozlowski, T. T. (Eds.). (2013). *« Ecophysiology of tropical crops. »* Elsevier.

70. Viani, R. (2004). « *Espresso coffee: the science of quality*. » Elsevier.

71. Chemura, A. (2014). *« The growth response of coffee (Coffea arabica L) plants to organic manure, inorganic fertilizers and integrated soil fertility management under different irrigation water supply levels. » International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, *3*(2), 1-9.

72. Baliza, D. P., Caixeta, F., Pinho, É. V. D. R. V., Cunha, R. L. D., Martins, D. C., & Rosa, S. D. V. F. D. (2012). *« Physiological quality of coffee seeds produced under different levels of solar radiation and maturation stages. » Revista Brasileira de Sementes*, *34*(3), 416-423.

73. Bermudez, E. S. (1954). *« Distribución del sistema radicular del Coffea arabica L. var. typica en cinco tipos de suelo. » Turrialba, Costa Rica, Insttiuto Interamericano de Ciências Agrícolas*.

74. Carvajal-Castro, J. F. (1960). *« Estudio de las deficiencias de nitrógeno, potasio, magnesio, boro y manganeso, en plantas de café (Coffea arabica var. typica). » Revista de Biología Tropical.*, *8*(2), 165-179.

75. Vasquez Yaguas, E. F. (1979). *« Análisis del nivel tecnológico empleado en la producción de café (Coffea arabica L.) según tamaño de explotación agrícola, en el municipio de San Francisco Zapotitlán, Suchitepéquez. »*

76. Maldonado-Martínez, R., Rodríguez-Ortiz, G., Enríquez-del Valle, J. R., Carrillo-Rodríguez, J. C., & Pérez-León, M. I. (2014). « EFECTO DE LA COBERTURA ARBÓREA EN SISTEMAS DE CAFÉ ORGÁNICO EN EL SUR DE OAXACA. »

Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca. Ex Hacienda de Nazareno, Xoxocotlán, Oaxaca. C. P. 71230. Revista Mexicana de Agroecosistemas Vol. 1(1): 12-19.

77. Mancilla Díaz, G. E. (2013). *« Aplicación del sombrío del cafeto (Coffea arabica) en Colombia. » Conexión Agropecuaria JDC*, *2*(1), 37-48.

78. Hardy, M. (2014). *« Le monde du café à la Martinique du début du XVIIIe siècle aux années 1860 » (*Doctoral dissertation, Antilles-Guyane).

79. Petek, M. R., Sera, T., & FONSECA, I. D. B. (2009). *« Exigências climáticas para o desenvolvimento e maturação dos frutos de cultivares de Coffea arábica. » Bragantia*, *68*(1), 169-181.

80. de Carvalho Alves, M., da Silva, F. M., Sanches, L., de Carvalho, L. G., Araújo, G., & Ferraz, S. (2013). *« Geospatial analysis of ecological vulnerability of coffee agroecosystems in Brazil. » Applied Geomatics*, *5*(2), 87-97.

81. Wollmann, C. A., & Galvani, E. (2013). *« Zoneamento agroclimático: linhas de pesquisa e caracterização teórica-conceitual. » Revista Sociedade & Natureza, Uberlândia*, *25*(1).

82. de Medeiros, R. M., de Azevedo, P. V., Saboya, L. M. F., & Francisco, P. R. M. (2013). *« Classificação climática e zoneamento agroclimático Para o município de Amarante–PI-DOI: 10.7127/rbai. v7n200011. » REVISTA BRASILEIRA DE AGRICULTURA IRRIGADA-RBAI*, *7*(2), 170-180.

83. Nunes, E. L., Amorim, R. C. F. D., Souza, W. G. D., Ribeiro, A., Senna, M. C. A., & Leal, B. G. (2007). *« Zoneamento agroclimático da cultura do café para a bacia do Rio Doce. » Revista Brasileira de Meteorologia*, *22*(3), 297-302.

84. Andrade, G. A., da Silva Ricce, W., Caramori, P. H., Zaro, G. C., & de Conti Medina, C. (2012). *« Zoneamento agroclimático de café robusta no Estado do Paraná e impactos das mudanças climáticas. » Semina: Ciências Agrárias*, *33*(4), 1381-1390.

85. Santos, M. A. D., & Camargo, M. B. P. D. (2006). *« Calibration of an agrometeorological model for predicting coffee (Coffea arabica L.) productivity in Sao Paulo state, Brazil. » Bragantia*, *65*(1), 173-183.

86. Evangelista, A. W., Carvalho, L. D., & Sediyama, G. C. (2002). *« Zoneamento climático associado ao potencial produtivo da cultura do café no Estado de Minas Gerais. » Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, *6*(3), 445-452.

87. Meireles, E., Volpato, M., Alves, H., & Vieira, T. (2007). *« Zoneamento agroclimático: Um estudo de caso para o café. » Informe Agropecuário, Belo Horizonte*, *28*(241), 50-57.

88. ROSA, V. (2007). *« Modelo agrometeorológico-espectral para monitoramento e estimativa da produtividade do café na Região Sul/Sudoeste do Estado de Minas*

Gerais. Modelo agrometeorológico-espectral para monitoramento e estimativa da produtividade do café na Região Sul/Sudoeste do Estado de Minas Gerais. »

89. Barros, M. A., Moreira, M. A., & Rudorff, B. F. T. (2006). *« Geotecnologias como contribuição ao estudo do Agroecossistema cafeeiro de Minas Gerais em nível municipal. »*

90. Zullo Jr, J., Pinto, H. S., Assad, E. D., & de Ávila, A. M. H. (2011). *« Potential for growing Arabica coffee in the extreme south of Brazil in a warmer world. » Climatic change*, *109*(3-4), 535-548.

91. Soto F., A. Vantour, A. Hernández, A. Planas, Alicia Figueroa, Paula O. Fuentes, Tamara Tejeda, Marisol Morales, R. Vázquez, Elisa Zamora, Hilda M. Alfonso, L. Vázquez y P. Caro. (2001). *« LA ZONIFICACIÓN AGROECOLÓGICA DEL Coffea arabica L. EN CUBA. MACIZO MONTAÑOSO SAGUANIPE-BARACOA. »* Cultivos Tropicales, vol. 22, núm. 3, pp. 27-51. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, La Habana, Cuba

92. Soto, F. et al. (2001). *« METODOLOGÍA PARA LA ZONIFICACIÓN AGROECOLÓGICA DEL Coffea arabica L. EN CUBA. »* Cultivos Tropicales, vol. 22, núm. 4, 2001, pp. 51-53 Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas La Habana, Cuba

93. Soto F., A. Vantour, A. Hernández, A. Planas, Alicia Figueroa, Paula O. Fuentes, Tamara Tejeda, Marisol Morales, R. Vázquez, Elisa Zamora, F. Cutié, L. Vázquez y P. Caro; 2002. *« La zonificación agroecológica del Coffea arabica L. en Cuba. Macizos montañosos Sierra Maestra y Guamuhaya. » Cultivos Tropicales*, *23*(1), 35-44.

94. Soto F., et al. (2007). *« ZONIFICACIÓN AGROECOLÓGICA DE LA CORDILLERA DE GUANIGUANICO. »* Cultivos Tropicales, vol. 28, num 1, pp 41-55 ; Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas Cuba

95. Suárez Venero, G. M. (2014). *« Apuntes sobre la zonificación agroecológica de los cultivos. Particularidades en Cuba. » Cultivos Tropicales*, *35*(4), 36-44.

96. García López J. C., Posada-Suárez, H., & Läderach, P. (2014). *« Recommendations for the regionalizing of coffee cultivation in Colombia: a methodological proposal based on agro-climatic indices.»* PloS one, Vol.9(12), pp.e113510

97. Rojas, O. E. (1987). *« Zonificación agroecológica para el cultivo de café (Coffea arabica) en Costa Rica. »* IIca (Instituto Interamaricano De Cooperacion Para La Agricultura).

98. Pérez-Portilla, E., & Geissert-Kientz, D. (2006). *« Zonificación agroecológica de sistemas agroforestales: El caso café (Coffea arabica L.)-palma camedor (Chamaedorea elegans Mart.). » Interciencia*, *31*(8), 556-562.

99. Santos, L. D. P., & Hernández, J. E. S. *« Elaboración de un SIG orientado a la zonificación agroecológica de los cultivos. »* Revista INGENIERÍA AGRÍCOLA,

ISSN-2326-1545, RNPS-0622, Vol. 4, No. 3 (julio-agosto-septiembre), pp. 28-32, 2014

100. Youkhana, A., & Idol, T. (2011). *« Addition of Leucaena-KX2 mulch in a shaded coffee agroforestry system increases both stable and labile soil C fractions. » Soil Biology and Biochemistry*, *43*(5), 961-966.

101. Charbonnier, F. (2013). *« Mesure et modélisation des bilans de lumière, d'eau, de carbone et de productivité primaire nette dans un système agroforestier à base de caféier au Costa Rica »* (Doctoral dissertation, Université de Lorraine).

102. Charbonnier, F., le Maire, G., Dreyer, E., Casanoves, F., Christina, M., Dauzat, J., ... & Roupsard, O. (2013). *« Competition for light in heterogeneous canopies: Application of MAESTRA to a coffee (Coffea arabica L.) agroforestry system. » Agricultural and Forest Meteorology*, *181*, 152-169.

103. Rice, R. A. (2008). *« Agricultural intensification within agroforestry: the case of coffee and wood products. » Agriculture, ecosystems & environment*, *128*(4), 212-218.

104. Ricci, M. D. S. F., Rouws, J. R. C., Oliveira, N. G. D., & Rodrigues, M. B. (2011). *« Vegetative and productive aspects of organically grown coffee cultivars under shaded and unshaded systems. » Scientia Agricola*, *68*(4), 424-430.

105. Bedimo, J. M., Njiayouom, I., Bieysse, D., Nkeng, M. N., Cilas, C., & Nottéghem, J. L. (2008). *« Effect of shade on Arabica coffee berry disease development: toward an agroforestry system to reduce disease impact. » Phytopathology*, *98*(12), 1320-1325.

106. Righi, C. A., Bernardes, M. S., Lunz, A. M. P., Pereira, C. R., Dourado Neto, D., & Favarin, J. L. (2007). *« Measurement and simulation of solar radiation availability in relation to the growth of coffee plants in an agroforestry system with rubber trees. » Revista Árvore*, *31*(2), 195-207.

107. Matos, E. D. S., Mendonça, E. D. S., Cardoso, I. M., Lima, P. C. D., & Freese, D. (2011). *« Decomposition and nutrient release of leguminous plants in coffee agroforestry systems. » Revista Brasileira de Ciência do Solo*, *35*(1), 141-149.

108. Campanha, M. M., Santos, R. H. S., De Freitas, G. B., Martinez, H. E. P., Garcia, S. L. R., & Finger, F. L. (2004). *« Growth and yield of coffee plants in agroforestry and monoculture systems in Minas Gerais, Brazil. » Agroforestry Systems*, *63*(1), 75-82.

109. Lin, B. B. (2010). *« The role of agroforestry in reducing water loss through soil evaporation and crop transpiration in coffee agroecosystems. » Agricultural and Forest Meteorology*, *150*(4), 510-518.

110. Geromel, C., Ferreira, L. P., Davrieux, F., Guyot, B., Ribeyre, F., dos Santos Scholz, M. B., ... & Marraccini, P. (2008). *« Effects of shade on the development and sugar metabolism of coffee (Coffea arabica L.) fruits. » Plant Physiology and Biochemistry*, *46*(5), 569-579.

111. Caramori, P. H., Androcioli Filho, A., & Leal, A. C. (1996). *« Coffee shade with Mimosa scabrella Benth. for frost protection in southern Brazil. » Agroforestry systems*, *33*(3), 205-214.

112. VALENTINI, L. S. D. P., & de Camargo, M. B. P. (2010). *« Temperatura do ar em sistemas de produção de café arábica em monocultivo e arborizados com seringueira e coqueiro-anão na região de Mococa, SP./Air temperature in unshaded arabic coffee systems and arborized with rubber tree and dwarf coconut palm at Mococa region, state of São Paulo, Brazil.»* Bragantia, Vol.69(4), p.1005-1010.

113. Morais, H., Marur, C. J., Caramori, P. H., Ribeiro, A. D. A., & Gomes, J. C. (2003). *« Características fisiológicas e de crescimento de cafeeiro sombreado com guandu e cultivado a pleno sol. » Pesquisa Agropecuária Brasileira*, *38*(10), 1131-1137.

114. Barbosa, J. P. R. A. D., Soares, A. M., Alvarenga, M. I. N., Alves, J. D., & Gardin, J. P. P. (2005). *« Crescimento de cafeeiros (Coffea arabica L.) associado à deposição no solo da fitomassa de leguminosas arbóreas no Sul de Minas Gerais.* »

115. Solórzano, N., & Querales, D. (2010). *« Crecimiento y desarrollo del café (Coffea arabica) bajo la sombra de cinco especies arbóreas. » Revista Forestal Latinoamericana*, *25*(1), 61-80.

116. Montagnini, F., (2012). *« Los sistemas agroforestales y su contribución para la mitigación y adaptación al cambio climático.»* New Haven, Universidad de Yale, Escuela de Estudios Forestales y Ambientales

117. Cornejo, A. Vinicio, M. (2012). *« Alternativas Agroecológicas para el manejo del café (coffea arabica). »*

118. Joseph Aubert Mouen Bedimo, Bernard P. Dufour, Christian Cilas, Jacques Avelino (2012). *«Effects of shade trees on Coffea Arabica pests and diseases. »* Cahier d'Agriculture, vol. 21, n8 2–3, mars-avril – mai-juin 2012

119. Manga, M. A., Akoa, A., Abolo, D., Mbang, A. A., Bedimo, J. M., Nomo, L. B., & Akume, N. D. (2014). *« Structure et composition floristiques des agroforêts à base de caféiers arabica (Coffea arabica L.) dans les hauts plateaux de l'Ouest du Cameroun. » International Journal of Biological and Chemical Sciences*, *7*(4), 1474-1489.

120. Kufa, T., Yilma, A., Shimber, T., Netsere, A., & Taye, E. (2007, September). *« Yield performance of Coffea arabica cultivars under different shade trees at Jimma Research Center, Southwest Ethiopia. »* In *Proceedings of the Second International Symposium on Multi-strata Agroforestry Systems with Perennial Crops*.

121. Cannavo, P., Sansoulet, J., Harmand, J. M., Siles, P., Dreyer, E., & Vaast, P. (2011). *« Agroforestry associating coffee and Inga densiflora results in complementarity for water uptake and decreases deep drainage in Costa Rica. » Agriculture, ecosystems & environment*, *140*(1), 1-13.

122. Van Oijen, M., Dauzat, J., Harmand, J. M., Lawson, G., & Vaast, P. (2010). *« Coffee agroforestry systems in Central America: II. Development of a simple process-based model and preliminary results. » Agroforestry systems*, *80*(3), 361-378.

123. Soto-Pinto, L., Villalvazo-López, V., Jiménez-Ferrer, G., Ramírez-Marcial, N., Montoya, G., & Sinclair, F. L. (2007). *« The role of local knowledge in determining shade composition of multistrata coffee systems in Chiapas, Mexico. » Biodiversity and conservation*, *16*(2), 419-436.

124. Schmitt-Harsh, M., Evans, T. P., Castellanos, E., & Randolph, J. C. (2012). *« Carbon stocks in coffee agroforests and mixed dry tropical forests in the western highlands of Guatemala. » Agroforestry systems*, *86*(2), 141-157.

125. Soto-Pinto, L., Perfecto, I., Castillo-Hernandez, J., & Caballero-Nieto, J. (2000). *« Shade effect on coffee production at the northern Tzeltal zone of the state of Chiapas, Mexico. » Agriculture, Ecosystems & Environment*, *80*(1), 61-69.

126. Siles, P., Harmand, J. M., & Vaast, P. (2010). *« Effects of Inga densiflora on the microclimate of coffee (Coffea arabica L.) and overall biomass under optimal growing conditions in Costa Rica. » Agroforestry Systems*, *78*(3), 269-286.

127. DaMatta, F., & Rodríguez, N. (2007). *« Producción sostenible de cafetales en sistemas agroforestales del Neotrópico: una visión agronómica y eco fisiológica. » Agronomía Colombiana*, *25*(1), 113-123.

128. Gouveia, M. M. C., Ribeiro, A., Várzea, V. M., & Rodrigues, C. J. (2005). *« Genetic diversity in Hemileia vastatrix based on RAPD markers. » Mycologia*, *97*(2), 396-404.

129. Avelino, J., Zelaya, H., Merlo, A., Pineda, A., Ordoñez, M., & Savary, S. (2006). *« The intensity of a coffee rust epidemic is dependent on production situations. » Ecological modelling*, *197*(3), 431-447.

130. Pellegrin, F., Kohler, F., & Nandris, D. (2000). *« Correlations Between Edaphic Factors and Coffea Arabica Fungal Pathogens in South Pacific. »* In *Coffee Biotechnology and Quality* (pp. 239-243). Springer Netherlands.

131. Anzueto, F., Bertrand, B., Sarah, J. L., Eskes, A. B., & Decazy, B. (2001). *« Resistance to Meloidogyne incognita in Ethiopian Coffea arabica accessions. » Euphytica*, *118*(1), 1-8.

132. Van der Vossen, H. A. M., Cook, R. T. A., & Murakaru, G. N. W. (1976). *« Breeding for resistance to coffee berry disease caused by Colletrotrichum coffeanumNoack (Sensu Hindorf) in Coffea arabica LI Methods of preselection for resistance. » Euphytica*, *25*(1), 733-745.

133. Jaramillo, J., Chabi-Olaye, A., Kamonjo, C., Jaramillo, A., Vega, F. E., Poehling, H. M., & Borgemeister, C. (2009). *« Thermal tolerance of the coffee berry borer Hypothenemus hampei: predictions of climate change impact on a tropical insect pest. » PLoS One*, *4*(8), e6487.

134. QU'ELLE, P. R. O. V. O. Q. U. E. (1993). Avelino J., Toledo JC, Medina B. 1993. *« Développement de la rouille orangée (Hemileia vastatrix) dans une plantation du sud ouest du Guatemala et évaluation des dégâts qu'elle provoque. »* In: Quinzième colloque scientifique international sur le café, Montpellier (France), 6-11 juin 1993. Paris: ASIC, p. 293-302.

135. Martinez, A., & CATIE, Turrialba (Costa Rica). Institut de Recherche pour le Développement, Montpellier (Francia). Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Toulouse (Francia). (2002). *« Etude du comportement du nematode Meloidogyne exigua chez des cafeiers (Coffea arabica L.) resistants et sensibles. »*

136. Musoli, C. P., Pinard, F., Charrier, A., Kangire, A., Ten Hoopen, G. M., Kabole, C., ... & Cilas, C. (2008). *« Spatial and temporal analysis of coffee wilt disease caused by Fusarium xylarioides in Coffea canephora. » European journal of plant pathology*, *122*(4), 451-460.

137. Nandris, D., Kohler, F., Monimeau, L., & Pellegrin, F. (1997). *« Lutte intégrée contre les ravageurs (IPM) et approche intégrée du pathosystème/Coffea arabica. »* In *COLLOQUE Scientifique International sur le Café, 17. Nairobi (Kenya), Juillet 20-25, 1997...*

138. Scalon, J. D., Freitas, G. A., Avelar, M. B. L., & Zacarias, M. S. (2011). *« Spatial distribution of the coffee-leaf-miner (Leucoptera coffeella) in an organic coffee (Coffea arabica L.) field in formation. » Coffee Science*, *6*(3), 226-232.

139. Cabos, R. Y. M., Sipes, B. S., Nagai, C., Serracin, M., & Schmitt, D. P. (2010). *« Evaluation of coffee genotypes for root-knot nematode resistance. » Nematropica*, *40*(2), 191-202.

140. Cristancho, M., & Escobar, C. (2008). *«Transferability of SSR markers from related Uredinales species to the coffee rust Hemileia vastatrix. » Genet Mol Res*, 2008, vol. 7, no 4, p. 1.

141. Miguel Angel Escalona Aguilar, 2002. *« Interaccion de plantas de café fertilizadas con fosforo e inoculadas con Hongos Micorrizico Arbusculares y Phoma costarricensis Echandi. »* Université de Colima, à Tecomán au Mexique, Faculté des sciences biologiques et agricoles.

142. Avelino, J., Bouvret, M. E., Salazar, L., & Cilas, C. (2009). *« Relationships between agro-ecological factors and population densities of Meloidogyne exigua and Pratylenchus coffeae sensu lato in coffee roots, in Costa Rica. » Applied soil ecology*, *43*(1), 95-105.

143. Bieysse, D., Manga, B., Bedimo, M., Ndeumeni, J., Roussel, V., FABRE, J., & Berry, D. (2002). *« L'anthracnose des baies une menace potentielle pour la culture mondiale de l'Arabica. » Plantations, recherche, développement*, 145-152.

144. Righi, C. A., Campoe, O. C., Bernardes, M. S., Lunz, A. M. P., Piedade, S. M. S., & Pereira, C. R. (2013). *« Influence of rubber trees on leaf-miner damage to coffee plants in an agroforestry system. » Agroforestry systems*, *87*(6), 1351-1362.

145. BONFIM, J. A., MATSUMOTO, S. N., LIMA, J. M., CÉSAR, F. R. C. F., & SANTOS, M. A. F. (2010). *« FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES (FMA) E ASPECTOS FISIOLÓGICOS EM CAFEEIROS CULTIVADOS EM SISTEMA AGROFLORESTAL E A PLENO SOL (). » Bragantia*, *69*(1), 201-206.

146. Belayneh Mulaw, T., Kubicek, C. P., & Druzhinina, I. S. (2010). *« The rhizosphere of Coffea arabica in its native highland forests of Ethiopia provides a niche for a distinguished diversity of Trichoderma. » Diversity*, *2*(4), 527-549.

147. Capucho, A. S., Zambolim, E. M., Freitas, R. L., Haddad, F., Caixeta, E. T., & Zambolim, L. (2012). *« Identification of race XXXIII of Hemileia vastatrix on Coffea arabica Catimor derivatives in Brazil. » Australasian Plant Disease Notes*, *7*(1), 189-191.

148. Albuquerque, E. V. S., Carneiro, R. M. D. G., Costa, P. M., Gomes, A. C. M. M., Santos, M., Pereira, A. A., ... & Grossi-de-Sa, M. F. (2010). *« Resistance to Meloidogyne incognita expresses a hypersensitive-like response in Coffea arabica. » European journal of plant pathology*, *127*(3), 365-373.

149. Patricio, F. R. A., Braghini, M. T., & Fazuoli, L. C. (2010). *« Resistance of plants of coffea arabica, coffea canephora and interespecific hybrids to brown eye spot. » Bragantia*, *69*(4), 883-890.

150. Saucedo-García, A., Anaya, A. L., Espinosa-García, F. J., & González, M. C. (2014). *« Diversity and Communities of Foliar Endophytic Fungi from Different Agroecosystems of Coffea arabica L. in Two Regions of Veracruz, Mexico. » PloS one*, *9*(6), e98454.

151. Trinh, P. Q., Wesemael, W. M., Nguyen, S. T., Nguyen, C. N., & Moens, M. (2011). *« Pathogenicity and reproductive fitness of Pratylenchus coffeae and Radopholus arabocoffeae on Arabica coffee seedlings (Coffea arabica cv. Catimor) in Vietnam. » European Journal of Plant Pathology*, *130*(1), 45-57.

152. Inomoto, M. M., Kubo, R. K., Silva, R. A., Oliveira, C. M., Tomazini, M. D., & Mazzafera, P. (2007). *« Pathogenicity of two Pratylenchus coffeae populations from Brazil on coffee plants. » Nematology*, *9*(6), 853-858.

153. Vieira, A., Talhinhas, P., Loureiro, A., Thürich, J., Duplessis, S., Fernandez, D., ... & Azinheira, H. G. (2012). *« Expression profiling of genes involved in the biotrophic colonisation of Coffea arabica leaves by Hemileia vastatrix. » European journal of plant pathology*, *133*(1), 261-277.

154. Alban, R., Guerrero, R., & Toro, M. (2013). *« Interactions between a Root Knot Nematode (Meloidogyne exigua) and Arbuscular Mycorrhizae in Coffee Plant Development (Coffea arabica). »*

155. Barros, A. F., Oliveira, R. D. L., Zambolim, L., Ferreira, A. O., & Coutinho, R. R. (2011). *« Meloidogyne paranaensis attacking coffee trees in Espirito Santo State, Brazil. » Australasian Plant Disease Notes*, *6*(1), 43-45.

156. Boisseau, M., Aribi, J., Sousa, F. R. D., Carneiro, R. M., & Anthony, F. (2009). *« Resistance to Meloidogyne paranaensis in wild Coffea arabica. » Tropical Plant Pathology*, *34*(1), 38-41.

157. Soto-Pinto, L., Perfecto, I., & Caballero-Nieto, J. (2002). *« Shade over coffee: its effects on berry borer, leaf rust and spontaneous herbs in Chiapas, Mexico. » Agroforestry systems*, *55*(1), 37-45.

158. Romero, G., Alvarado, G., Ligarreto, G., & Galeano, N. F. (2010). *« Partial resistance to leaf rust (Hemileia vastatrix) in coffee (Coffea arabica L.): genetic analysis and molecular characterization of putative candidate genes. » Molecular breeding*, *25*(4), 685-697.

159. Santamaría, J., & Bayman, P. (2005). *« Fungal epiphytes and endophytes of coffee leaves (Coffea arabica). » Microbial Ecology*, *50*(1), 1-8.

160. Palma-Santos, M. C. D., & Perez-Maluf, R. (2010). *« Comunidade de parasitóides associada à cultura do café em Piatã, Chapada Diamantina, BA. »Revista Ceres*, *57*(2), 194-197.

161. Ronchi, C. P., & Silva, A. A. (2006). *« Effects of weed species competition on the growth of young coffee plants. » Planta Daninha*, *24*(3), 415-423.

162. Carneiro, R. M., Almeida, M. R. A., Gomes, A. C. M., & Hernandez, A. (2005). *« Meloidogyne izalcoensis n. sp.(Nematoda: Meloidogynidae), a root-knot nematode parasitising coffee in El Salvador. » Nematology*, *7*(6), 819-832.

163. Dufour, B. P. (2013). *« Le scolyte des baies du caféier, Hypothenemus hampei (Ferr.), présent en Martinique. » Cahiers Agricultures*, *22*(6), 575-578.

164. Stehlé, H. (1954). *« Quelques notes sur la botanique et l'écologie végétale de l'archipel des Caraïbes. » Journal d'agriculture tropicale et de botanique appliquée*, *1*(1-4), 71-110.

165. Carneiro, R. M., Almeida, M. R. A., & Quénéhervé, P. (2000). *«Enzyme phenotypes of Meloidogyne spp. populations. »* Nematology, 2(6), 645-654.

166. Al-Arequi, A. H. N. A., Chliyeh, M., Sghir, F., Touhami, A. O., Benkirane, R., & Douira, A. (2013). *« Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in the rhizosphere of Coffea arabica in the Republic of Yemen. » Journal of Applied Biosciences*, *64*(1), 4888-4901.

167. Quénéhervé, P., Godefroid, M., Mège, P., & Marie-Luce, S. (2011). *« Diversity of Meloidogyne spp. parasitizing plants in Martinique Island, French West Indies. »* Nematropica, 41(2), 191-199.

168. Queneherve, P., & Van den Berg, E. (2005). *« Liste des nématodes phytoparasites (Tylenchida et Dorylaimida) des départements français d'Amérique (Guadeloupe, Martinique et Guyane) et dispositions réglementaires. »* EPPO Bulletin, 35(3), 519-530.

169. Avelino, J., Ten Hoopen, G. M., & DeClerck, F. (2011). *«Ecological mechanisms for pest and disease control in coffee and cacao agroecosystems of the neotropics*. » Earthscan. (pp. 91-117).

170. Herve, G., Bertrand, B., Villain, L., Licardie, D., & Cilas, C. (2005). *«Distribution analyses of Meloidogyne spp. and Pratylenchus coffeae sensu lato in coffee plots in Costa Rica and Guatemala. »* Plant pathology, 54(4), 471-475.

171. Handoo, Z. A., Carta, L. K., & Skantar, A. M. (2008). *«Taxonomy, morphology and phylogenetics of coffee-associated root-lesion nematodes, Pratylenchus spp. »* In Plant-parasitic nematodes of coffee (pp. 29-50). Springer Netherlands.

172. Inomoto, M. M., & Oliveira, C. M. G. (2008). *«Coffee-Associated Pratylenchus spp.–Ecology and Interactions with Plants. In Plant-parasitic nematodes of coffee. »* Springer Netherlands. (pp. 51-64).

173. Villain, L. (2008). *«Economic importance, epidemiology and management of Pratylenchus sp. in coffee plantations. »* In *Plant-Parasitic Nematodes of Coffee*(pp. 65-84). Springer Netherlands.

174. Villain, L., Hernández, A., & Anzueto, F. (2008). *«Central America. In Plant-parasitic nematodes of coffee. »* Springer Netherlands, (pp. 261-275).

175. Villain, L., Baujard, P., Anzueto, F., Hernández, A., & Sarah, J. L. (2002). *«Integrated protection of coffee plantings in Central America against nematodes. »* Plantations, recherche, développement: recherche et caféiculture, 118-133.

176. Villain, L., Molina, A., Sierra, S., Decazy, B., & Sarah, J. L. (2000). *«Effect of grafting and nematicide treatments on damage by root-lesion nematodes (Pratylenchus spp.) to Coffea arabica L. in Guatemala.»* Nematropica, 30(1), 87-100.

177. Luc VILLAIN, Francisco ANZUETO, Jean-Louis SARAH. (2004). *«Resistance to root-lesion nematodes on Coffea canephora. »* Nematology Monographs & Perspectives, 2004, Vol. 2, 289-302

178. Benavides, P., Bustillo, A., & Góngora, C. (2012). *«IPM program to control coffee berry borer Hypothenemus hampei, with emphasis on highly pathogenic mixed strains of Beauveria bassiana, to overcome insecticide resistance in Colombia. »* INTECH Open Access Publisher.

179. Inomoto, M. M., Oliveira, C. M. G., Mazzafera, P., & Goncalves, W. (1998). *« Effects of Pratylenchus brachyurus and P. coffeae on seedlings of Coffea arabica. »* Journal of nematology, 30(3), 362.

180. Fernandes, F. L., Picanço, M. C., Fernandes, M. E., Galdino, T. V., & Tomaz, A. C. (2009). *« Perdas causadas por Coccus viridis (Hemiptera: Coccidae) em mudas de Coffea arabica»* L. *EntomoBrasilis*, *2*(2), 49-53.

181. Del Carmen Cárdenas, M., Brito, R. V. M., Giraldo, H., & Aquino, A. (2010). *«Biología de la broca del café, Hypothenemus hampei Ferrari (Coleoptera: Curculionidae) bajo condiciones de campo, en el estado Táchira, Venezuela. »* *Entomotropica*, *22*(2), 49-55.

182. Camargo, M.B.P. 2010. *«The impact of climatic variability and climate change on Arabic coffee crop in Brazil. »* Bragantia 69: 239–247.

183. 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. » PloS one*, *7*(11), e47981.

184. Joët, T., Laffargue, A., Descroix, F., Doulbeau, S., Bertrand, B., & Dussert, S. (2010). *« Influence of environmental factors, wet processing and their interactions on the biochemical composition of green Arabica coffee beans. » Food chemistry*, *118*(3), 693-701.

185. Assad, E. D., Pinto, H. S., Zullo Junior, J., & Ávila, A. D. (2004). *« Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. » Pesquisa Agropecuária Brasileira*, *39*(11), 1057-1064.

186. Martins, L. D., Tomaz, M. A., Lidon, F. C., DaMatta, F. M., & Ramalho, J. C. (2014). *« Combined effects of elevated [CO2] and high temperature on leaf mineral balance in Coffea spp. plants. » Climatic Change*, *126*(3-4), 365-379.

187. Lin, B. B., Perfecto, I., & Vandermeer, J. (2008). *« Synergies between agricultural intensification and climate change could create surprising vulnerabilities for crops. » Bioscience*, *58*(9), 847-854.

188. BRAGANÇA, R., & RIBEIRO, D. (2012). *« AVALIAÇÃO DE INCREMENTOS DE TEMPERATURA NO ZONEAMENTO AGROCLIMATOLÓGICO PARA A CULTURA DO CAFÉ NO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO. »* UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO ; CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

189. Meireles, E. J. L., Camargo, M. D., Fahl, J. I., Thomaziello, R. A., Pezzopane, J. R. M., Santos, J. C. F., ... & Bardin, L. (2007). *« Fenologia do cafeeiro: condições agrometeorológicas e balanço hídrico-ano agrícola 2002-2003. »* Embrapa Informação Tecnológica: Embrapa Café.

190. Caramori, P. H., Caviglione, J. H., Wrege, M. S., Gonçalves, S. L., Faria, R. D., Androcioli Filho, A., ... & Koguishi, M. S. (2001). *« Zoneamento de riscos climáticos para a cultura de café (Coffea arabica L.) no Estado do Paraná. »* Revista Brasileira de Agrometeorologia, 9(03), 486-494.

191. Coral, G., Coltri, P. P., Pinto, H. S., Junior, J. Z., Ramirez, G. M., Marin, F. R., & Lazarim, C. G. (2009, October). *« Relações entre a temperatura do ar, a radiação solar e a temperatura das folhas de cafeeiros, em dia com alta nebulosidade. »*

In *Embrapa Informática Agropecuária-Artigo em anais de congresso (ALICE)*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 16, 2009, Belo Horizonte. Anais... Viçosa, MG: UFV; Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2009.

192. Pinto, H. S., ZULLO JUNIOR, J., Assad, E. D., Brunini, O., Alfonsi, R. R., & Coral, G. (2001). *« Zoneamento de riscos climáticos para a cafeicultura do Estado de São Paulo. »* Revista Brasileira de Agrometeorologia, 9(03), 495-500.

193. Chemura, A., Kutywayo, D., Chidoko, P., & Mahoya, C. (2015). «*Bioclimatic modelling of current and projected climatic suitability of coffee (Coffea arabica) production in Zimbabwe. » Regional Environmental Change*, 1-13.

194. Gay, C., Estrada, F., Conde, C., Eakin, H., & Villers, L. (2006). *« Potential impacts of climate change on agriculture: A case of study of coffee production in Veracruz, Mexico.* » *Climatic Change*, *79*(3-4), 259-288.

195. Castilla Valdés, Y. (2012). *« Conservación de recursos fitogenéticos de cafeto (Coffea spp.) por métodos biotecnológicos: una alternativa para su preservación. » Cultivos Tropicales*, *33*(4), 29-39.

196. Eitzinger, A., Läderach, P., Carmona, S., Navarro, C., & Collet, L. (2013). *« Prediction of the impact of climate change on coffee and mango growing areas in Haiti. »* Full technical report.

197. Junior, J. Z., Pinto, H. S., & Assad, E. D. (2006). *«Impact assessment study of climate change on agricultural zoning. »* Meteorological Applications, 13(S1), 69-80.

198. Altamirano Tinoco, J. A. (2013). *« Influencia de la variabilidad climática sobre la producción de café (Coffea arabica L.) en Honduras. »* (Doctoral dissertation).

199. Venkatapen, C. (2012). *« Étude des déterminants géographiques et spatialisation des stocks de carbone des sols de la Martinique »* (Doctoral dissertation, Antilles-Guyane).

200. Atlan, Y. (1990). *« Contribution à l'étude géotechnique des sols volcaniques tropicaux exemple de la martinique. » Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, *41*(1), 17-26.

201. Portecop, J. (1978). *« Phytogéographie, cartographie écologique et aménagement dans une île tropicale. Le cas de la Martinique. » Grenoble, France*, *377*.

202. Albert, P., & Spieser, J. (1999). *« Atlas climatique de la Martinique: le temps à la Martinique. »* Météo-France, Direction interrégionale Antilles-Guyane.

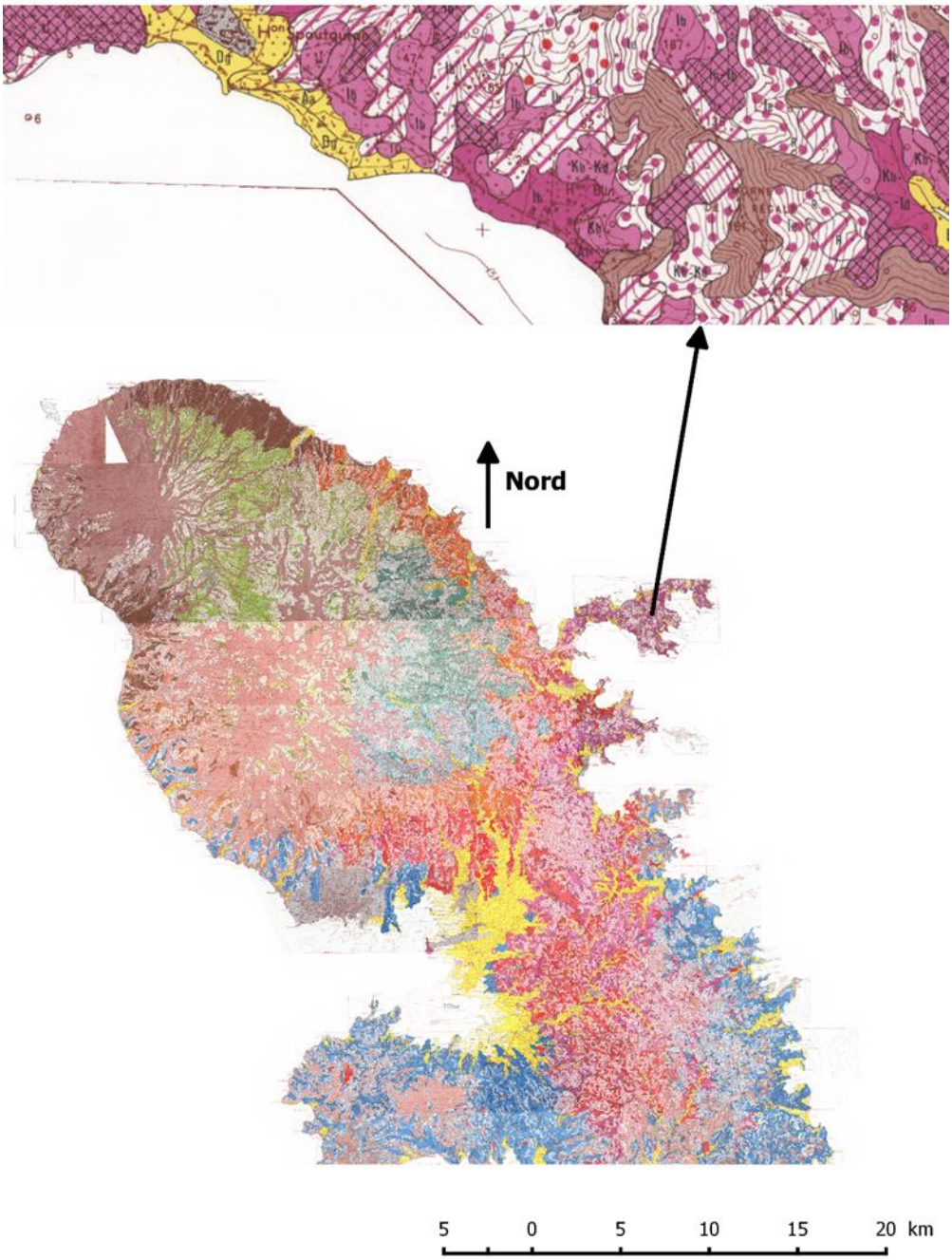
203. Cantet et al. (2014) : Cantet, P.; Déqué, M.; Palany, P. & Maridet, J.-L. « The importance of using a high-resolution model to study the climate change on small islands: the Lesser Antilles case, Tellus A, Tellus, 2014, 66 » http://www.tellusa.net/index.php/tellusa/article/view/24065

204. Projection Climatique régionalisée en Martinique, Météo-France Antilles Guyane, DEAL Martinique, 2012. Rapport disponible à la demande.

ANNEXE

Annexe 1 : Scan de la carte des sols de l'IRD.

Carte détaillée des sols en Martinique.



Annexe 2 : Espèces d'ombrage associées au café.[8]

Espèces utilisées dans le monde comme ombrage pour les caféiers

Nom scientifique	Famille	Distribution géographique	Apport économique	Avantage	Inconvénient
Albizzia Lebbeck	Fabaceae	Asie	médicaments et bois (en Asie)	-Ombrage de qualité (même excessif) -perd ses feuilles chaque année, en donnant un humus appréciable.	-Attaquée par le pourridié qu'il communique au café -Trop d'ombrage
Erythrina glauca ou fusca	Fabaceae	Amérique Du Sud	Plante ornementale, production d'alcaloïdes toxiques autrefois utilisés en médecine	-Bon couvert -pousse rapide -bon humus.	-Branches très fragiles, cassées par les cyclones mais pouvant donner rapidement un nouvel abri.
Les bananiers Musa species	Musaceae	Pays tropicaux	Culture, plante ornementale	-Abri momentané pour le Caféier, pendant la croissance des arbres d'ombrage	-Abri temporaire -pourrait réduire la production des caféiers si cela devenait permanent
Persea americana (var. spp)	Lauraceae	Pays au climat tropical ou subtropical	Culture, bois, usages médico-traditionnels	-	-
Samanea saman	Mimosaceae	Amérique Tropicale, Asie du sud-est, Pacifique…	Vertus médicinales (cancer), fabrication de meubles	-	-
Cordia Alliodora	Boraginaceae	Du Mexique à l'Argentine, ainsi que les Antilles	Bois (bateau, meubles, guitares…) menuiserie fine	-	-Vulnérable à la pourriture des racines -espèce envahissante et problématique (Ex: Vanuatu).

[8] Tableaux réalisés à partir des données obtenues dans les références bibliographiques qui figurent à la fin du mémoire, en récupérant dans chaque article le nom des espèces cultivées en association avec le café et les caractéristiques associées.

Nom scientifique	Famille	Distribution géographique	Apport économique	Avantage	Inconvénient
Erythrina poeppigiana	Fabaceae	Amérique Tropicale, Asie du Sud, forêt humide du Pacifique	Aucun apport économique	-Bon ombrage -apport riche en nutriments, fixe l'azote -espèce servant de haies	-Attaquée par une gamme de maladies fongiques: -affectée par les nématodes -Semences, écorce, racines avec alcaloïdes toxiques. -système racinaire superficiel, arbres sensibles aux dommages du vent.
Eucalyptus deglupta	Myrtaceae	On le trouve un peu partout dans le monde	Bois, pâte à papier, tronc décoratif, arbre ornemental	-	-
Gliricidia sepium	Fabaceae	Cultivée dans la plupart des pays tropicaux.	Aucun apport économique	-Très utilisée en agroforesterie comme ombrage -engrais vert (apport d'azote au sol) -stabilise les sols -bois de chauffage, les branches servent pour le bétail	-
Inga densiflora	Mimosaceae	Originaire d'Amérique Centrale et du Sud	-	-Engrais vert fixe l'azote	-
Terminalia ivorensis	Combretaceae	Très répandue en Afrique de l'ouest	Bois dur pour l'ébénisterie et la charpenterie	-	-
Hevea brasiliensis	Euphorbiaceae	Originaire de la forêt amazonienne, répandu dans toutes les régions tropicales	Extraction du latex transformé en caoutchouc.	-	-

Nom scientifique	Famille	Distribution géographique	Apport économique	Avantage	Inconvénient
Mimosa scabrella	Fabaceae	Originaire du Brésil	Production de papier, bois	-Système racinaire profond qui ne peut pas concurrencer le caféier -faible demande de nutriments -ombrage correct -protège du gel	-Très courte durée de vie -mauvaise résistance aux vents.
Acacia mangium	Fabaceae	-	Bois	-Engrais vert (apport de biomasse, maintien de l'humidité et la température du sol)	-
Citrus species	Rutaceae	-	Culture, parfum	-	-
Cedrela odorata	Meliaceae	Régions tropicales d'Amérique	Bois	-	-
Casuarina sp.	Casuarinaceae	Régions tropicales et subtropicales	Bois	-	-
Albizia adianthifolia	Fabaceae	Afrique	-	Accumulation de carbone et des nutriments	-
Mosquitoxylum jamaicense	Anacardiaceae	Amérique centrale, Caraïbes	-	-	Ombrage temporaire
Tonduzia longifolia	Apocynaceae	-	-	-	-
Oreopanax peltatus	Araliaceae	-	-	-	Ombrage temporaire
Croton draco	Euphorbiaceae	-	-	-	Ombrage temporaire
Croton niveus	Euphorbiaceae	-	-	-	Ombrage temporaire
Zuelania guidonia	Flacourtiaceae	Amérique Centrale, Antilles	-	-	Ombrage temporaire

Nom scientifique	Famille	Distribution géographique	Apport économique	Avantage	Inconvénient
Dalbergia stevensonii Standl.	Fabaceae	-	Bois	- Espèce appropriée pour l'ombrage du café -décomposition de la litière rapide	-
Enterolobium cyclocarpum	Fabaceae	Régions tropicales d'Amérique	Bois	- Espèce appropriée pour l'ombrage du café -décomposition de la litière rapide -n'est pas attaquée par les parasites -fertilise le sol	-
Inga pavoniana Don	Fabaceae	-	Culture, bois	- Espèce appropriée pour l'ombrage du café -croissance rapide -décomposition de la litière rapide -contrôle des mauvaises herbes -fertilise le sol	-
Lonchorcarpus rugosus Benth.	Fabaceae	Amérique Centrale	Bois	-Espèce appropriée pour l'ombrage du café -décomposition de la litière rapide -croissance rapide	-
Platymiscium dimorphandrum	Fabaceae	Amérique Centrale	Bois	-Espèce appropriée pour l'ombrage du café -décomposition de la litière rapide -croissance rapide -contrôle des mauvaises herbes -résistance au vent -fertilise le sol	-
Swartzia cubensis	Fabaceae	Amérique centrale et latine	Bois	-Espèce appropriée pour l'ombrage du café -décomposition de la litière rapide -contrôle des mauvaises herbes -résistance au vent -bonne hauteur pour la gestion	-

Nom scientifique	Famille	Distribution géographique	Apport économique	Avantage	Inconvénient
Cecropia obtusifolia	Cecropiaceae	Amérique Centrale	-	-	Ombrage temporaire
Ficus sp.	Moraceae	Régions tropicales et subtropicales	culture	-	Ombrage temporaire
Cupania dentata	Sapindaceae	-	-	- Espèce appropriée pour l'ombrage du café -résistance au vent -contrôle des mauvaises herbes -fertilise le sol	-
Inga thibaudiana	Fabaceae	Amérique Centrale, Amérique du Sud, Caraïbes	-	Espèce appropriée pour l'ombrage du café	-
Solanum aphyodendron S. Knapp	Solanaceae	Amérique centrale	Culture	-	-
Theobroma cacao	Sterculiaceae	-	-	-	-
Bursera simaruba	Burseraceae	Répandu en Amérique centrale, aux Antilles	-	-	-
Psidium guajava	Myrtaceae	Amérique tropicale	Culture	-	-
Castilla elastica	Moraceae	Amérique Centrale	Fabrication de pâte à papier	-	-
Heliocarpus donnell-smithii Ros	Malvaceae	-	-	-	-
Citrus aurantiifolia	Rutaceae	Régions tropicales	Culture	-	-
Citrus nobilis	Rutaceae	Régions tropicales	Culture	-	-

Nom scientifique	Famille	Distribution géographique	Apport économique	Avantage	Inconvénient
Mangifera indica	Anacardiaceae	Régions tropicales	Culture	-	-
Citrus sinensis	Rutaceae	Région chaude	Culture	-	-
Calocarpum zapota	Sapotaceae	Amérique Centrale, Caraïbes	Culture	-	-

Annexe 3 : Espèces servant de couverture au sol pour le café.[9]

Espèces utilisées dans le monde comme couverture du sol pour le café					
Nom scientifique	**Famille**	**Morphotype**	**Distribution géo.**	**Ecologie**	**Avantage**
Arachis pintoi	Fabaceae (Légumineuse)	herbe pérenne de 50cm de hauteur	Régions tropicales, subtropicales humides	<1400m d'altitude - 22° à 28°C - 1500 à 2000 mm -4 mois secs -sols limoneux (pH 4 à 7)	-engrais vert, source importante de nutriments.
Calopogonium mucunoides	Fabaceae (Légumineuse)	herbe pérenne	Régions tropicales	- 18° à 32°C >1500 mm d'eau -large gamme de type de sols (pH 4,5 à 5)	-engrais vert, source importante de nutriments.
Stizolobium aterrimum	Fabaceae (Légumineuse)	arbuste grimpant	Régions tropicales	climat tropical	-engrais vert, source importante de nutriments.
Stylosanthes guianensis	Fabaceae (Légumineuse)	herbe pérenne	Région tropicales et subtropicales	- 19° à 27°C -1000mm à 2500 mm d'eau -sable à argile léger (pH 4 à 8)	-engrais vert, source importante de nutriments.
Leucaena leucocephala	Fabaceae (Légumineuse)	arbuste pouvant atteindre 4 à 5 m de haut	Région tropicales	-adaptée à la sécheresse -supporte tout type de sol	-engrais vert (apport de biomasse, maintien de l'humidité et la température du sol)
Cajanus cajan	Fabaceae (Légumineuse)	arbuste pouvant atteindre 4 à 5 m de haut	Région tropicales et subtropicales	- 18° à 35°C - 625mm à 2000 mm d'eau -tolère une large gamme de sols	- enrichit le sol en azote grâce à la fixation symbiotique de l'azote

[9] Tableau réalisé à partir des données obtenues dans les références bibliographiques qui figurent à la fin du mémoire, en récupérant dans chaque article le nom des espèces associées au café et les caractéristiques associées.

Table des cartes

Carte 1 « Coffea arabica : origine et diffusions »....10
Carte 2 « Localisation des habitations caféières en 1785 »....38
Carte 3 « Zonage altitudinal pour Coffea arabica variété typica »....49
Carte 4 « Les pentes à la Martinique »....51
Carte 5 « Stations météorologiques en Martinique »....53
Carte 6 « Températures moyennes minimales annuelles (1971-2000)....55
Carte 7 « Températures moyennes maximales annuelles (1971-2000)....57
Carte 8 « Carte des stations météorologiques pour définir les températures moyennes »....58
Carte 9 « Zonage thermique pour le Coffea arabica variété typica »....62
Carte 10 « Carte pluviométrique de la Martinique (normales 1971-2000)....64
Carte 11 « Carte des stations météos pour définir la distribution annuelle des précipitations »....65
Carte 12 « Zonage pluviométrique pour Coffea arabica variété typica (normales 1971-2000). »....70
Carte 13 « Carte des sols de la Martinique »....72
Carte 14 « Zonage pédologique pour Coffea arabica variété typica »....74
Carte 15 « Zonage pédoclimatique pour Coffea arabica à partir des températures moyennes maximales… »....76
Carte 16 « Zonage pédoclimatique pour Coffea arabica à partir des températures moyennes maximales… »....78
Carte 17 « Les terres agricoles en Martinique »....80
Carte 18 « Les espaces arborés en Martinique »....82
Carte 19 « Températures moyennes minimales annuelles (projection climatique, scénario RCP 4.5...) »....86
Carte 20 « Températures moyennes maximales annuelles (projection climatique, scénario RCP 4.5…) »....88
Carte 21 « Carte des stations météorologiques pour définir les températures moyennes »....89
Carte 22 « Carte pluviométrique de la Martinique (projection climatique, scénario RCP 4.5…) »....92
Carte 23 « Zonage pluviométrique pour Coffea arabica (projection climatique, scénario RCP 4.5…) »....93
Carte 24 « Zonage agro-climatique pour Coffea arabica (projection climatique, scénario RCP 4.5…) »....95
Carte 25 « Zonage thermique pour Coffea arabica (projection climatique, scénario RCP 4.5…) »....96

Table des images

Figure 1 « Origine de l'espèce allotétraploïde : Coffea arabica. » 18
Figure 2 « Modélisation 3D de l'altitude en Martinique. » 50
Figure 3 « Calculatrice raster » 76
Figure 4 « Calculatrice raster » 77
Figure 5 « Modélisation Milieu propice : Montagne Pelée » 79
Figure 6 « Modélisation Milieu propice : Morne Rouge » 79
Figure 7 « Modélisation Milieu propice : Pitons du Carbet » 79
Figure 8 « Calculatrice raster » 94

Table des graphiques

Graphique 1 « Températures (normales 1971-2000) à Ajoupa-Bouillon.» 59
Graphique 2 « Températures (normales 1971-2000) à Fonds-Saint-Denis.» 59
Graphique 3 « Températures (normales 1971-2000) à Basse-Pointe.» 60
Graphique 4 « Températures (normales 1971-2000) au Diamant.» 60
Graphique 5 « Températures (normales 1971-2000) au Lamentin.» 60
Graphique 6 « Températures (normales 1971-2000) à Saint-Joseph.» 61
Graphique 7 « Températures (normales 1971-2000) à Rivière-Pilote.» 61
Graphique 8 « Pluviométrie au Vauclin » 65
Graphique 9 « Pluviométrie au François » 66
Graphique 10 « Pluviométrie à Rivière-Pilote » 66
Graphique 11 « Pluviométrie à Basse-Pointe » 67
Graphique 12 « Pluviométrie au Carbet » 67
Graphique 13 « Pluviométrie au Lamentin » 68
Graphique 14 « Pluviométrie à Saint-Joseph » 68
Graphique 15 « Pluviométrie à Fonds-Saint-Denis » 69
Graphique 16 « Pluviométrie à Fort-De-France » 69
Graphique 17 « Pluviométrie au Morne-Rouge » 69
Graphique 18 « Températures (normales 2071-2100) à Ajoupa-Bouillon » 90
Graphique 19 « Températures (normales 2071-2100) à Fonds-Saint-Denis » 90

Table des photos

Photo 1 « Coffea canephora (Chez un particulier, en Martinique, le 10/02/2015) »....13
Photo 2 « Coffea liberica (Domaine de l'Emeraude au Morne Rouge, Martinique, 10/02/2015) »....13
Photo 3 « Coffea arabica (Chez un particulier, en Martinique, le 10/02/2015) »....14
Photo 4 « Fruit et semence du Coffea arabica var. Typica »....16

Table des tableaux

Tableau 1 « Base du zonage à Cuba »....37
Tableau 2 « Stations météorologiques en Martinique. »....52
Tableau 3 « Les sols en Martinique »....73
Tableau 4 « Base du zonage pédoclimatique pour le café arabica »....75
Tableau 5 « Base du zonage agro-climatique pour le café arabica »....94

Table des matières

Avant-propos **1**

Remerciements **2**

Sommaire **3**

Introduction **5**

Bilan de la recherche **7**

I.1 L'Histoire du Coffea arabica var. typica du monde à la Martinique. 7

I.2 La description botanique du genre Coffea, et de l'espèce Coffea arabica var. Typica. 12

I.3 Profil biologique de Coffea arabica et recherches génétiques 17

I.4 L'importance économique du café dans le monde 20

I.5 Profil écologique de Coffea arabica var. typica selon la littérature scientifique mondiale. 22

I.6 La culture du café en système agroforestier 25

I.7 Les facteurs limitants 26

I.8 Méthodologies pour le zonage agro-écologique des caféiers : état des connaissances et savoir-faire dans le monde. 34

I.9 Hypothèses de recherche 38

II. MATERIEL **40**

III. METHODE **44**

IV. Résultats et Discussion : Zonage agro-écologique pour Coffea arabica variété Typica en 2015, en Martinique. **47**

A) Les exigences écoclimatiques du Coffea arabica variété typica. 47

B) Résultats et discussion. 48

1) L'Altitude 48

2) Les pentes et les autres facteurs éco-climatiques 50

3) Le climat 52

4) Les sols 71

5) Zonage pédoclimatique : carte des potentialités. 75

6) Les terres agricoles propices à la culture du café 80

7) Végétation 81

8) Potentialités de la culture du café arabica en 2015 et Histoire du café (1785) 83

V. Résultats et Discussion : Zonage agro-climatique pour Coffea arabica variété Typica pour 2071-2100, en Martinique. **85**

A) Résultats et Discussion. 85

1) Le modèle avec le scénario nommé RCP 4.5 : facteurs climatiques 85

2) Zonage agro-climatique : carte des potentialités pour 2071-2100, à l'aide du scénario RCP 4.5. 94

Conclusion **97**

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES **100**

Annexe **118**

Table des cartes **126**

Table des images **127**

Table des graphiques **127**

Table des photos **128**

Table des tableaux **128**

Données numériques collectées et utilisées **131**

Résumé **132**

Données numériques collectées et utilisées.

Météo-France

- Données de la Convention de recherche et développement partagées DEAL Martinique/Météo-France DIRAG N°10/20/30
  Simulations d'ALADIN-CLIMAT sur le domaine des Petites Antilles (Précipitations, Températures minimales, Températures maximales), données Excel et Raster :
  - Hist : période 1971-2000, modèle forcé par les observations du climat présent.
  - RCP 45 : période 2071-2100, modèle forcé par le scénario RCP 4.5

L'IRD

- Carte des sols de la Martinique de l'IRD, récupérée auprès du laboratoire de Géode à l'université des Antilles, sous forme de donnée SIG au format shape, qui se nomme : « pedo_IRD_2006 ».

La DEAL

- Des données SIG au format shape ont pu être récupérées et utilisées auprès de cet organisme :
  - La végétation
  - L'orographie
  - L'administratif
  - Les toponymes

La DAAF

- La donnée SIG au format shape, récupérée auprès de cet organisme concerne les îlots agricoles et se nomme : « RPG2014-anonyme ».

Le Conseil Général de la Martinique

- Des données SIG au format shape ont pu être récupérées et utilisées auprès de cet organisme :
  - L'administratif
  - Les toponymes

L'IGN

- Le dossier BDALTI 25 mètres de l'IGN, et la BD ORTHO® Version 2 de l'IGN (orthophotographie de 2010 de la Martinique) ont été récupérés auprès du laboratoire de Géode à l'université des Antilles, et ont été utilisés.

Résumé

Première île du « Nouveau Monde » à avoir accueilli pour la première fois le café : Coffea Arabica variété Typica en 1720, la Martinique pourtant ne connait aujourd'hui, plus aucunes véritables plantations de caféiers. Hors elle dispose de la variété Typica, aux origines historiques remarquables et aux valeurs sensorielles globalement reconnues dans le monde.

La relance de la culture du café en Martinique présente aujourd'hui plusieurs enjeux. D'un point de vue économique, il s'agirait de lancer un produit de terroir à haute valeur ajoutée, d'un point de vue historique et culturel c'est une façon de se réapproprier un patrimoine historique et de le valoriser, et d'un point de vue agronomique il s'agit de mettre en valeur la biodiversité utile.

Pour rendre réelle ces perspectives, cette présente étude s'attache surtout et d'abord à traiter l'aspect agro-écologique. Autrement dit pour relancer la culture, il est nécessaire de connaître les milieux potentiellement aptes de nos jours, à accueillir la culture de café Typica, vis-à-vis des exigences éco-climatiques spécifiques à l'espèce, puisqu'il n'y a plus de plantations de café dans l'île pouvant servir « d'indicateur » de milieux favorables.

L'objectif final, à l'aide d'un Système d'Information Géographique (SIG), est de cartographier les milieux propices de nos jours, au café arabica variété typica en Martinique.

Puis l'étude permet aussi d'analyser l'impact du changement climatique sur les possibilités de culture du café Arabica variété Typica en Martinique durant les prochaines années, au vue de sa faible tolérance pour la hausse des températures.

Mots-clés : Coffea arabica var. typica, profil écologique, facteurs éco-climatiques, spatialisation, biotopes, Martinique, changement climatique.