

Université de Toulouse

MASTER 2 GEOMATIQUE

« **ScIences Géomatiques en environneMent et Aménagement** » (**SIGMA**)

<http://sigma.univ-toulouse.fr>

MEMOIRE DE RECHERCHE

Evaluation du potentiel de production durable du palmier à huile au Mexique



CHIKHAOUI Emna

Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement



Maître de stage : GAZULL Laurent
Tuteur-enseignant : SHEEREN David

Septembre 2019

Remerciements

```
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Created on Sun Sep 1 00:00:00 2019

@author: Emna CHIKHAOUI
"""

#####
#Listes de remerciements
#####
Tuteur = ['Laurent GAZULL', 'David SHEEREN']
Famille = ['Omi', 'Lawzi', 'reste de ma famille']
CIRAD = ['Loïc', 'CIRADIENS']
Amis = ['SIGMA', 'Tout le monde', 'Ti', 'Adri']
Monde = ['Tunisie', 'INAT', 'INP-
ENSAT', 'UT2J', 'Karasiak', 'Chabasse', 'Professeurs']

#####
#Remerciements
#####

#tuteurs
Tuteur [0] = "Merci pour l'écoute, la compréhension, la disponibilité, les
conseils et surtout la bonne humeur! "
Tuteur [1] = "Je n'aurais jamais pu avoir une telle opportunité sans votre
aide, merci."

#famille & cirad
for i in range (0,2):
    if i <1:
        print(Famille[i]+ " & " + Famille[i+1] +", mes chères
supportrices, mes top fans, ma petite famille, c'est grâce à vous que
je continue à avancer. Je vous offre le fruit de mes efforts.
Nhebkoum!")
        print(CIRAD[i] + " ,tu m'as sauvée la vie! Merci pour le
soutien.")
    else :
        print("Au " + Famille[i+1] + " , merci d'avoir contribué, d'une
manière ou d'une autre, à être qui je suis aujourd'hui. Paix aux âmes
qui nous ont quittées...")
        print ("Les " + CIRAD[i] + ", vous êtes tous très gentils! Une
belle ambiance et de la bonne bouffe, que demander de plus ?")

#amis & tout le reste
Beaucoup_de_gratitude = Monde + Amis[:2]

j = 0
while j < (len(Amis)-3):
    Amis[-(j+1)] = "Partner in crime! Merci pour tout"
    j += 1

(('it').join(Amis[-2]))+(" merci pour ton enthousiasme contagieux à l'égard
de mes travaux comme dans la vie en général")
```

Abstract

Like most tropical countries and especially Latin American countries, Mexico is stimulated by the growing international demand for palm oil, which has led it to intensify this crop in recent years. This dynamic has attracted the attention of some investors who wanted to take advantage of this sector while integrating environmental and social issues. This study aims to estimate the production potential of palm oil in Mexico according to the RSPO sustainability standard, which also includes HCS and HCV standards. It is based on a spatial analysis combining a first potential called "theoretical" which takes into account the soil and climatic conditions of the environment, with another potential identified as "sustainable" integrating the constraints linked to the RSPO standard and evaluating realistic land conversion assumptions. This mapping work uses several global and national geographic sources as well as local statistical data. It is based on CIRAD's experience in the field of agricultural potential assessment and integrates applications developed in Python programming. The product of this realization reveals a pedoclimatic capacity of southern Mexico to produce oil palm, estimated at 39.12 M ha. But in reality, only half would be available for planting after having taken into account the environmental and social requirements imposed by sustainability standards. In addition, the analysis shows that there is an aptitude gradient between the Gulf of Mexico coast and the Pacific coast. It's presented as a concentration of land with good production capacity in the South-East, which is largely in line with the Mexican government's future strategy for oil palm planting for the period 2017-2030.

Keywords: mapping, spatial analysis, Python programming, production potential, environment, sustainability standards, oil palm, Mexico.

Résumé

Comme la majorité des pays tropicaux et surtout les pays de l'Amérique Latine, le Mexique est stimulé par la demande internationale croissante du palmier à huile ce qui l'a poussé à intensifier cette culture durant ces dernières années. Cette dynamique a attiré l'attention de certains investisseurs qui veulent profiter de la rentabilité de ce secteur tout en intégrant les enjeux environnementaux et sociaux. Cette étude vise à estimer le potentiel de production du palmier à huile au Mexique suivant le standard de durabilité RSPO, qui inclue également les normes HCS et HCV. Elle se base sur une analyse spatiale combinant un premier potentiel appelé « théorique » qui tient compte des conditions pédologiques et climatiques du milieu, avec un autre potentiel identifié comme « durable » intégrant les contraintes liées au standard RSPO et évaluant des hypothèses réalistes de conversion des terres. Ce travail de cartographie se sert de plusieurs sources géographiques mondiales et nationales ainsi que des données statistiques locales. Il s'appuie sur l'expérience du CIRAD dans le domaine de l'évaluation des potentiels agricoles et intègre des applications réalisées en programmation Python. Le produit de cette réalisation dévoile une aptitude pédoclimatique du Sud du Mexique à produire le palmier à huile, estimée de 39.12 M ha. Mais en réalité, seule la moitié serait disponible à la plantation suite à la prise en considération des exigences environnementales et sociales imposées par les normes de durabilité. Par ailleurs, l'analyse montre qu'il existe un gradient d'aptitude entre la côte du Golfe du Mexique et celle du Pacifique. Il se manifeste sous la forme d'une concentration de terres ayant une bonne capacité de production dans le Sud-Est, ce qui est majoritairement conforme à la stratégie future de plantation de palmier à huile adoptée par le gouvernement mexicain pour la période 2017 -2030.

Mots clés : cartographie, analyse spatiale, programmation Python, potentiel de production, environnement, normes de durabilité, palmier à huile, Mexique.

Sommaire

Remerciements.....	1
Abstract.....	2
Résumé	3
Liste des figures.....	6
Liste des tableaux.....	6
Liste des abréviations.....	8
Introduction.....	9
Partie 1 : Durabilité et Potentiel de production.....	11
1.1 Normes de durabilité	11
1.1.1 Normes et standards de durabilité pour l'industrie du palmier à huile.....	11
1.2 Potentiels de production	17
1.2.1 Types de potentiels.....	17
1.2.2 Méthodes d'évaluation des potentiels.....	18
Partie 2 : Le palmier à huile au Mexique.....	20
2.1 Un cadre géographique favorable.....	20
2.1.1 Généralités.....	20
2.1.2 Relief	20
2.1.3 Climat	20
2.2 Situation du palmier à huile au Mexique.....	21
2.2.1 Historique	21
2.2.2 Zones productives du palmier à huile.....	22
2.2.3 Impact du palmier à huile sur l'occupation du sol.....	24
Partie 3 : Méthodologie et données utilisées.....	26
3.1 Cadre général de l'évaluation.....	26
3.2 Démarche générale	26
3.3 Données utilisées	29
3.4 Cartographie du potentiel théorique	31
3.4.1 Les conditions pédoclimatiques	31
3.4.1.1 Précipitation et déficit hydrique	31
3.4.1.2 Températures	34
3.4.1.3 Pente	35
3.4.1.4 Sol.....	35
3.4.2 Le calcul du potentiel théorique	37
3.5 Cartographie du potentiel durable.....	38
3.5.1 Méthodologie HCS.....	40
3.5.1.1 Principe général.....	40

3.5.1.2 Détails du traitement HCS.....	40
Partie 4 : Résultats.....	46
4.1 Potentiel théorique.....	46
4.1.1 Contrainte pluviométrique.....	46
4.1.2 Contrainte thermique.....	47
4.1.3 Contrainte pédologique.....	48
4.1.4 Contrainte topographique.....	49
4.1.5 Potentiel théorique.....	50
4.2 Potentiel durable.....	51
4.2.1 Potentiel durable.....	51
Partie 5 : Discussion.....	56
5.1 Les potentiels de production de palmier à huile.....	56
5.1.1 La production est fonction du climat et du sol.....	56
5.1.2 Impacts des aspects sociaux et environnementaux sur la production.....	56
5.1.2.1 Disponibilité des terres dans le cas d'un élevage extensif.....	57
5.1.2.2 Disponibilité des terres dans le cas d'un élevage intensif.....	57
5.2 Comparaison avec le plan Mexicain national de plantation de palmier à huile.....	57
5.3 Critiques des méthodes et des techniques du travail.....	59
5.3.1 Limite méthodologique.....	59
5.3.1.1 Aptitude des sols à la plantation du palmier.....	59
5.3.1.2 Contraintes sociales et économiques.....	59
5.3.2 Limite technique.....	60
5.3.2.1 Manipulation de données sur python.....	60
5.3.2.2 Exigences de la méthodologie HCS.....	60
Conclusion et perspectives.....	61
Bibliographie.....	62
Annexe 1.....	65
Annexe 2.....	71
Annexe 3.....	73

Liste des figures

Figure 1. Stratification végétale.....	14
Figure 2. Arbre de décision d'analyse de patches HCS.....	16
Figure 3. Chevauchements des potentiels théorique, technique et économique.....	18
Figure 4. Augmentation des surfaces de palmiers à huile au Mexique durant la période 1980- 2016..	22
Figure 5. Carte de potentiels de plantation du palmier à huile à Chiapas.....	22
Figure 6. Carte de potentiels de plantation du palmier à huile à Veracruz.....	23
Figure 7. Carte de potentiels de plantation du palmier à huile à Tabasco.....	24
Figure 8. Matrice de la transition de la couverture de la surface utilisée pour le palmier à huile.....	25
Figure 9. Les potentiels de production (théorique et durable)	27
Figure 10. Démarche générale de la cartographie des potentiels théorique et durable.....	28
Figure 11. Relation du déficit hydrique et de la production	32
Figure 12. Paramètres impliqués dans le calcul du potentiel théorique.....	38
Figure 13. Arbre de décision de la méthodologie HCS.....	41
Figure 14. Carte de la pluviométrie moyenne annuelle au Mexique (1970 – 2000)	46
Figure 15. Carte du nombre de mois de sécheresse au Mexique (1970 – 2000)	47
Figure 16. Carte du nombre de mois froids au Mexique (1970 – 2000)	48
Figure 17. Carte d'aptitude du sol à la plantation du palmier à huile au Mexique	49
Figure 18. Carte de contrainte topographique pour la plantation du palmier à huile au Mexique.....	50
Figure 19. Carte du potentiel théorique pour la plantation du palmier à huile au Mexique.....	51
Figure 20. Carte du potentiel durable pour la plantation du palmier à huile au Mexique.....	52
Figure 21. Carte de la disponibilité des terres à la plantation du palmier selon le scénario 1.....	53
Figure 22. Carte de la disponibilité des terres à la plantation du palmier selon le scénario 2.....	54
Figure 23. Carte de la disponibilité des terres à la plantation du palmier selon le scénario 3.....	55
Figure 24. Planification nationale pour la plantation du palmier à huile au Mexique (2017– 2030)	58

Liste des tableaux

Tableau 1. Résumé des dispositions des régimes relatifs aux thèmes environnemental et social.....	12
Tableau 2. Définition des classes de végétation selon la méthodologie HCS.....	14
Tableau 3. Exemples de limitation de facteur pour la définition des classes d'aptitude de la terre.....	20
Tableau 4. Données utilisées.....	29
Tableau 5. Critères retenus pour la texture.....	36
Tableau 6. Critères retenus pour la profondeur.....	36
Tableau 7. Critères retenus pour les éléments grossiers.....	37
Tableau 8. Critères retenus pour l'hydromorphie.....	38
Tableau 9. Traduction des principes RSPO en termes de disponibilité des terres	39
Tableau 10. Pourcentage des terres convertibles en fonction des différents scénarios (%)	44
Tableau 11. Surface de plantation du palmier à huile selon les potentiels.....	52
Tableau 12. Surface de plantation du palmier à huile selon les scénarios.....	55

Liste des abréviations

ANIAME : Asociación de Industriales de Aceites y Manteca Comestibles A.C.

BH: Bilan Hydrique

CIRAD : Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement

DH : Déficit Hydrique => **DHA** : Déficit Hydrique Annuel

ETP : Evapotranspiration

FAO : Food and Agriculture Organisation

FFB : Fresh Fruit Bunches

GES : Gaz à Effet de Serre

HCS : High Carbon Stock

HCV : High Conservation Value

INEGI : Instituto Nacional de Estadística y Geografía

INIFAP : Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias

IRHO: Institut de Recherches pour les Huiles et Oléagineux

ISCC: International Sustainability and Carbon Certification

ISMO: Indonesia Sustainable Palm Oil

ISRIC: International Soil Reference and Information Centre

M ha: Millions d'hectares

P : Précipitation

PAHAL : Palmier à Huile en Amérique Latine

RSPO : Round Table on Sustainable Palm Oil

RU : Réserve Utile => **Ri** : initiale // **Rf** : finale

SAGARPA : Secretaría de Agricultura, Ganadería, desarrollo Rural, Pesca y Alimentación

SIAP : Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera

SIG : Systèmes d'Information Géographique

SMPO: Malaysian Sustainable Palm Oil

T : Température

UE: Union Européenne

WRB : World Reference Base for soil resources

Introduction

L'huile de palme est une commodité qui a trouvé son chemin dans tous les domaines, de la consommation alimentaire jusqu'au biocarburant. L'Asie du Sud-Est, son plus grand fournisseur, souffre des impacts dévastateurs de cette production sur ses forêts et ses communautés.

Néanmoins la demande mondiale croissante encourage la culture du palmier à huile à se développer dans d'autres continents, et plus précisément en Amérique Latine. Actuellement, ce continent ne produit que 6% de l'huile de palme commercialisée globalement (Naranjo, 2015). Mais étant donné que les terres disponibles pour l'expansion de la culture au Sud-Est de l'Asie sont limitées, l'Amérique Latine est en passe de devenir la prochaine frontière de la production mondiale de l'huile de palme ?

Les pays dans cette région sont bien conscients de leur potentiel. Par exemple, la Colombie qui est le plus grand producteur Sud-Américain a mis en place des plans pour multiplier par 6 sa production en moins de 5 ans (Balu *et al.*, 2015), tandis que le Pérou a déjà quadruplé sa production en 3 ans seulement entre 2000 et 2013 (Bello, 2015). De la même façon, le Guatemala, le plus grand exportateur de l'huile de palme d'Amérique Latine, a augmenté de plus de 10% par an la part des terres disponibles à la plantation du palmier durant les quelques années passées (Barrientos & Soria, 2019).

Devant les nombreuses critiques en défaveur de l'huile de palme et de ses impacts négatifs sur l'environnement en Asie du Sud-Est-, un des enjeux majeurs du développement de cette nouvelle culture en Amérique Latine est la durabilité de sa production.

Dans ce contexte, PalmElit, une société à actions simplifiées (SAS) qui conduit des programmes d'amélioration génétique et de mise en marché des semences de palmier à huile, a lancé le projet PAHAL (Palmiers à Huile en Amérique Latine) qui a pour but d'analyser les potentialités du marché de semences en Amérique Latine (Colombie, Pérou et Mexique). Il se base sur la prospection de la situation actuelle de palmiers à huile dans cette région et de ses potentiels de plantations futures respectueuses de l'environnement.

Pour mener ces recherches, PalmElit a commandité le CIRAD (Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement), un organisme de recherche recherche agronomique et de coopération internationale pour le développement durable des régions tropicales et méditerranéennes, pour l'aider à estimer le potentiel de production durable d'huile de palme au Mexique.

Dans le cadre du projet PAHAL, l'objectif de ce stage est d'évaluer le potentiel d'expansion spatiale de la production d'huile de palme au Mexique compte tenu des contraintes liées au standard de production durable : RSPO (Round Table on Sustainable Palm Oil).

L'estimation de ce potentiel repose sur l'analyse spatiale des espaces terrestres qui sont bioclimatiquement favorables à la culture et respectant les critères sociaux et environnementaux contenus dans le standard RSPO.

Cette analyse s'appuie sur les méthodologies et études déjà réalisées par le CIRAD dans le domaine de l'évaluation des potentiels agricoles (dont le palmier à huile) ainsi que des algorithmes que j'ai développés.

A partir de ces considérations, quatre parties sont développées pour aboutir à l'évaluation des potentiels de production durable du palmier à huile. Dans un premier temps, je m'attache à une mise en perspective théorique de la problématique du palmier à huile au Mexique et des normes qui prennent en considération les impacts environnementaux, sociaux et économique de cette culture.

Pour compléter la discussion académique, je décris ensuite les méthodes permettant d'estimer les différents potentiels de production. Puis je présente les résultats obtenus suite aux traitements. Enfin, je les discute à la lumière des approches théoriques étudiées tout en soulignant les limites de la méthode employée.

Partie 1 : Durabilité et Potentiel de production

1.1 Normes de durabilité

L'expansion de la plantation du palmier à huile a suscité de graves préoccupations environnementales telle que la déforestation tropicale qui a engendré une perte de la biodiversité comme l'espèce de l'orang-outan en Asie du Sud-Est (Simon *et al.*, 2019). Elle contribue également au changement climatique par le biais de la conversion des tourbières (Sumarga *et al.*, 2016) qui jouent un rôle essentiel dans la séquestration du carbone dans les sols.

De plus, cette expansion a parfois abouti à des abus sociaux et à des violations des droits de l'homme, sous la forme d'accaparement de terres par des sociétés de plantation aux dépens des communautés locales et autochtones ou d'exploitation des travailleurs.

La condamnation de ces abus par les ONG et la sensibilisation croissante des consommateurs aux effets néfastes de l'expansion des plantations de palmiers à huile ont conduit à l'élaboration de normes de durabilité.

1.1.1 Normes et standards de durabilité pour l'industrie du palmier à huile

Il existe plusieurs types de normes et standards de durabilité de l'huile de palme (Aubert *et al.*, 2016):

- Les standards internationaux d'initiative privée qui sont issus de consensus autrement dit des tables-rondes entre des parties différentes comme la RSPO (Round Table on Sustainable Palm Oil)
- Les standards nationaux des principaux pays producteurs qui sont des normes publiques mises en place par le gouvernement afin de garder le contrôle sur des secteurs économiques stratégiques pour les pays concernés. On peut citer : l'ISMO (Indonesia sustainable palm oil) et la SMPO (Malaysian sustainable palm oil)
- Les régimes volontaires de durabilité applicables à la production d'huiles végétales destinées à la production de biocarburants suivant la directive 2009/28/CE. Elle définit les caractéristiques des biocarburants fabriqués ou importés à l'UE pour répondre aux objectifs nationaux obligatoires en matière d'énergies renouvelables. Parmi ces initiatives volontaires, on a l'ISCC (International sustainability and carbon certification)

Bien qu'ils partagent le même principal objectif: une production durable d'huile de palme, ces standards manifestent des différences sur quelques points (**Tableau 1**).

Tableau 1 - Résumé des dispositions des régimes relatifs aux thèmes environnemental et social

Theme	Standard			
	RSPO	ISCC	ISPO	MSPO
Deforestation				
Biodiversity				
Peat land conversion				
GHG emissions				
Burning				
Air pollution				
Water pollution				
Rights & Wellbeing				
Land use rights				
Treatment of smallholders				
Forced and Child labour				
Terms and conditions of labour				

Note: Dark shading indicates that the standard provides the greatest restrictions on activities; pale shading indicates the fewest restrictions; mid-shade indicates an intermediate state.

Source : (Barthel *et al.*, 2018)

1.1.1.1 RSPO (Round Table on Sustainable Palm Oil)

Etabli en 2004, RSPO est un système volontaire mis au point dans le cadre d'un partenariat multipartite qui regroupe des acteurs de tous les secteurs de l'industrie de l'huile de palme. C'était le premier régime spécifique au palmier à huile. Il reste le système mondial le plus important du secteur avec ses 4 335 membres (RSPO, 2019).

La RSPO a développé 7 principes qui touchent à 3 grands piliers (RSPO, 2018) :

➤ La prospérité:

Cet axe a pour but de construire un secteur d'huile de palme durable, compétitif et résilient qui assure la viabilité à long terme de l'ensemble de la chaîne économique. Il se compose de 3 principes :

- Se comporter de manière éthique et transparente
- Opérer légalement et respecter les droits
- Optimiser la productivité, l'efficacité, les impacts positifs et la résilience

➤ Les personnes :

Ce volet appelle à la protection et le respect des droits de l'Homme. Il considère le secteur de l'huile de palme comme moyen de réduction de la pauvreté et la subsistance durable. Ces 3 principes sont :

- Respecter la communauté et les droits de l'Homme et apporter des avantages
- Soutenir l'inclusion des petits exploitants
- Respecter les droits et les conditions des travailleurs

➤ La planète :

Le 3^{ème} axe comprend un seul principe qui s'intéresse à la protection, la préservation et l'amélioration des écosystèmes pour les prochaines générations. Cela inclut la gestion durable des forêts, la lutte contre la désertification, l'arrêt de la perte de la biodiversité (Objectif de Développement Durable 15), la réduction des GES, le contrôle de la pollution de l'air et de l'eau...

Le dernier critère de ce principe (7.12) autorise le défrichement à condition qu'il ne provoque ni déforestation ni détérioration des zones à haute valeur de conservation (HCV) ou à stocks de carbone élevé (HCS).

1.1.1.2 L'approche HCV (High Conservation Value)

L'approche HCV a été développée pour la première fois par le Forest Stewardship Council (FSC) et a été adoptée en 1999 (Hoyle & Senior, 2014). Elle vise à identifier et protéger les valeurs environnementales et sociales dans les endroits où les paysages de production connaissent une expansion rapide.

Les zones HCV possèdent les caractéristiques suivantes (HCV Resource Network, 2017):

- HCV 1: une biodiversité biologique importante comme les espèces endémiques, rares ou en voie de disparition
- HCV 2 : les écosystèmes au niveau du paysage et les mosaïques d'écosystèmes
- HCV 3 : les écosystèmes et habitats rares, menacés ou en voie de disparition
- HCV 4 : les services écosystémiques dans des situations critiques comme la protection des zones de captage d'eau et le contrôle de l'érosion des sols
- HCV 5 : les besoins essentiels de la communauté (ex. pour leurs moyens de subsistance, santé).
- HCV 6 : les valeurs culturelles

Au niveau national ou mondial, on s'intéresse plutôt aux valeurs HCV 1 à HCV 4 et les HCV 5 et 6 sont à inclure au niveau local (HCS Approach Steering Group, 2015).

1.1.1.3 L'approche HCS (High Carbon Stock)

Cette approche est issue d'une collaboration entre Golden Agri-Resources (GAR), Greenpeace et The Forest Trust (TFT) en 2011 (Hoyle & Senior, 2014).

Elle est une méthodologie d'identification de zones de forêts naturelles, autrement dit les zones à stock de carbone élevé, dans le but d'éviter la déforestation et de protéger les « zones viables ». Ces dernières peuvent être des zones HCV, des tourbières et des territoires vitaux aux communautés locales.

Le principe de l'approche c'est de séparer des zones HCS (forêts naturelle) des zones non HCS (terres dégradées). Elle définit un seuil entre ces 2 types de régions selon 6 niveaux : forêt à haute densité (HDF : >75tC/ha, densité >50%), forêt à densité moyenne (MDF), forêt à faible densité (LDF), jeune

forêt en régénération (YRF), broussailles (S) et terres défrichées / dégagées (OL) (Greenpeace, 2013) (Figure 1, Tableau 2).



Figure 1. Stratification végétale (Adriani *et al.*, 2017)

Les critères adoptés pour la définition des forêts HCS se basent sur le stock de Carbone (Tableau 2), la taille de la tâche de forêt et le niveau de connectivité écologique de la forêt avec les autres tâches de forêt à proximité (continuité écologique, réservoirs de biodiversité).

Tableau 2 - Définition des classes de végétation selon la méthodologie HCS

Land cover classes		Trees with DBH > 30 cm	Canopy closure	Estimated molecular C t/ha	Comments
Forest	HDF	>50	>50%	>150	Dominated by trees with diameter >30 cm. Dominance of climax species, e.g. Dipterocarpus
	MDF	40-50/ha		90-150	
	LDF	30-40/ha		75-90	
YRF		15-30/ha	30-40%	35-75	Dominated by trees with diameter 10-30 cm and with higher frequency of pioneer species, e.g. Macaranga
S		5-15	<20%	15-35	Dominated by low scrub with limited canopy closure. Areas of tall grass and fern. Few trees which are predominantly pioneer species trees. Occasional patches of older trees
OL		0-5	0%	0-15	

Source : (Adriani *et al.*, 2017)

Il a été démontré que la connectivité peut parfois être plus importante que la taille du fragment pour le maintien des populations (Matesanz *et al.*, 2015). Cette insistance sur la connectivité vient du fait qu'elle permet le déplacement des individus entre les patches de forêts pour trouver les ressources dont

ils ont besoin, ce qui pourrait réduire la perte de biodiversité. En fait, si les individus peuvent entrer et sortir d'un territoire et se mélanger facilement avec d'autres individus du paysage, une plus grande diversité génétique sera maintenue, ce qui rendra la population plus résiliente et moins susceptible de disparaître localement (Laurance, 2004).

La méthodologie HCS implique 2 phases principales (HCS Approach Steering Group, 2015) :

- Classification de la végétation pour identifier les zones de forêts au moyen des images satellitaires et de données de terrain.
- Analyse et conservation des parcelles de forêt HCS, les zones HCV et les tourbières tout en respectant les droits et les moyens de subsistance des communautés. L'analyse se base sur un arbre de décision (**Figure 2**) qui donne lieu à une carte finale de conservation et d'aménagement du territoire.

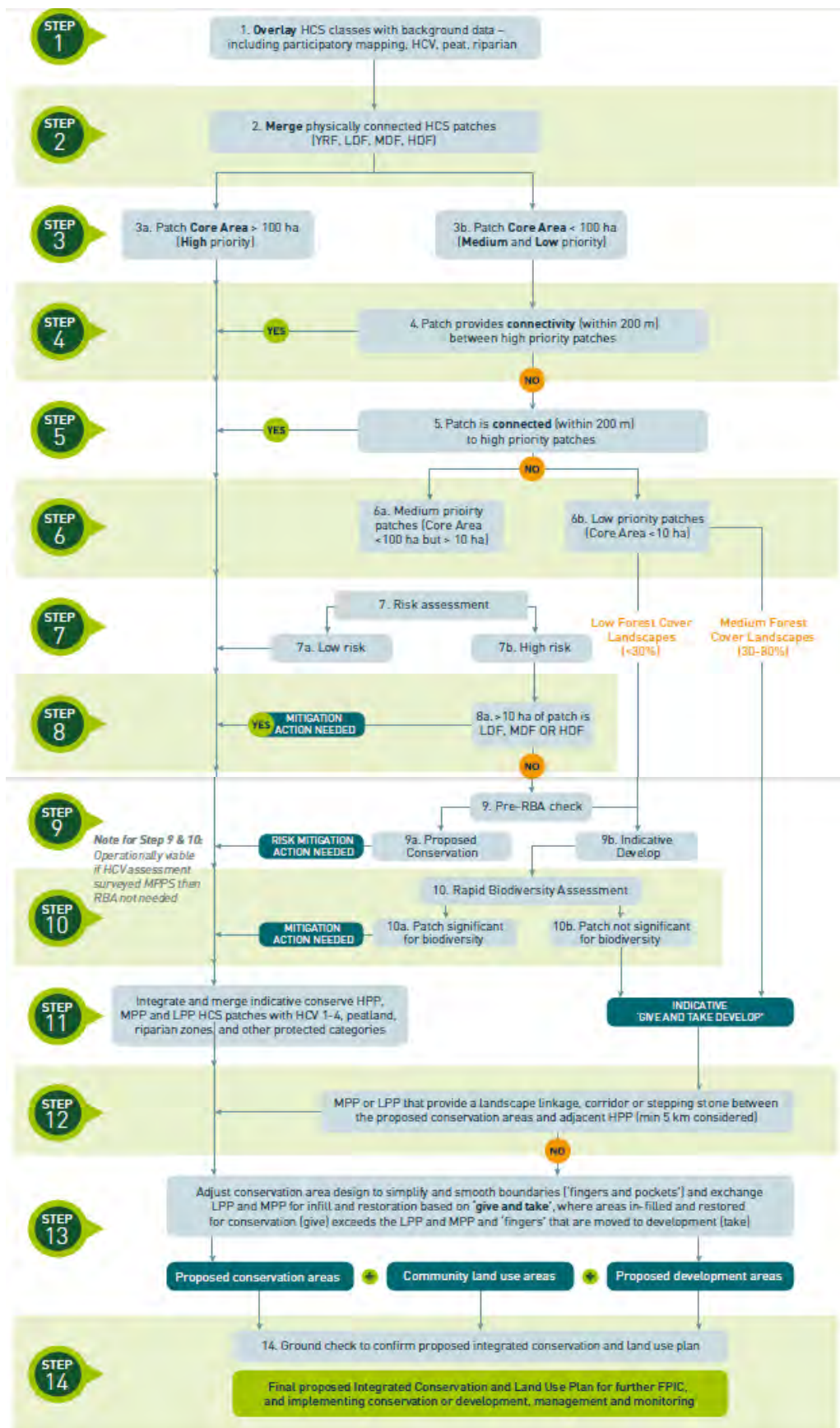


Figure 2. Arbre de décision d'analyse de patches HCS
Source : (High Carbon Stock Approach Steering Group, 2017)

1.2 Potentiels de production

Le potentiel de production est un élément clé pour l'évaluation scientifique de la production agricole.

Le potentiel est par définition « l'ensemble des ressources dont peuvent disposer un État, une collectivité, une entreprise, un individu dans un domaine déterminé » (Larousse, 2012).

La notion de potentiel de production suppose donc i) de localiser et quantifier les ressources nécessaires à la production, ii) d'identifier les agents susceptibles de mettre en oeuvre cette production et iii) d'évaluer leurs capacités à disposer de ces ressources et à les transformer en production.

Ainsi la question du potentiel apparaît-elle comme une combinaison complexe entre des capacités techniques (de l'Etat, du paysan local ou de l'investisseur étranger) et des règles locales d'accès aux ressources, dont le foncier et les contraintes environnementales.

Dans le cas présent la ressource principale recherchée est l'espace - ou la terre - apte à porter la culture du palmier à huile.

1.2.1 Types de potentiels

Dans la littérature, on distingue 3 grands types de potentiels (Batidzirai *et al.*, 2012) (**Figure 3**) :

- ❖ Potentiel théorique : défini comme la production maximale sous une gestion théoriquement optimale de l'agriculture et de la foresterie tout en prenant en considération les limitations résultantes de la température, de la radiation solaire et de la précipitation.
- ❖ Potentiel technique : désigne la fraction du potentiel théorique disponible selon les possibilités technologiques actuelles et en tenant en compte des restrictions spatiales dues à la compétition avec d'autres usages de la terre (alimentation humaine et animale, production de fibre...) aussi que d'autres contraintes non techniques. Une fraction de ce potentiel est appelée potentiel « écologiquement durable » quand les principales restrictions sont liées à des critères environnementaux comme la conservation de la nature et la préservation du sol, de l'eau et de la biodiversité.
- ❖ Potentiel économique (ou de marché) : fait référence à la partie du potentiel technique qui répond à des critères économiques selon des conditions déterminées. Une variante du potentiel économique peut-être implémentée dans un certain délai et dans un cadre socio-politique concret, prenant en compte les contraintes économiques, institutionnelles et sociales et les incitations politiques, est appelée potentiel d'implémentation.

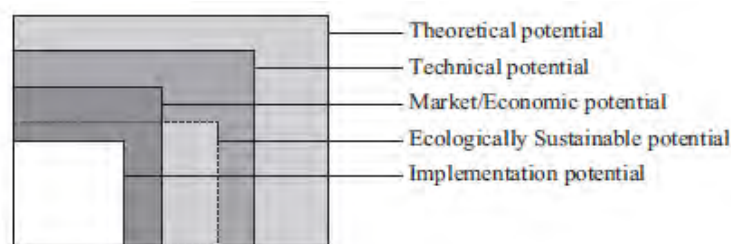


Figure 3. Chevauchements des potentiels théorique, technique et économique

Source : (Batidzirai *et al.*, 2012)

La définition des potentiels ne se limite pas à ce qui été mentionné précédemment. Plusieurs études analysent explicitement ou implicitement plusieurs types de potentiels. Par exemple, les types de combinaison suivants peuvent être identifiés : théorique et technico-économique. (Batidzirai *et al.*, 2012)

1.2.2 Méthodes d'évaluation des potentiels

Il existe plusieurs types de méthodologie qui évaluent les potentiels de production. Elles sont fonction du type de procédure adapté (quantitatif / qualitatif) ou de type de données (spatiales, statistiques...).

1.2.2.1 Approche théorique par le rendement énergétique

En conditions d'alimentation hydrique et minérale non limitantes, plusieurs auteurs ont pu établir, sur quelques espèces (80 cultures environ), une relation linéaire entre la matière sèche totale accumulée par le couvert végétal et la quantité d'énergie interceptée (Gosse *et al.*, 1986). A l'aide de telles relations, il devient alors possible d'estimer de façon simple le potentiel de productivité d'une zone terrestre donnée. La quantité théorique de matière sèche totale est ensuite transformée en rendement agricole introduisant ensuite des coefficients liés aux facteurs limitants du milieu (eau, sol, méthode de culture) et à chaque produit agricole final recherché (feuilles ou tige ou fruits ou graines).

Si cette méthode procède d'un raisonnement théorique lié au processus biophysique de transformation de l'énergie solaire en matière organique, il n'en reste pas moins que le jeu des facteurs limitants : eau, sol, méthodes de production, sont en général introduits de manière empirique d'après les observations et essais faits aux champs.

1.2.2.2 Approche statistique paramétrique et quantitative

Contrairement à la méthode décrite ci-avant, de nombreuses approches empiriques et statistiques ont été développées directement à partir d'observations faites sur des essais agronomiques et au champ. Ces méthodes expriment mathématiquement l'impact des propriétés de chaque paramètre limitant sur la performance de production de la terre. Prenons l'exemple de l'étude de (Morelle & Lejeune, 2000):

Dans leur étude, ils ont élaboré des cartes d'aptitude des terres à l'agriculture de point de vue rendement et facilité d'exploitation. Ils ont intégré des facteurs qui influencent l'exploitation telles

que : la distance par rapport aux terres exploitées, la pente, la texture du sol et la taille des blocs de terre. Ensuite, ils ont attribué un poids (varie entre 0 et 1,3) à chaque facteur en fonction de son influence. Cette pondération s'est faite en se basant non seulement sur la littérature mais aussi sur des échanges avec des experts et des observations sur terrains.

Et ils ont fini par l'utilisation d'un modèle empirique (équation (1)) qui multiplie l'aptitude des sols à l'agriculture (tirée de la carte des sols transformée et exprimée en quotas de 0 à 100) par les coefficients de pondération des facteurs pour former enfin la carte d'évaluation globale.

$$EG_i = A_{si} * C_{pi} * C_{ei} * C_{si} \quad (1)$$

où EG_i est l'évaluation globale pour le pixel i ;
 A_{si} , l'aptitude du sol à l'agriculture pour le pixel i ;
 C_{pi} , C_{ei} , C_{si} , les coefficients de pondération liés
 aux facteurs d'exploitation pour le pixel i .

1.2.2.3 Approche qualitative

Le principe de cette approche est de faire des classifications en se basant sur la qualité des paramètres comme la classification de l'aptitude de la terre de la FAO qui se base sur le principe des facteurs de limitation maximale. (**Tableau 3**)

Cette approche fournit des définitions conceptuelles de classes de capacité en fonction du degré de limitation de l'utilisation des terres imposé par leurs caractéristiques sur la base des propriétés permanentes. (De La Rosa, 2012)

Tableau 3. Exemples de limitation maximale de facteur pour la définition des classes d'aptitude de la terre

Suitability class	Land characteristics			
	Soil depth, cm	Texture	Salinity, mS/cm	Slope, %
S1. Very high	More than 120	Medium	0 to 2	0 to 3
S2. High	60 to 120	Medium to Heavy	2 to 4	3 to 8
S3. Moderate	30 to 60	Medium to Coarse	4 to 8	8 to 15
S4. Low	15 to 30	Coarse	8 to 10	15 to 30
N. Not suitable	Less than 15	Very Heavy	More than 10	More than 30

Cinq niveaux d'aptitude sont définis: très bonne (1), bonne (2), modérée (3), faible (4) et non adaptée (N).

Source : (De La Rosa, 2012)

1.2.2.4 Approche hybride

Elle combine l'approche qualitative et quantitative.

Elle commence par la sélection de zones potentiellement adaptées à l'aide de procédures qualitatives pour appliquer plus tard des méthodes quantitatives aux zones restantes potentiellement adaptées. (Van Lanen, 1991)

Partie 2 : Le palmier à huile au Mexique

2.1 Un cadre géographique favorable

2.1.1 Généralités

Le Mexique est l'un des plus grands pays d'Amérique Centrale, à la fois en termes d'étendue géographique et de population.

Sa superficie est de 1 964 375 km² (UN Data, 2015), peuplée par 123,5 millions d'habitants (2017). Il est composé de 32 entités fédératives : 31 Etats et la capitale fédérale (district fédéral : Mexico). (Central Intelligence Agency, 2017) (**Annexe1 : Figure 25**)

Ce pays est borné au nord par les États-Unis Américains et au sud par le Guatemala et le Belize, tandis que ses deux autres frontières sont des façades maritimes: l'océan Pacifique et le golfe de Californie à l'Ouest et le golfe du Mexique et la mer des Caraïbes à l'Est.

2.1.2 Relief

Le relief Mexicain s'organise autour d'un grand plateau central : le plateau mexicain ('Altiplano'). Il est entouré par 2 grandes chaînes de montagnes : la Sierra Madre Occidental à l'Ouest qui le sépare de la péninsule de Californie (où se trouve la Sierra de California) et la Sierra Madre Oriental à l'Est qui délimite les plaines côtières du golfe du Mexique. L'Altiplano se termine au sud par l'Axe Néo-volcanique qui traverse le pays d'Est à l'Ouest. Cet axe laisse place à une dépression qui le détache de la chaîne montagneuse Sierra Madre del Sur formant la côte du sud du Mexique avec une étroite bande de plaines côtières. Entre la Sierra Madre del Sur et l'isthme de Tehuantepec se trouvent la Sierra de Juárez et les vallées centrales d'Oaxaca. Au-delà de l'isthme, se dresse la chaîne de montagnes du Chiapas (Sierra de Chiapas) et derrière elle la plaine du Yucatán qui s'étend sur toute la péninsule. (**Annexe1 :Figure 26**)

2.1.3 Climat

Le climat du Mexique est caractérisé par de grandes différences régionales dues à sa topographie variable et à position géographique.

Le tropique du cancer divise le pays en zones tempérées et tropicales. Les terres situées au nord du 24^{ème} parallèle connaissent des températures plus basses pendant les mois d'hiver tandis qu'à son sud, les températures sont assez constantes tout au long de l'année et ne varient que selon l'altitude. Le nord du pays reçoit généralement moins de précipitations que le sud. (**Annexe1 : Figure 27**)

2.2 Situation du palmier à huile au Mexique

La culture des biocarburants témoigne d'une expansion accélérée au Mexique due au revenu économique qu'elle génère, au soutien gouvernemental pour les semis et à l'intérêt des petits producteurs pour l'introduction de cette plantation, en raison de l'échec d'autres activités productives (Castellanos-Navarrete & Jansen, 2017).

Pour le palmier à huile, la superficie consacrée à sa culture a augmenté de presque 70 fois dans 31 ans, entre 1985 à 2016, passant de 1 318 ha à 90 118 ha (**Figure 4**). Bien évidemment avec l'augmentation de la surface plantée, la production nationale aussi a augmenté de 1600 t (1985) à plus de 700 000 t (2016). (SAGARPA, 2017)

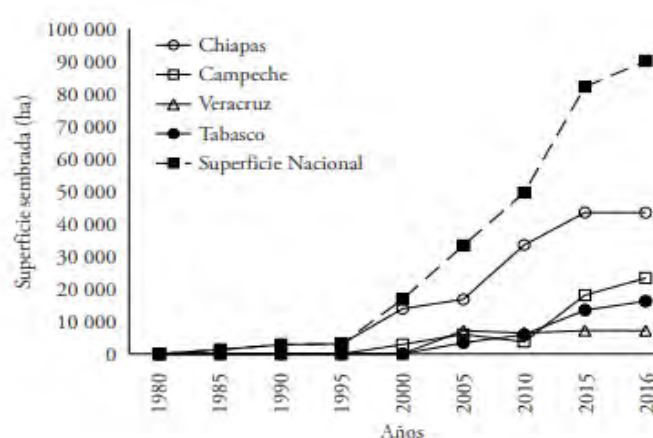


Figure 4. Augmentation des surfaces de palmiers à huile au Mexique durant la période 1980- 2016
Source : (Hernández-Rojas *et al.*, 2017)

2.2.1 Historique

La première plantation de palmier à huile au Mexique a été établie en 1952, dans la région de la côte du Chiapas, dans la communauté de La Lima. (Lesage, 2017).

Toujours à Chiapas, dans la région de Soconusco, 287 hectares ont été plantés en 1982 suite au programme « *alianzas para el campo* » du gouvernement fédéral.

Ce dernier, avec la SAGARPA (Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación) a élaboré, en 1996, un programme de plantations dans le sud et le sud-est du Mexique, avec des premières plantations en 1997, dans Chiapas et Campeche, auxquels les États Tabasco et Veracruz ont ensuite adhéré, en 1998 (De Leon, 2012).

Selon ANIAME (*Asociación de Industriales de Aceites y Manteca Comestibles A.C.*), le document relatif au système de production d'huile de palme a été signé le 25 juin 2003 et intègre l'ensemble de la chaîne agro-industrielle, formée par les quatre États producteurs mentionnés. (ANIAME, 2012)

2.2.2 Zones productives du palmier à huile

Les 4 États producteurs du palmier à huile sont concentrés dans de très grandes zones du tropique humide du Sud Sud-Est : dans la zone du Pacifique, est situé Chiapas ; dans la zone du Golfe du Mexique, on trouve les États de Veracruz et Tabasco et dans la zone de la péninsule de Yucatan se situe l'État de Campeche. (Annexe1 : Figure 25)

2.2.2.1 Chiapas

Le Chiapas est l'État qui a le plus de plantations du palmier à huile avec 43 443 ha (2016). Ces cultures sont concentrées principalement dans la municipalité d'Acapetahua où elles couvrent 19% de sa superficie (10 550 ha) (SIAP, 2017; INEGI, 2016) (Annexe1 : Figure 28.)

Selon une enquête menée par INIFAP pour déterminer les zones à potentiel productif de palmier dans l'État, Chiapas dispose de 558 187,81 hectares de bon potentiel et 399 569,40 hectares de potentiel moyen, ce qui représentent respectivement 7,6% et 5,4% de la superficie de l'État. Les zones de bon et moyen potentiel sont localisées dans les municipalités qui comprennent les régions de Soconusco, Istmo costa., Norte et Selva. (CEDRSSA, 2014) (Figure 5.)

Une autre estimation faite par la SAGARPA affirme que Chiapas a un potentiel de plantation de 900 000 ha (SAGARPA, 2004a).

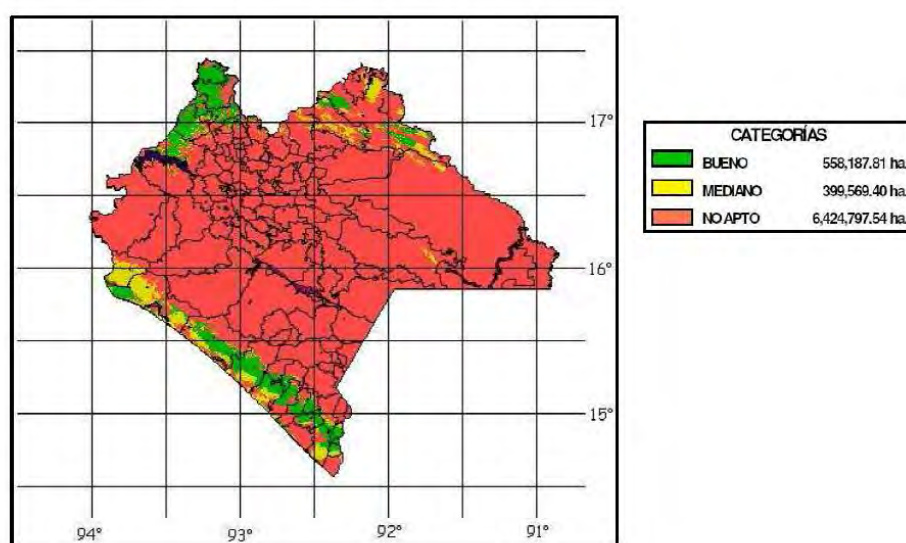


Figure 5. Carte de potentiels de plantation du palmier à huile à Chiapas
Source : De Los S.A., 2004

2.2.2.2 Veracruz

Le palmier à huile occupe une surface de 7151 ha de Veracruz. Cet Etat compte 17 municipalités productrices de cette plantation, dont la principale, en terme de superficie plantée, est Mecayapan avec 1415 ha (soit 4.7 % de sa surface) (SIAP, 2017; INEGI, 2016). (**Annexe 1 : Figure 29**)

Selon une étude de l'INIFAP (1997), dans le schéma directeur de l'Etat, deux zones présentant un potentiel de plantation de palmier à huile : Jáltipan et Los Choapas. Ces districts ont été divisés en quatre régions: Texistepec, Jesús Carranza, Las Choapas et Uxpanapa. (CEDRSSA, 2014) (**Figure 6**)

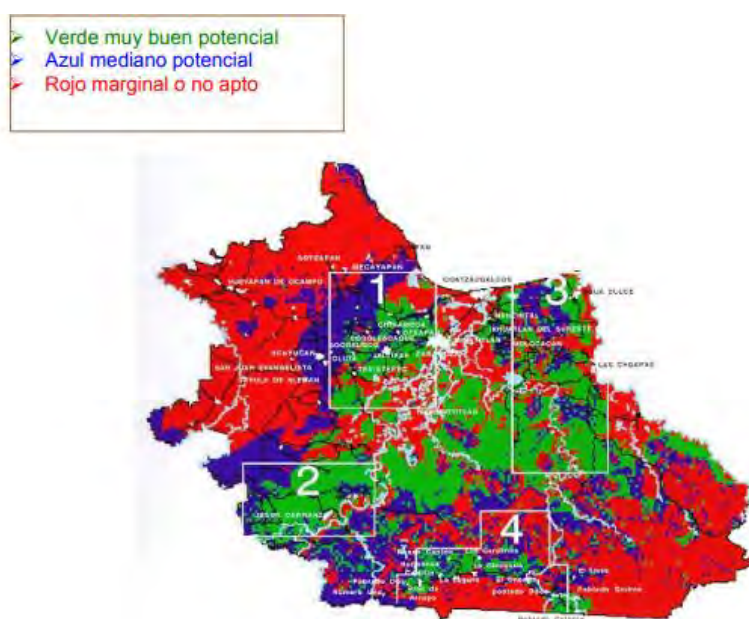


Figure 6. Carte de potentiels de plantation du palmier à huile à Veracruz

Source : (SAGARPA, 2004)

2.2.2.3 Tabasco

La superficie plantée par du palmier à huile à Tabasco est de l'ordre de 16 195 ha dont 4571 ha sont à Balancán (1.2% de sa superficie) (SIAP, 2017; INEGI, 2016) (**Annexe 1: Figure 30.**)

En 2016, cette municipalité est classée septième pour la superficieensemencée en palmiers du pays et première de l'État, avec une production de 12,61 t / ha (SAGARPA, 2017).

En 2008, une analyse des variables climatiques et édaphiques réalisée par SAGARPA a montré que Tabasco a une surface potentielle de 324 976 hectares pour la culture de palmiers à huile, distribuée dans 13 municipalités, mais concentrée dans 5: Macuspana (60 032 hectares); Huimanguillo (48 733), Jalapa (44 832), Centro (31 103) et Tacotalpa (29 484 hectares). (**Figure 7**)

Cette capacité de production est montée à 1 120 000 en 2017 (SAGARPA, 2017),

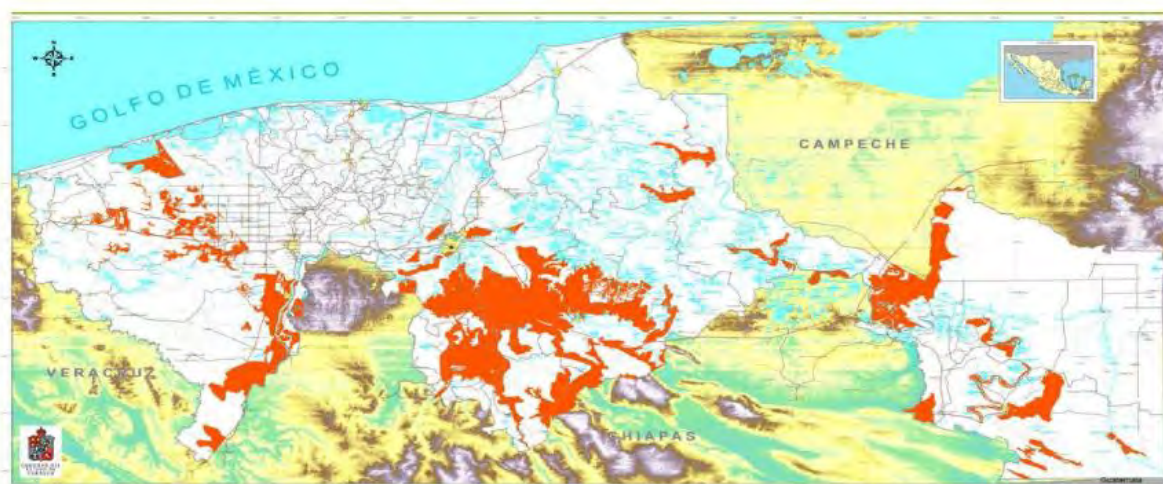


Figure 7. Carte de potentiels de plantation du palmier à huile à Tabasco

Source : (SAGARPA, 2008)

2.2.2.4 Campeche

L'Etat de Campeche détient des superficies de palmiers à huile de 23 328 ha dont la moitié est située à Carmen (11 342 ha) occupant 1.2% de sa surface. (SIAP, 2017; INEGI, 2016)

La municipalité de Carmen, Campeche, occupe le deuxième rang dans le pays sur la base de la superficie ensemencée en palmier à huile, avec une production de 11,37 t /ha. Au début de l'année 2000, cette municipalité était la première et son potentiel de semis de palmier à huile était plus de 140 000 ha (SAGARPA, 2017). (Annexe1 : Figure 31)

Le potentiel de production de Campeche est estimé à 700 000 ha (SAGARPA, 2017)

2.2.3 Impact du palmier à huile sur l'occupation du sol

Des études récentes (Vijay *et al.*, 2016) ; (Furumo & Aide, 2017) ont révélé qu'au Mexique les plantations de palmier à occupent des espaces déjà convertis à l'agriculture ou à l'élevage..

Ces études confirment l'analyse faite par (Hernández-Rojas *et al.*, 2017) dans les 4 municipalités les plus plantées (Carmen, Balancán, Mecayapan et Acapetahua) sur la période allant de 1980 à 2016. Ils ont montré que les zones actuellement couvertes par du palmier étaient utilisées principalement pour l'agriculture avec un taux qui dépasse les 90% (depuis 1990) contre 6% des forêts. (Figure 8)

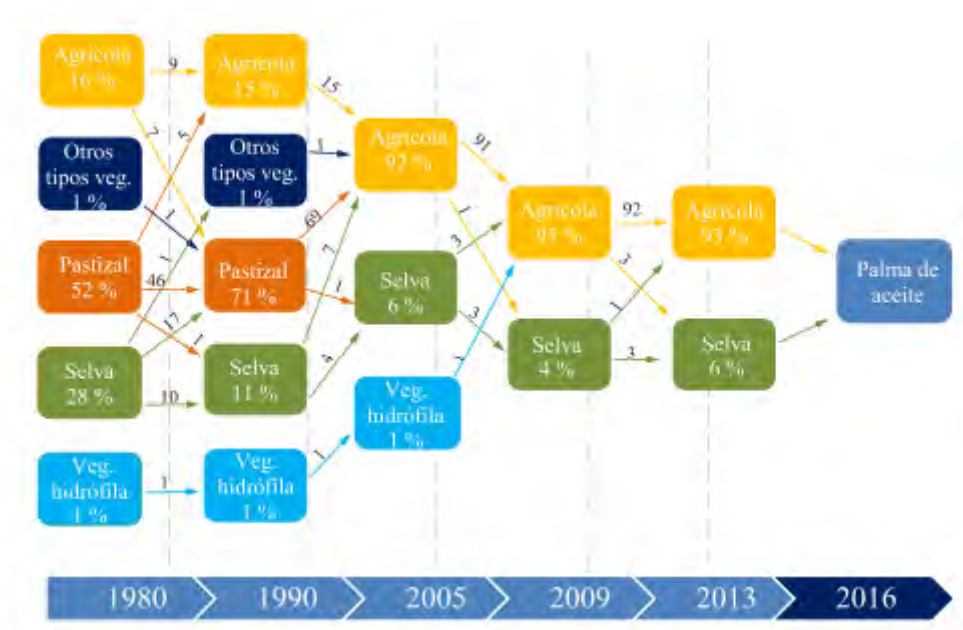


Figure 8. Matrice de la transition de la couverture (1980-2016) de la surface actuellement utilisée pour le palmier à huile dans les municipalités de Acapetahua (Chiapas), Balancan (Tabasco), Carmen (Campeche) et Mecayapan (Veracruz). Les flèches indiquent la direction du changement de la couverture et les chiffres noirs indiquent le pourcentage de changement

(Source : (Hernández-Rojas *et al.*, 2017))

Partie 3 : Méthodologie et données utilisées

3.1 Cadre général de l'évaluation

L'objectif principal du stage est d'évaluer le potentiel de production durable de palmier à huile au Mexique.

Le terme de potentiel fait expressément référence à des acteurs désignés et à leur capacité à disposer de ressources pour mener à bien une activité. Dans cette étude, les acteurs désignés sont les agriculteurs mexicains dans leur ensemble, sans distinction de leurs capacités techniques et économiques. Nous considérerons que les moyens financiers et techniques ne seront pas des facteurs limitants pour la mise en production. Nous considérerons que les acteurs disposeront de ces moyens et que la production de palmier est une activité aussi rentable que toute autre valorisation de la terre. Nous nous plaçons ainsi dans le cadre général d'estimation d'un potentiel technique selon les définitions données dans la littérature (Batidzirai *et al.*, 2012).

Ainsi, l'évaluation du potentiel durable s'attache principalement à :

1. Estimer les terres aptes à porter une culture de palmier à huile et en estimer les rendements
2. Evaluer sur ces espaces les restrictions spatiales dues aux normes de production imposées par le standard RSPO et à la compétition avec d'autres usages de la terre (en particulier l'élevage)
3. Cartographier les terres aptes et sans restrictions spatiales.

3.2 Démarche générale

L'approche adoptée dans cette étude est une combinaison de type géographique et « top-down ».

En effet, elle part d'une analyse globale des conditions climatiques et pédologiques de la plantation des palmiers à huile pour arriver à une délimitation des territoires d'insertion des producteurs selon les normes environnementales de durabilité de production de ces plantations.

Nous distinguons ainsi deux potentiels de production inspirés de l'étude de (Gazull *et al.*, 2015) :

- **Potentiel théorique (appelé aussi pédoclimatique) :** correspond aux espaces terrestres où les conditions pédologiques et climatiques du milieu satisfont les exigences de la culture concernée sans irrigation. Il représente un maximum biophysique de production et ne considère ni les occupations des terres, ni les usages, ni les usagers. (**Figure 9**)
- **Potentiel durable :** correspond à la portion du potentiel théorique qui peut être réellement mis en valeur compte tenu des restrictions spatiales dues aux normes de production imposées par le standard RSPO et à la compétition avec d'autres usages de la terre (en particulier l'élevage).

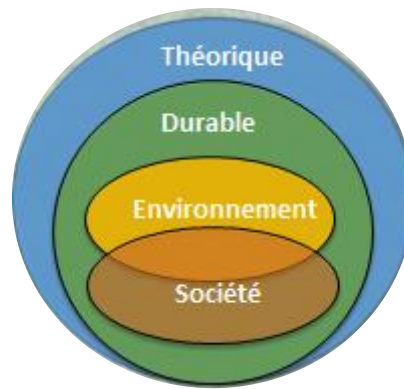


Figure 9. Les potentiels de production (théorique et durable)

L'évaluation de ces potentiels consiste à une suite de multiplication de matrices dont les valeurs varient dans un intervalle de « 0 » et « 1 » correspondant respectivement à une inaptitude à la plantation et une bonne aptitude en fonction de seuils fixés par la littérature (cf. **Cartographie du potentiel théorique**). Prenons le cas de ce paramètre :

```
pente_arr[pente_arr<=38]=1 #apte
pente_arr[pente_arr>38]=0 #inapte
```

Ces matrices sont à l'origine des rasters représentant les facteurs utilisés pour le calcul de chaque potentiel. La transformation de raster en matrice s'effectue avec python comme suit :

```
Rast=gdal.Open("./cnx.tif")#ouverture du raster
Arr=Rast.ReadAsArray().astype('float32')#transformation en matrice
```

D'ailleurs seulement quelques manipulations sont effectuées sur ArcGis ou Qgis comme le découpage, les zones tampon et le calcul de la pente. Sinon, tout le reste du traitement est fait sur python. Puisque la plupart de mes données sont en mode raster, l'utilisation de la bibliothèque Gdal est indispensable pour la lecture et la manipulation de ce type de donnée géo spatiale. Pareil pour Numpy qui est destinée à manipuler des matrices multidimensionnelles ainsi que des fonctions mathématiques opérant sur ces tableaux. De plus, différentes autres bibliothèques sont utilisées dans ce travail notamment Rasterio et Scikit-image.

La démarche générale se résume en (**Figure 10**) :

- Cartographie du potentiel théorique : délimitation des espaces aptes à la plantation du palmier dont les conditions climatiques (température, précipitation) et pédologiques (profondeur du sol, hydromorphie...) sont favorables.
- Cartographie du potentiel durable : application de la méthodologie HCS pour identifier les zones HCS en respectant les contraintes environnementales et sociales.
- Cartographie des taux de conversion des terres : identification des espaces utilisés pour des fins agricoles pour calculer le pourcentage de disponibilité des terres déjà retenues pour le potentiel durable.

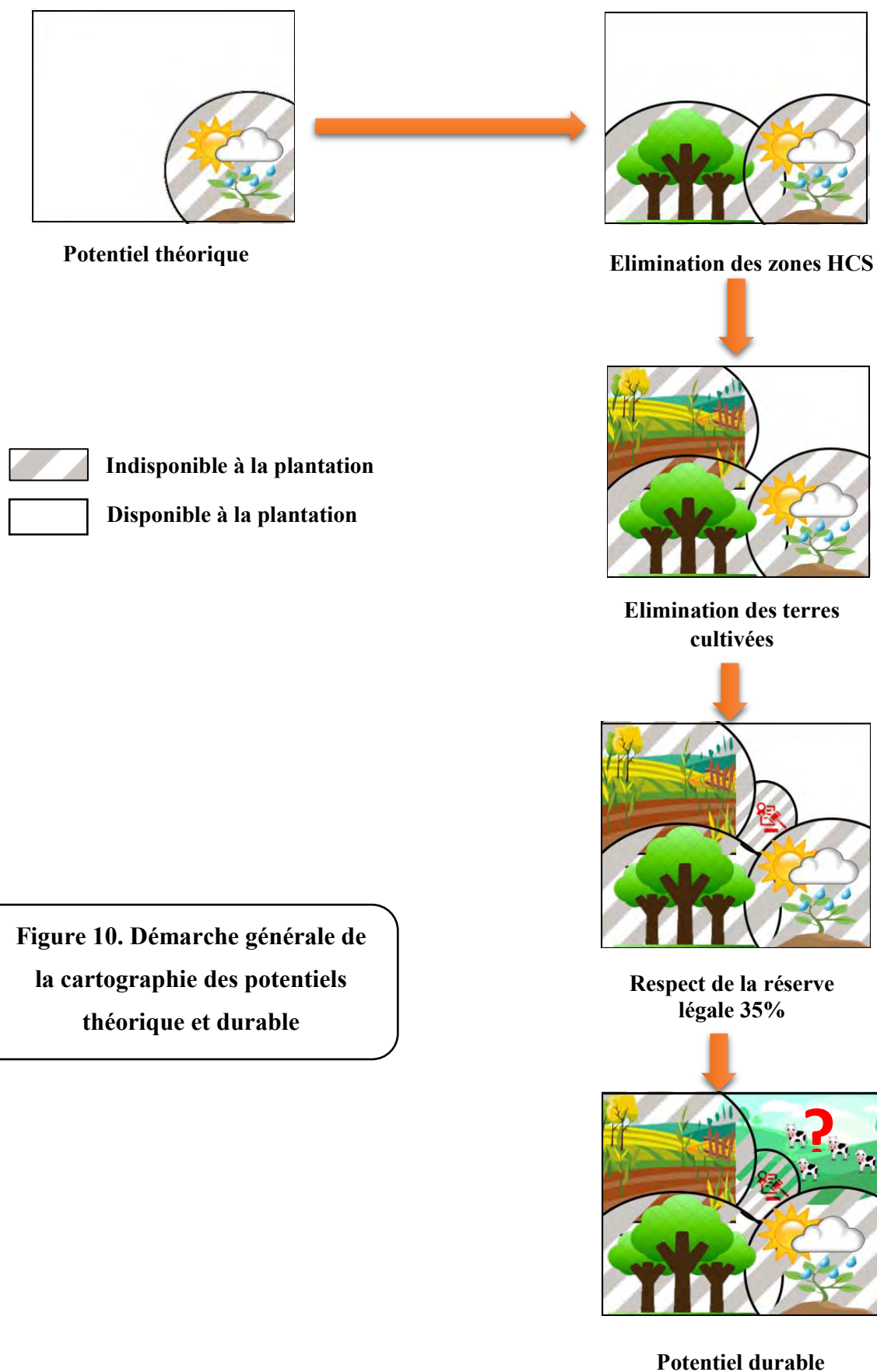


Figure 10. Démarche générale de la cartographie des potentiels théorique et durable

3.3 Données utilisées

Tableau 4. Données utilisées

Donnée	Utilité	Source	Type	Résolution	Origine	Date des données	Date de publication	Site		
Température maximale mensuelle moyenne (12 mois)	Contrainte T max	WORLD CLIM V2	Raster	1 km²	Mondiale	1970 - 2000	2016	http://worldclim.org/version2		
Température minimale mensuelle moyenne (12 mois)	Contrainte T min									
Température moyenne mensuelle moyenne (12 mois)	- Contrainte T moy - Le mois le plus froid									
Précipitation moyenne annuelle	Carte précipitation annuelle									
Précipitation mensuelle moyenne (12 mois)	Calcul déficit hydrique	CGIAR CSI V2					2019	https://cgiarcsi.community/2019/01/24/global-aridity-index-and-potential-evapotranspiration-climate-database-v2/		
Evapotranspiration mensuelle moyenne (12 mois)										
Réserve utile du sol	Contraintes liées sol	ISRIC					250 m	-	2017	https://files.isric.org/soilgrids/data/recent/
Profondeur du sol (2 m)										
Pourcentage des éléments grossiers (2 m)										
Texture (2 m)										

SRTM	Calcul de la pente	CGIAR CSI V4.1		90 m		-	2018	http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/
Déforestation	Calcul du potentiel durable	EARTHENGINE V1.6 (HANSEN)		30 m		2000 - 2018	2019	https://earthenginepartners.appspot.com/science-2013-global-forest/download_v1.6.html
Biomasse Globale	Calcul du stock du carbone	GLOBBIO MASS V3.0		100 m		2010	2018	http://globbiomass.org/wp-content/uploads/GB_Maps/Globbiomass_global_dataset.html
Paysage forestier intact	Calcul du potentiel durable	INTACT FOREST LANDSCAPES				2016	2018	http://www.intactforests.org/data.ifl.html
Aires protégées		WDPA V3.1				2016	2019	https://protectedplanet.net/country/MX
Limites administratives	Délimitation des Etats	GADM V3.6				2018	2018	https://gadm.org/download_country_v3.html
Routes	Routes fédérales (carte)	CONABIO (carte mondiale)				1985	2001	
Relief	Montagnes et vallées au Mexique (carte)	CONABIO	Vecteur			1992	2002	
Occupation des sols (série 5)	- Zones humides - Zones urbaines - Agriculture et pâturage - Caractérisation d'hydromorphie du sol	CONABIO (INEGI)		-	Nationale	2013	2015	http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/
Statistiques de production agricole	Calcul du pourcentage de la disponibilité des terres convertibles	GOB (SIAP)				2018	2019	http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php
Statistiques sur les surfaces de pâturage disponibles pour les bovins par Etat		GOB (SAGARPA)	Fichier Excel			2014	2016	https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio_2016/archivos/02_agrigan/D2_AGRIGAN04_06.pdf

3.4 Cartographie du potentiel théorique

Ce potentiel représente les terres où les conditions pédoclimatiques permettent une croissance normale du palmier à huile. Elles ne caractérisent pas une variété spécifique mais elles répondent plutôt aux exigences moyennes de cette plante dans les zones tropicales selon la littérature.

3.4.1 Les conditions pédoclimatiques

Comme leur nom l'indique, elles englobent deux types de conditions :

- **Conditions climatiques** : liées au climat telles que la température et les précipitations
- **Conditions pédologiques** : liées au sol comme sa texture, sa profondeur, son degré d'hydromorphie et le pourcentage des éléments grossiers y existant.

D'autres paramètres sont utilisées aussi dans cette étude, dépendant à la fois des conditions climatiques et pédologiques comme le déficit hydrique, ou ne dépendant ni de l'un ni de l'autre comme la pente qui est un paramètre topographique.

L'analyse s'est effectuée sur des rasters de résolution de 250m * 250m. C'est la résolution dominante des couches caractérisant le sol. Celles qui avaient des résolutions différentes ont été ré-échantillonnées selon des techniques d'interpolation bilinéaire puisqu'elles présentent des données quantitatives continues comme la précipitation, la température ou la pente.

3.4.1.1 Précipitation et déficit hydrique

L'alimentation hydrique est le facteur clé de la production du palmier à huile.

Pour atteindre son optimum, un hectare de palmiers a besoin d'une alimentation journalière en eau de 50 m³ soit plus que 1800 mm d'eau bien répartie par année (Jacquemard, 2011).

Mais le palmier peut pousser dans des conditions pluviométriques allant de 1000 mm et jusqu'à 5000 mm par an. (Pirker *et al.*, 2016)

L'encadré ci-dessous résume l'aptitude du palmier à pousser selon les conditions pluviométriques limites.

Pluviométrie moyenne annuelle limite

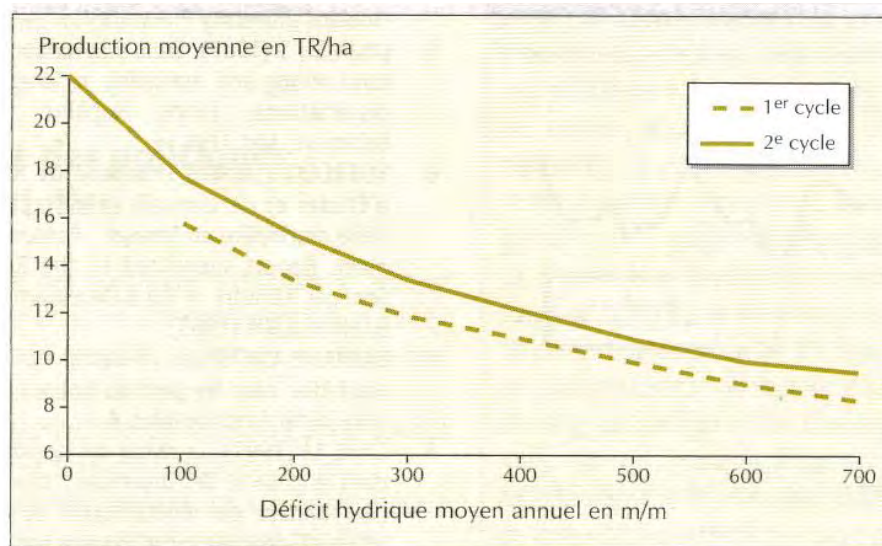
> 1200 mm : apte

< 1200 mm : inapte

L'autre facteur en rapport avec la pluviométrie et qui est aussi déterminant de la production de régimes de palmier est : le déficit hydrique qui représente la différence cumulée entre les besoins en eau de la plante (exprimés par l'évapotranspiration) et la disponibilité en eau (représentée par la réserve utile en

eau dans le sol et les précipitations mensuelles). Il est calculé suivant la méthode la méthode IRHO (cf. partie : Méthode IRHO IGM 12).

Ce paramètre traduit la sécheresse que peut subir le palmier et qui peut être exprimée en nombre de mois secs (nombre de mois en déficit hydrique). Ses effets sur la plantation peuvent aller de la baisse du rendement jusqu'à la mortalité. Des essais menés par le CIRAD montrent que la production décroît d'une manière presque linéaire avec le déficit en eau (Quencez, 1996). (Figure 11.).



Relation extraite des résultats obtenus en Côte d'Ivoire.

Figure 11. Relation du déficit hydrique et de la production
Source (Quencez., 1996)

Le palmier peut supporter jusqu'à 6 mois de sécheresse. Cela est observé dans des régions comme Nigeria, Benin et Colombie où le palmier pousse et produit même lorsqu'il est soumis à 6 mois de pluie < 100 mm. Au-delà de 6 mois, la zone est considérée comme inapte à la culture selon (Goh, 2000) sauf si elle a une accessibilité à une nappe phréatique comme le cas de Burundi où le palmier est présent dans des zones où le déficit hydrique peut aller jusqu'à 8 mois.

- **Calcul du déficit hydrique (Méthode IRHO IGM 12) :**

Pour calculer le déficit hydrique, la méthode IRHO repose sur le calcul du bilan hydrique mensuel (BH) où :

$$\text{BH du mois} = \text{Eau disponible} = R (\text{début de mois}) + P - \text{ETP} \quad (2)$$

Avec :

- R (début de mois) = réserve en eau du sol en début de mois = entre 0 et RU (réserve utile)
- P = pluie mensuelle (mm)
- ETP = Evapotranspiration potentielle (mm)

Ensuite, le déficit hydrique (DH) est calculé graduellement en commençant par une situation de sol saturé au premier mois, à savoir une initialisation de la réserve (R) au début du mois sur la valeur de la

RU. Il faut noter que le premier mois peut ne pas être obligatoirement janvier. On peut commencer par un autre mois selon les conditions climatiques de la région. Généralement on choisit le mois qui suit la saison des pluies pour s'assurer que le sol est saturé.

Après cela, on doit calculer la réserve initiale (R_i) des mois qui suivent. La R_i chaque mois représente la réserve de la fin du mois précédent (R_f). En fait, R_i prend la valeur de R_f si cette dernière est supérieure à zéro et dans le cas contraire, la R_i est mise à 0.

Enfin, DH représente le maximum entre zéro et la valeur absolue du BH lorsqu'il est négatif.

L'encadré ci-dessous exprime l'aptitude du palmier à pousser en fonction de la sécheresse.

Nombre de mois où $DH > 0$

≤ 6 : apte à la culture

> 6 : inapte à la culture

Le calcul du bilan hydrique et du déficit hydrique ont été effectués par le code python suivant :

```
#création d'une liste ordonnées des mois qui seront traités dans
l'ordre
# on commence par le mois d'Octobre, car c'est la fin de la saison des
pluies au Mexique
mois=[10,11,12,1,2,3,4,5,6,7,8,9]

#indicateur nb de mois
i=0
#boucle générale sur les 12 mois
for a in mois:
    i=i+1
    #ouverture des rasters de la précipitation (les fonctions utilisées
sont créées par moi, voir Annexe3 : Script1)
    P_rst=emna.openRaster("D:/results/clim/Mexique/precip/","P",a)
    P_arr=emna.RasterToArray(P_rst)
    #ouverture des rasters d'etp
    ETP_rst=emna.openRaster("D:/results/clim/Mexique/etp/","etp",a)
    ETP_arr=emna.RasterToArray(ETP_rst)

    # Calcul P - ETP
    PU = P_arr - ETP_arr

    #calcul RU initial ( $R_i$ )
    if (i == 1):
        Ri = RU_arr
    else:
        Ri = Rf

    #calcul Bilan hydrique
    BH = PU + Ri
    Rf = (PU < 0) * ((0 > BH) * 0 + (0 <= BH) * BH) + (PU
>= 0) * ((RU_arr < BH) * RU_arr + (RU_arr >= BH) * BH)

    # calcul deficit hydrique mensuel
    DH = (0 > (0 - BH)) * 0 + (0 <= (0 - BH)) * (0 - BH)
```

```
#Somme des DH pour créer DH_an (Deficit hydrique annuel)
if (i == 1):
    DH_an = DH
else:
    DH_an = DH_an + DH
```

3.4.1.2 Températures

La température est un facteur qui influence la croissance du palmier même si son effet sur le rendement et la production est difficile à quantifier.

En fait, (Ochs, 1977) affirme que pour avoir une croissance normale du palmier, il faut maintenir des minimas mensuels supérieurs à 18°C. Une information confirmée par (Quencez, 1996) qui ajoute que le palmier aura des désordres physiologiques s'il est exposé à des températures mensuelles basses (inférieures à 18°C). Il souligne le fait d'éviter de grands projets de plantation de palmiers dans des zones où le nombre de mois à température minimale inférieure à 18°C dépasse les 2 mois.

Néanmoins, le palmier peut survivre à plus de 4 mois de températures mensuelles minimales moyennes de 15°C. Cela était observé dans des zones au Burundi selon le Rapport IRHO du CIRAD (1980). Mais en situation optimale, il vaut mieux avoir des minimas moyens toujours supérieurs à 20°C d'après (Berthaud, 1992),

Selon (Goh, 2000), l'optimum pour une production commerciale est une température moyenne annuelle supérieure à 20°C (19.7 °C à Yangambi). Cet optimum peut être compris entre 24°C et 28°C (Corley & Tinker, 2015).

Des tests en laboratoire (phytotron) ont montré qu'après 4 mois :

- A 12°C de moyenne (17 jour / 7 nuit) : 8% des feuilles croissent
- A 17°C (22 jour 12 nuit) : 55%
- A 22°C (27 jour 17 nuit) : 98%
- A 27°C (32 jour 22 nuit): 100%

En plus, (Ferwerda, 1962) considère que des températures maximales journalières de 34°C et des minimales de 14°C sont exceptionnelles.

Et concernant les rendements, les meilleurs se trouvent dans les zones avec le minimum de variations annuelles de la température moyenne mensuelle : 1°C pour Malaisie et 3°C en Afrique de l'Ouest. Mais cela peut aller jusqu'à 4°C au Honduras et 6°C au Brésil (Baia) (Corley & Tinker, 2015). De même, dans les régions où la moyenne annuelle des variations quotidiennes de température (maxi - mini journalier) est entre 8 et 10°C.

Enfin, nous constatons bien que les seuils des températures moyennes -quelles que soient : minimales, moyennes ou maximales- varient d'un auteur à un autre. Alors, pour mon étude, je vais considérer des fourchettes pour chaque température en y appliquant des coefficients de baisse de rendement.

Critères retenus : Températures

- **Tmax mensuelle moyenne/an**
 $\leq 34^{\circ}\text{C}$: Rendement optimal
 $34^{\circ}\text{C} < \text{Tmax} < 38^{\circ}\text{C}$: - 5 % appliqué au potentiel de production optimal
 $> 38^{\circ}\text{C}$: Inapte (climat trop chaud)
- **Tmoy mensuelle moyenne/an**
 $\geq 25^{\circ}\text{C}$: Rendement optimal
 $20^{\circ}\text{C} < \text{Tmoy} < 25^{\circ}\text{C}$: - 10 % appliqué au potentiel de production optimal
 $18^{\circ}\text{C} < \text{Tmoy} < 20^{\circ}\text{C}$: - 40 % appliqué au potentiel de production optimal
 $< 18^{\circ}\text{C}$: Inapte (climat trop frais)
- **Tmin mensuelle moyenne/an**
 $\geq 22^{\circ}\text{C}$: Rendement optimal
 $20^{\circ}\text{C} < \text{Tmin} < 22^{\circ}\text{C}$: - 5 % appliqué au potentiel de production optimal
 $15^{\circ}\text{C} \leq \text{Tmin} < 20^{\circ}\text{C}$: - 10 % appliqué au potentiel de production optimal
 $\text{Tmin} < 15^{\circ}\text{C}$: inapte
- **Nombre de mois Tmoy mensuelle moyenne $< 18^{\circ}\text{C}$**
 ≤ 4 : Apte
 > 4 : Inapte (trop risqué)

3.4.1.3 Pente

La pente est un facteur aggravant du sol qui joue sur les conditions de drainage et la rétention de l'eau. Au-delà de 38% (20°), le sol est inapte à la plantation. (Corley & Tinker, 2015)

Pente

$\leq 38\%$: Rendement optimal
 $> 38\%$: Inapte

3.4.1.4 Sol

Le sol a un effet marquant sur le rendement. Des pertes pouvant aller jusqu'à 40% sont notées par l'IRHO et par (Goh, 2000) entre un sol optimal (sol volcanique riche) et un sol pauvre (vertisol).

Dans cette étude, les facteurs pris en considération sont : la texture, la profondeur du sol, la présence d'éléments grossiers et l'hydromorphie (**Tableaux 5, 6, 7 et 8**)

En fait, selon (Jacquemard, 2011), le palmier exige un sol de profondeur supérieure à 1 m (avec un optimum 2 à 3 m) et qui doit être meuble avec une texture plutôt sablo-argileuse (pas de textures extrêmes : sol trop argileux dont la teneur est supérieure à 80% ni composé de sable pur qui est totalement lessive). Cette plantation est sensible à la présence d'éléments grossiers

(> 2 mm comme les graviers, concrétions, cuirasses...) limitant la profondeur du sol et supporte très mal l'inondation car elle induit des conditions de sol anaérobies défavorable à son développement.

• Texture

Le **tableau 5** ci-dessous récapitule l'adéquation de chaque texture du sol à la plantation du palmier à huile. Cette caractéristique est tirée de la carte des textures des sols d'ISRIC et exprimée en classes allant de 1 à 5 (de parfaitement adéquat = 5 à non convenable = 1) selon (Pirker & Mosnier, 2015)

Tableau 5. Critères retenus pour la texture

Valeur	Nom	Label	Aptitude à la plantation du palmier *	Coefficient du rendement
1	Argile	Cl	3	0.8
2	Argile limoneuse	SiCl	3	0.8
3	Argile sableuse	SaCl	5	1
4	Loam argileux	ClLo	5	1
5	Loam argilo-limoneux	SiClLo	4	0.9
6	Loam sablo-argileux	SaClLo	3	0.8
7	Loam	Lo	4	0.9
8	Loam limoneux	SiLo	4	0.9
9	Loam sableux	SaLo	2	0.7
10	Limon	Si	4	0.9
11	Sable loameux	LoSa	2	0.7
12	Sable	Sa	1	0.6
255	Pas de données	NODATA	0	0

* 0 = inapte; 1 = défavorable; 2 = peu favorable; 3 = moyennement favorable; 4 = favorable; 5 = très favorable

• Profondeur

Le **tableau 6** ci-dessous présente la profondeur du sol selon la carte d'ISRIC.

Tableau 6. Critères retenus pour la profondeur

Profondeur de sol (cm)	Coefficient de rendement
> =100	1
75 - 100	0.9
50 – 75	0.8
25 – 50	0.6
<= 25	0

• Eléments grossiers

Le **tableau 7** ci-dessous présente le pourcentage des éléments grossiers dans le sol selon la carte d'ISRIC.

Tableau 7. Critères retenus pour les éléments grossiers

Éléments grossiers (%)	Coefficient de rendement
≤ 25	1
50% - 25	0.8
≥ 50	0.6

• Hydromorphie

Le **tableau 8** ci-dessous résume l'hydromorphie du sol (saturation régulière en eau, inondation). Elle est tirée de la carte d'occupation du sol de la zone étudiée et représentée par les zones humides (y compris les surfaces aquacoles, l'agriculture irriguée et humide, les mangroves...).

Autrement dit, je définis dans cette étude la présence d'inondation ou son absence par la présence ou pas de zones humide

Tableau 8. Critères retenus pour l'hydromorphie

Type d'inondation	Coefficient de rendement
Inondation permanente	0
Inondation temporaire	0.6
Pas d'inondation	1

La classe d'inondation temporaire a été virée du traitement car à priori les zones humides sont toujours en inondation permanente et elles sont dominantes dans ma zone d'étude.

Remarques :

- Les coefficients du rendement des différents paramètres liés au sol sont suggérés Laurent Gazull (chercheur au CIRAD Montpellier, 2019) en se basant sur son expertise.
- Les facteurs de baisse de rendement ont été traités par des scripts Python qui reclassifient les différents rasters selon les valeurs de leurs pixels.

3.4.2 Le calcul du potentiel théorique

3.4.2.1 Rendement pluviométrique

L'IRHO a établi une relation linéaire entre le déficit hydrique annuel moyen (DHA) et le rendement (RDT) dans les conditions optimales de croissance du palmier à huile.

En effet, le DHA est converti en valeurs de rendement « pluviométrique » théorique atteignable selon les études menées par le CIRAD et les données de PALMELIT qui s'échelonnent entre 0 t/ha/an et 38 t/ha/an de fruits frais (FFB) :

- $DHA < 50 \text{ mm} \Rightarrow RDT = 38 \text{ t FFB/ha/an}$
- $DHA > 50 \text{ mm} \Rightarrow RDT = 38 - 0.0378 * DH$
- $DHA > 1000 \text{ mm} \Rightarrow RDT = 0 \text{ tFFB/ha/an}$

3.4.2.2 Calcul du potentiel théorique

Le calcul du potentiel théorique se base sur l'application d'un facteur de perte de rendement en fonction des paramètres pédoclimatiques sur le rendement pluviométrique théorique.

Selon la loi du minimum de Liebig, ce facteur est pris égal au plus petit des facteurs de perte afin d'éviter les cumuls hasardeux entre les facteurs parce que d'une part les effets croisés des différents facteurs ne sont pas connus et d'autre part certains paramètres sont concomitants (période de sécheresse et de froid par exemple).

Ainsi, le rendement théorique potentiel (Yield_Theo) d'une zone donnée a été estimé selon la formule (3) suivante:

$$\text{Yield_Theo (tFFB/ah/an)} = \text{Yield_Pluvio} * \min (\text{P_Temp}, \text{P_Sec}, \text{P_sol}, \text{P_Pente}) \quad (3)$$

Avec:

- Yield_Pluvio = rendement pluviométrique théorique du palmier
- P_Temp, P_Sec, P_sol, P_Pente, = pertes de rendements dues respectivement à la température, au déficit hydrique, au sol et à la pente.

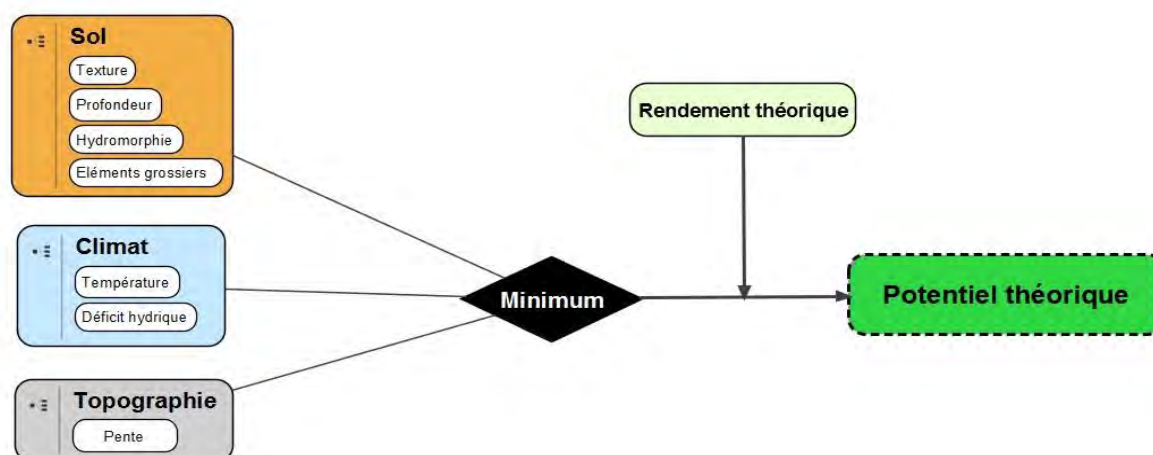


Figure 12. Paramètres impliqués dans le calcul du potentiel théorique

Au final, si le rendement théorique potentiel (Yield_Theo) est inférieur à 2 t FFB/ha, la zone est considérée inapte à la production d'huile de palme.

Le croisement des différentes informations géographiques s'est effectué sur Python.

3.5 Cartographie du potentiel durable

Ce potentiel représente la portion du potentiel théorique qui peut être réellement mis en valeur compte tenu des restrictions spatiales dues aux normes de production imposées par le standard RSPO (**Annexe 2 : Tableau 14**) et à la compétition avec d'autres usages de la terre (en particulier l'élevage). (**Tableau 9**).

Tableau 9. Traduction des principes RSPO en termes de disponibilité des terres

Principe RSPO	Contraintes spatiales pour une production durable du palmier à huile
Principe 1 : Transparence (Pas d'impact direct sur les terres disponibles)	
Principe 2 : Respect des lois et règlements	
Critère 2.1 Toutes les lois et réglementations locales, nationales et internationales ratifiées et en vigueur sont respectées.	Recensement de tous les documents, Recensement des documents de planification Les plantations ne peuvent s'établir sur des aires déclarées officiellement comme protégées
Critère 2.3 L'utilisation des sols pour les palmiers à huile ne diminue pas les droits légaux ou coutumiers des autres utilisateurs sans leur consentement libre, préalable et informé.	Ne pas planter dans des zones cultivées et prendre en compte les activités d'élevage dans les pâturages
Principe 3 : Engagement envers la viabilité économique et financière à long terme	
Critère 3.1 Un plan de gestion est mis en œuvre avec pour objectif la viabilité économique et financière à long terme.	Une étude durable qui garantit théoriquement au moins 2 t de régimes / ha.
Principe 4 : Utilisation des meilleures pratiques pertinentes	
Critères 4.3 Les pratiques minimisent et contrôlent l'érosion et la dégradation des sols.	Les plantations ne se font pas sur des zones de pente > 38% Les zones ripariennes, sont maintenues
Critères 4.4 Les pratiques maintiennent la qualité et la disponibilité de l'eau de surface et des nappes phréatiques	La culture est non irriguée. Elle ne se fait que dans les zones bioclimatiques favorables Les zones humides ne sont pas plantées.
Principe 5 : Responsabilité environnementale et conservation des ressources naturelles et de la biodiversité	
Critère 5.2 La conservation des espèces rares ou menacées est prise en considération dans les plans de gestion et les activités.	En l'absence de documents officiels définissant les corridors biologiques, seule la délimitation des aires protégées a été prise en considération Les plantations ne peuvent s'établir sur des aires déclarées officiellement comme protégées
Principe 6 : Prise en considération responsable des communautés affectées par la production du palmier à huile Cf principes 7.1 et 7.5	
Principe 7 : Développement responsable de nouvelles plantations de végétaux	
Critères 7.1 et 7.5 Prise en compte des risques sociaux et environnementaux négatifs dans le plan de zonage et d'exploitation : notamment déplacement et insécurité alimentaire locale	Respect des zones urbaines et d'une zone tampon de 5 km d'expansion de cette aire. Les terres cultivées ne sont pas convertibles en palmier..
Critère 7.2 Des études de sol et informations topographiques sont utilisées pour la planification de sites pour l'établissement de nouvelles cultures	Les sols hydromorphes, à engorgement temporaire ou permanent sont exclus des zones de plantation potentielles
Critère 7.3 Les nouveaux palmiers plantés n'ont pas remplacé des forêts primaires	Pas de plantation dans les forêts denses telles que définies par la méthodologie s HCS
Critère 7.6 La plantation extensive sur les terrains escarpés et/ou les sols marginaux et fragiles doit être évitée.	Pas de plantation sur des sols pentus (pente > 38%)
Critère 7.8 Aucune nouvelle culture ne sera plantée sur des sols riches en Carbone ou à forte capacité de stockage de Carbone	Les sols les plus riches en Carbone dans les pays étudiés sont les sols et les sols sous couvert forestier qui sont exclus (voir critères 7.2 et 7.3).
Critère 7.12 Le défrichement ne provoque pas de déforestation ou la détérioration des zones nécessaires à la protection	Application des standards HCS et HCV

Le potentiel durable est estimé par une soustraction géographique du potentiel théorique des zones interdites à la plantation selon l'approche HCS et des zones déjà occupées par d'autres usages difficilement convertibles (zones d'agriculture permanente, zones d'élevage, ..)

3.5.1 Méthodologie HCS

3.5.1.1 Principe général

La méthodologie HCS cherche à identifier les terres qu'il est possible de convertir en plantation de palmiers à huile sans dommage pour l'environnement et les populations locales. Elle se base sur la détermination des priorités de conservation des forêts au regard de leur niveau de carbone, leur intérêt écologique (selon la taille et la connectivité) et leur statut HCV (aire protégée, forêt rivulaire...).

3.5.1.2 Détails du traitement HCS

Tout le traitement se base sur l'arbre de décision de l'étude (GAZULL *et al.*, 2019) qui est une forme simplifiée de celui présenté par la méthodologie HCS (Rosoman & McWilliam, 2015). Cette modification réside dans le fait d'apporter la notion de « connectivité » à la proximité à cause de la taille des mailles des données utilisées dans cette étude qui ne permet pas de détecter les objets spatiaux au-dessous d'une distance de 300 m. De ce fait, j'ai ajouté une autre étape qui permet de traiter la connectivité (**Figure 13.**) grâce à un algorithme élaboré sur python (**Annexe3 : Script2**).

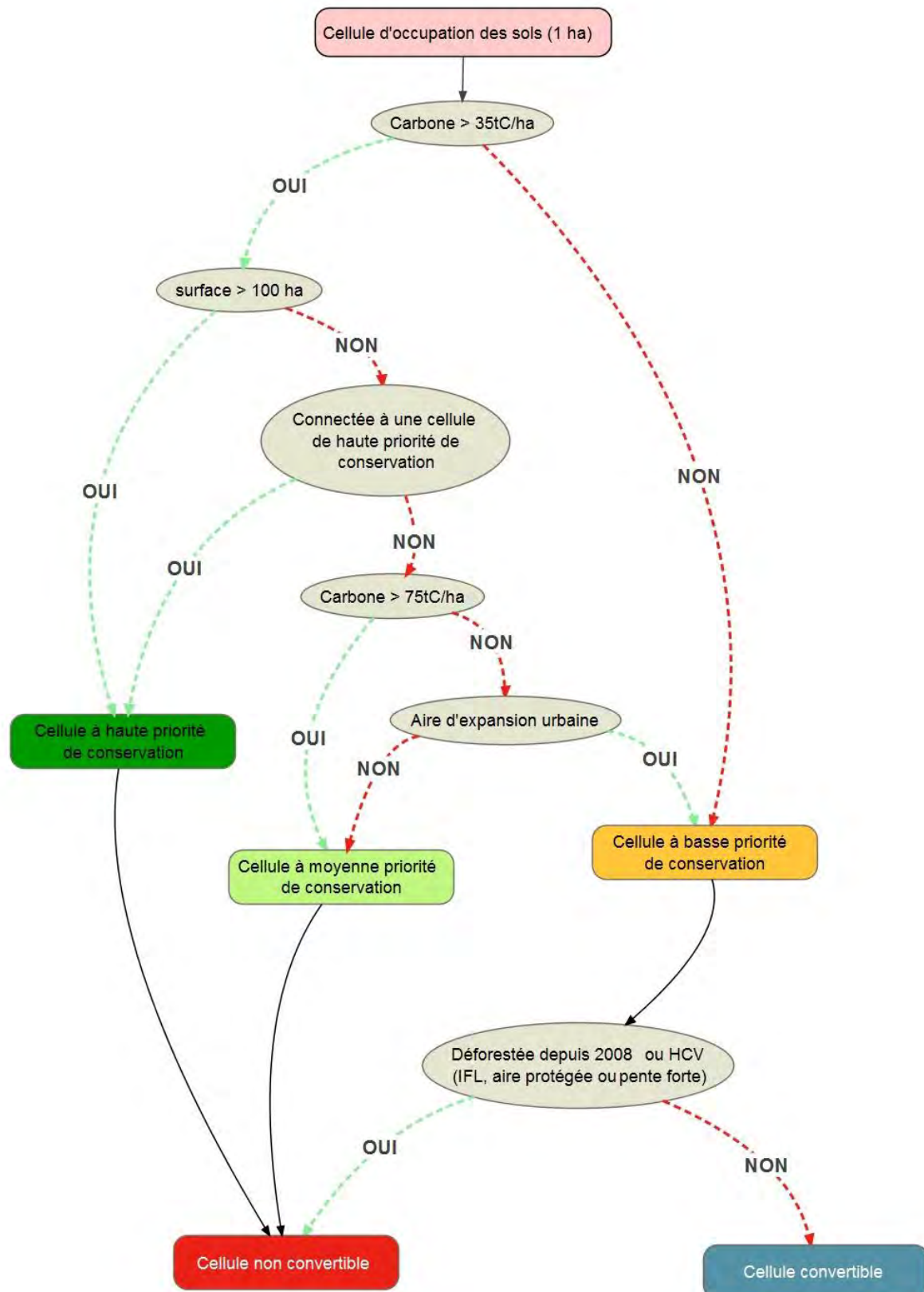


Figure 13. Arbre de décision de la méthodologie HCS

3.5.1.2.1 Préparation des données

Avant de commencer, il faut mentionner que la majorité des données dont je dispose sont en mode raster d'où la rastérisation de mes quelques couches vecteurs avec ArcGis. Et vu que le raster ne connaît pas la notion de « patch » ou de surface, l'analyse a été faite par pixel (voir Explication de l'analyse des connectivités par pixel).

Le stock de carbone a été estimé à partir de la couche de la biomasse en la multipliant par un facteur de 0.5 (car le bois comprend 50% de son poids en carbone (IPCC, 2000)).

En plus, toutes les données ont été rapportées à la résolution de la couche de la biomasse (100m *100m soit 1ha) ce qui va simplifier le travail lors de l'analyse des connectivités entre les forêts. (**cf. La prise en compte des connectivités.**)

De même, de la couche occupation des sols les zones urbaines ont été extraites avec une requête SQL. Une zone tampon de 2 km a été créée sous ArcGIS autour des agglomérations selon les critères de HCS.

La couche occupation des sols a servi aussi pour déduire la part libre et potentiellement convertible en palmiers, des terres déjà cultivées. Normalement, selon la méthodologie HCS on doit déterminer l'usage du sol (soit la part des cultures existantes) avec des entretiens avec la population locale (**cf. La prise en compte des usages de la terre et de la part potentiellement convertible).**)

3.5.1.2.2 Traitement

Le but de la méthodologie est d'identifier les zones HCS des zones qualifiées de « à faible priorité de conservation ».

Les zones HCS se présentent sous 2 types :

- des « zones à haute priorité de conservation » qui ont un stock de carbone élevé ($> 35\text{tC/ha}$) et couvrent de grandes surfaces ($\geq 100\text{ ha}$) ou des terres peu étendues qui y sont connectées.
- des « zones à moyenne priorité de conservation » qui n'ont pas de grandes surfaces ($< 100\text{ha}$) mais elles ont un stock de carbone qui dépasse 75 tC/ha et ne sont pas soumises à des contraintes sociales comme l'expansion urbaine.

Tandis que les zones à faible priorité de conservation correspondent soit à des terres pauvres en carbone aérien (taux de carbone inférieur à 35 tC/ha), soit à des terres moyennement riches en Carbone ($< 75\text{ tC/ha}$) et peu étendues avec une absence de connexion écologique avec des zones de haute valeur de conservation, soit à des terres à fort risque de conversion (situées dans un rayon de 2

km des zones urbaines), soit à des terres déjà utilisées (agriculture, élevage) et présentant une faible valeur de conservation (selon la norme HCV).

- **La prise en compte des connectivités**

Comme mentionné précédemment, j'ai choisi de travailler avec des rasters.

Alors pour étudier la connectivité existante entre les différents « patchs » de forêts, il faut chercher à traduire le « patch » en raster, ce qui donne un groupe de pixels voisins. La séparation entre les différents groupes se fait par des pixels dont la valeur est 0.

Quant à la connectivité, la méthodologie HCS la définit comme deux patchs dont les bords sont à moins de 200 m les uns des autres. Elle est identifiée par des patchs de basse et de moyenne priorité de conservation assurant une connexion entre les patches de haute priorité de conservation ou simplement, ils y sont connectés.

Et puisque la résolution des rasters utilisés pour cette étape est de 100 m * 100 m, la connectivité est déterminée alors dans un rayon de 2 pixels voisinant les patches de forêt en question.

Autrement dit, je pars des pixels constituant une forêt de haute priorité de conservation (100 pixels voisins ou plus dont la valeur est supérieure à 35) et je regarde leurs 2 pixels voisins dans tous les sens (Nord, Sud, Est, Ouest, Nord-Est, Nord-Ouest, Sud-Est et Sud-Ouest). Si la valeur des pixels trouvés dans ce rayon est différente de 0, ces derniers seront classés comme de haute priorité de conservation s'ils sont isolés (entourés par des 0), sinon, s'ils appartiennent à un groupe, tout le groupe sera également classé comme de haute priorité de conservation. (**Annexe1: Figure 32**)

- **La prise en compte des usages de la terre et de la part potentiellement convertible**

Une fois identifiées, les terres convertibles ne sont toutefois pas entièrement aptes à la plantation pour la raison qu'elles renferment souvent des terres utilisées pour l'élevage. Sur ces terres, le CIRAD impose de laisser un minimum de 35% de végétation naturelle qui ne pourra être convertie. Ce seuil de 35% est équivalent à celui utilisé en Brésil pour la conservation de la terre avant toute mise en culture (« Reserva Legal »). Il correspond au respect des corridors rivulaires, de protection des zones de captage, de protection des forêts sacrées, etc. qui resteront indisponibles à la plantation.

Sur les espaces restant, il est nécessaire de préciser que les terres cultivées ne sont pas disponibles à la conversion mais il est possible d'estimer la part que le palmier laissera à l'élevage. Elle dépend de la densité des bovins dans le terrain et de sa capacité de charge naturelle.

Afin d'estimer cette part, 3 scénarios d'intensification ont été étudiés (**Tableau 10**).

- **Scénario 1** : L'élevage reste extensif. On considérera néanmoins qu'une petite partie (15%) des pâturages pourra être convertie sans remettre en question les modes actuels d'élevage.
- **Scénario 2** : L'élevage est intensifié. 2 schémas d'intensification ont été dressés :
 - **Scénario intensif à minima** : l'élevage est intensifié jusqu'à la capacité de charge maximal des pâturages en leur état actuel. Elle est donnée par le ministère de l'agriculture. Cette intensification se fait sans modification du mode d'élevage et à moindre coût. Les surfaces libérées par cette intensification « naturelle » de l'élevage sont calculées en comparant la charge animale actuelle (donnée par les statistiques agricoles dans chaque commune) avec la capacité théorique de charge. Si la charge actuelle est inférieure, alors une partie des pâturages peut être libérée pour la plantation de palmiers. Si la charge réelle dans un état est supérieure à la densité théorique admissible, le pâturage est considéré comme utilisé à 100% pour l'élevage et ne présente aucune possibilité de conversion. Le pourcentage de surface libre est égal à : $1 - (\text{charge actuelle} / \text{capacité maximale})$. Par exemple : à Campeche la densité maximale théorique admissible de bovins par hectare est de l'ordre de 0.67 tête/ha. Alors que réellement, Campeche présente 0.13 tête/ha. Ce qui signifie que $1 - (0.13/0.67) = 80\%$ des pâturages peuvent être libérés.
 - **Scénario intensif doublé**: On considère que l'élevage peut être intensifié jusqu'à deux fois la capacité de charge naturelle, par une meilleure gestion des pâturages et par une complémentation animale si besoin. La mécanique de calcul est identique au scénario précédent. Et si je prends l'exemple de Campeche, la densité théorique admissible devient 1.34 tête/ha d'où l'augmentation du coefficient de surface libre à la plantation à 90%.

(Annexe 2 : Tableau 13)

Tableau 10. Pourcentage des terres convertibles en fonction des différents scénarios (%)

	Scénario extensif (%)	Scénario intensif (%)	
		A minima	Doublé
Cultures	0	0	0
Pâturages	100	0 - 81	0 - 90
Autres	100	100	100

L'attribution des différents coefficients s'est effectuée avec des requêtes SQL (**ci-dessous : scénario intensif doublé**) après avoir intersecté les pâturages avec les limites administratives des états.

```

CASE
WHEN "descripcio" LIKE ('AGRI%') THEN 0
WHEN "descripcio" LIKE ('PASTIZAL%') THEN
(CASE
WHEN "NAME_1" IN ('Aguascalientes','Durango','Guanajuato','Jalisco'
,'Michoacan','Morelos','Mexico','Nuevo Leon','Queretaro',
'Sinaloa','Tlaxcala') THEN 0
WHEN "NAME_1" LIKE ('San Luis Potosi') THEN 0.38
WHEN "NAME_1" LIKE ('Zacatecas') THEN 0.49
WHEN "NAME_1" LIKE ('Distrito Federal') THEN 0.53
WHEN "NAME_1" IN ('Hidalgo','Puebla') THEN 0.81
WHEN "NAME_1" LIKE ('Colima') THEN 0.28
WHEN "NAME_1" LIKE ('Nayarit') THEN 0.56
WHEN "NAME_1" LIKE ('Guerrero') THEN 0.84
WHEN "NAME_1" LIKE ('Tabasco') THEN 0.88
WHEN "NAME_1" LIKE ('Veracruz') THEN 0.86
WHEN "NAME_1" LIKE ('Yucatan') THEN 0.79
WHEN "NAME_1" IN ('Tamaulipas','Quintana Roo') THEN 0.89
WHEN "NAME_1" IN ('Campeche','Chiapas','Oaxaca') THEN 0.9
END)
ELSE 1
END

```

Partie 4 : Résultats

4.1 Potentiel théorique

4.1.1 Contrainte pluviométrique

La précipitation moyenne annuelle (**Figure 14**) est inférieure à 1200 mm dans la plupart du pays. A priori, tout le Nord Mexicain (à partir de Zacatecas) est inapte à la plantation du palmier à huile. En ce qui concerne le Sud, seulement les régions côtières surtout Tabasco, Chiapas, Veracruz, Oaxaca, Campeche et Guerrero sont susceptibles de fournir des conditions pluviométriques adéquates au développement ce type de plantation contrairement aux états continentaux comme Puebla, Querétaro...

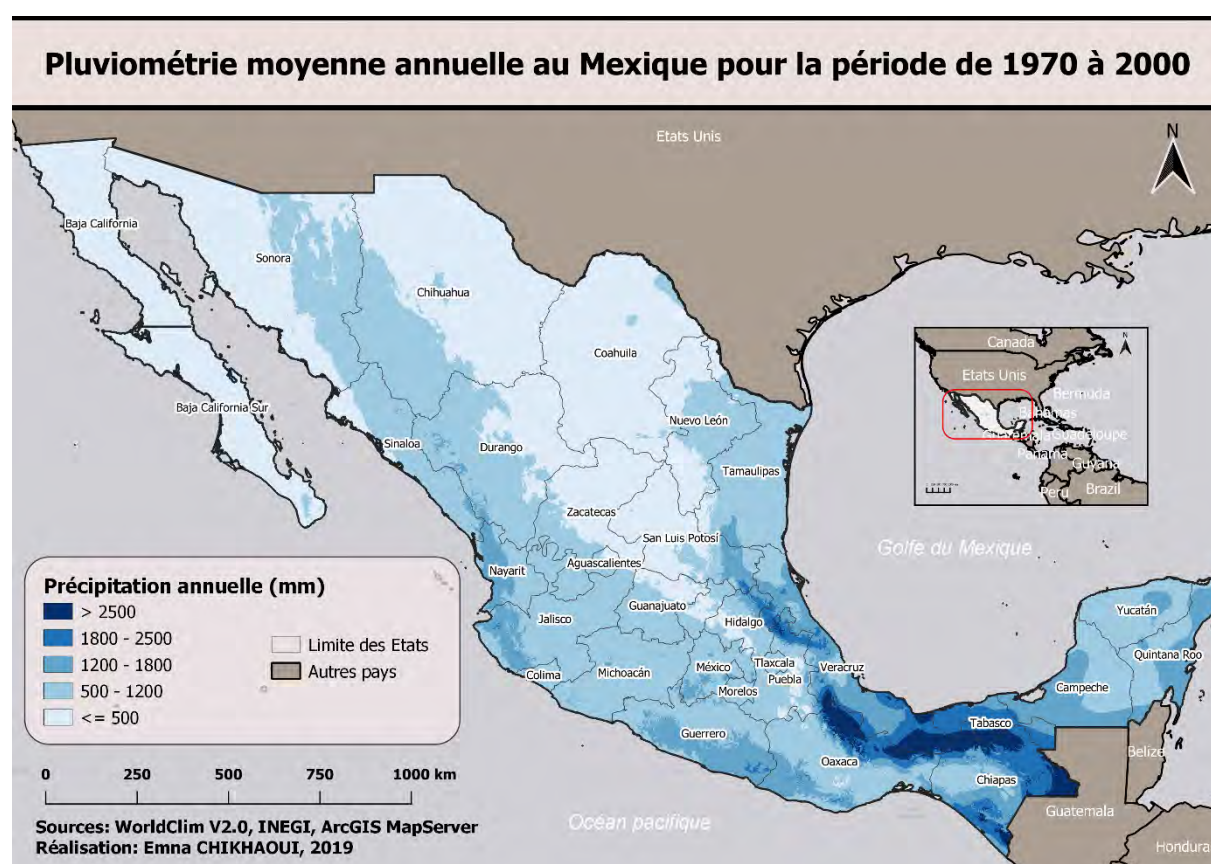


Figure 14. Carte de la pluviométrie moyenne annuelle au Mexique (1970 – 2000)

Les mêmes constatations ont été faites sur la carte du nombre de mois de sécheresse (**Figure 15**). C'est toujours la partie Sud du pays qui présente le moins de déficit hydrique et par conséquent une période de sécheresse qui est inférieure à 6 mois concentrée sur les mêmes états cités précédemment, auxquels on ajoute tous ceux qui sont sur le littoral Ouest (Michoacán, Colima, Jalisco, Nayarit) et une partie des états au littoral Est (Yucatán et Quintana Roo).

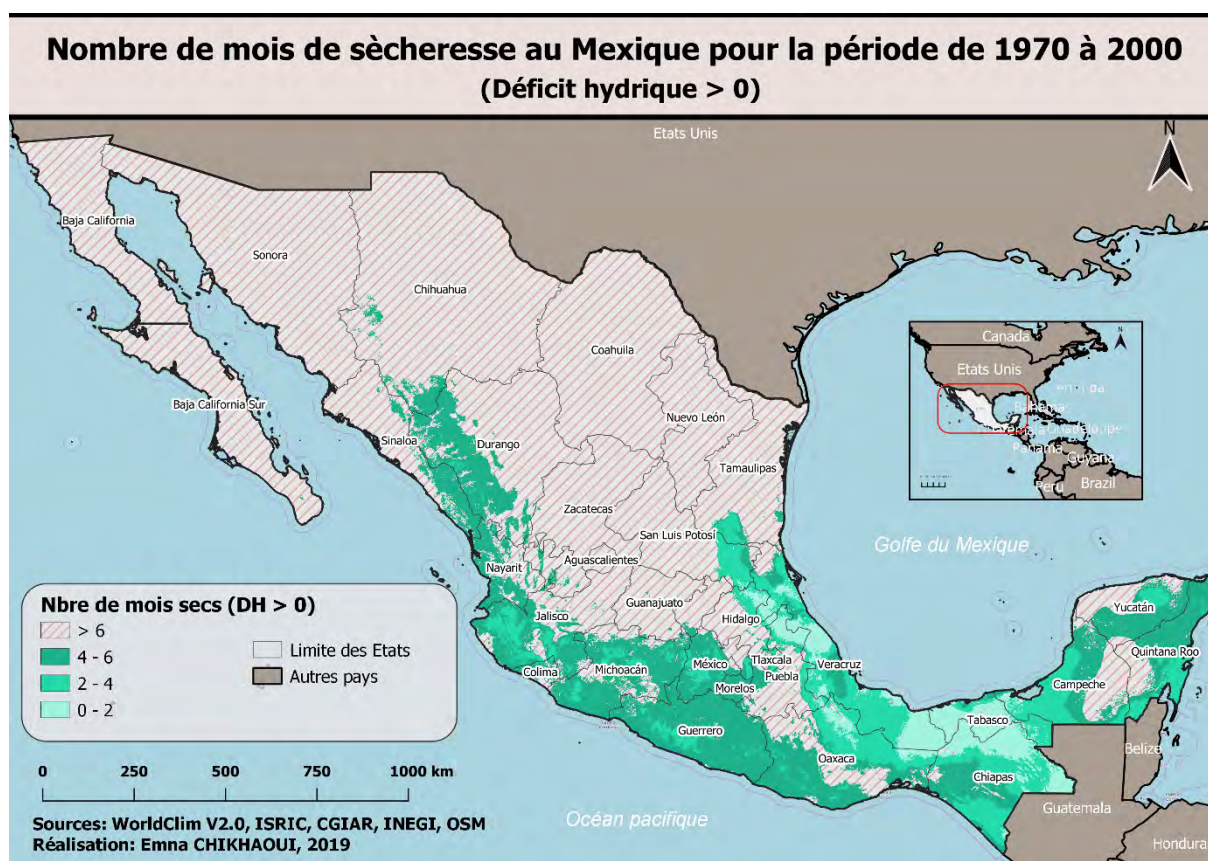


Figure 15. Carte du nombre de mois de sècheresse au Mexique (1970 – 2000)

4.1.2 Contrainte thermique

Les basses températures inhibent la croissance du palmier (Figure 16).

Et c'est perpétuellement le cas d'une grande surface du Nord Mexicain où le nombre de mois froids (températures moyennes mensuelles en dessous de 18°C) dépasse les 4 mois, à l'encontre du midi du pays notamment sur les côtes.

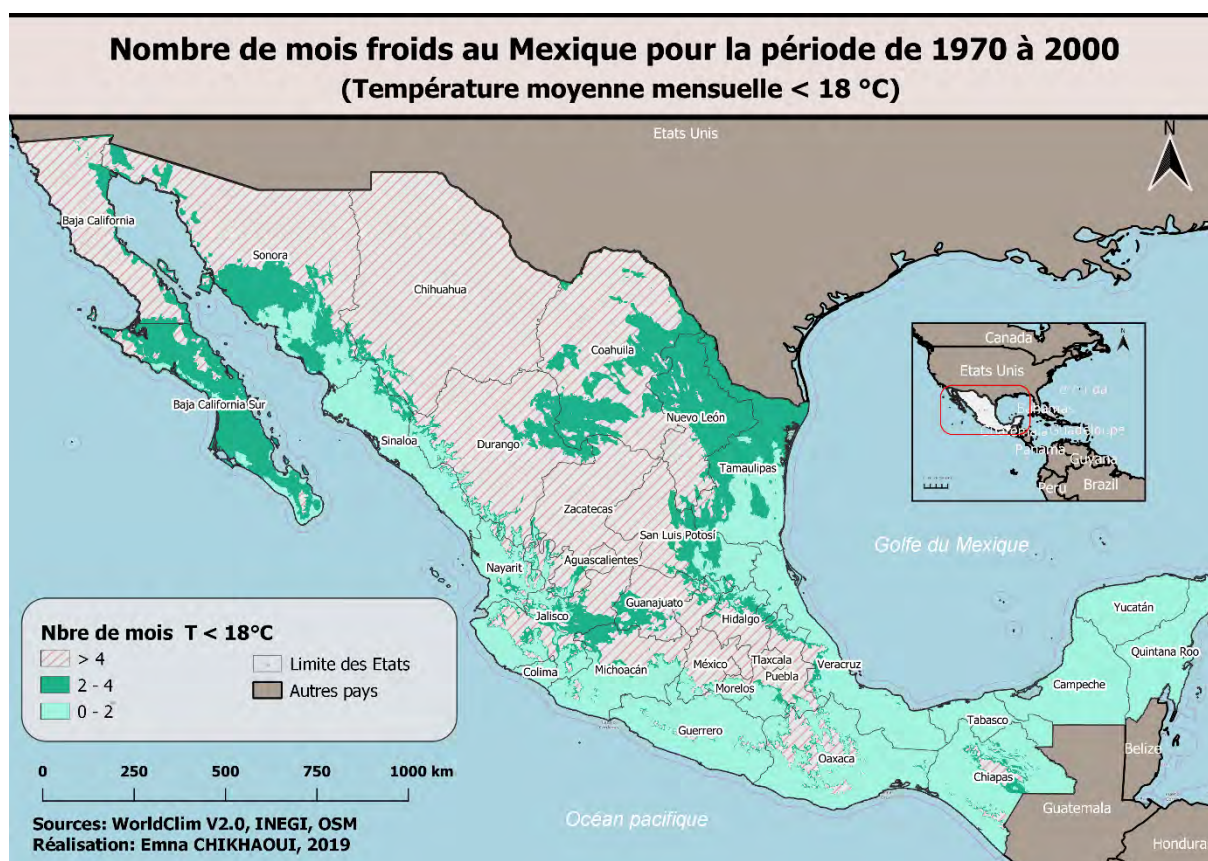


Figure 16. Carte du nombre de mois froids au Mexique (1970 – 2000)

4.1.3 Contrainte pédologique

La carte d'aptitude du sol à la plantation du palmier (**Figure 17**).

représentant le regroupement de la texture, la profondeur, l'hydromorphie et les éléments grossiers) montre que presque tout le Mexique est adapté à la plantation du palmier à huile avec une très bonne aptitude dans la partie Est du pays.

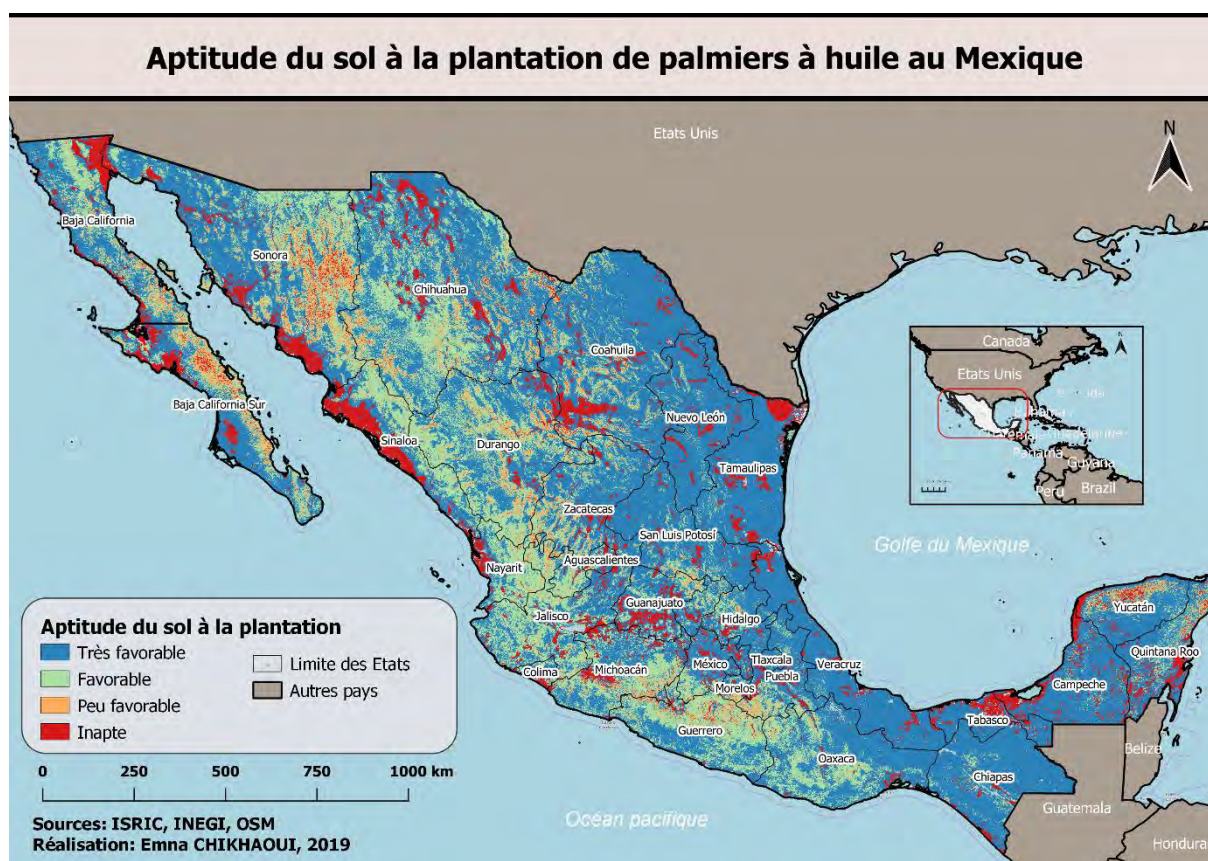


Figure 17. Carte d'aptitude du sol à la plantation du palmier à huile au Mexique

4.1.4 Contrainte topographique

La pente au Mexique ne présente pas de grande contrainte pour la plantation. D'après la carte de contrainte topographique (**Figure 18**), on peut planter du palmier presque partout sauf dans les zones séparant les côtes de la partie continentale comme tout au long de la limite occidentale de Veracruz et celle orientale de Nayarit et Sinaloa, la partie centrale d'Oaxaca, Guerrero, Nuevo León, etc.

Ces zones à forte pente correspondent aux 3 grandes chaînes de montagnes traversant le Mexique (Sierras Madres Orientale, Occidentale et del Sur).

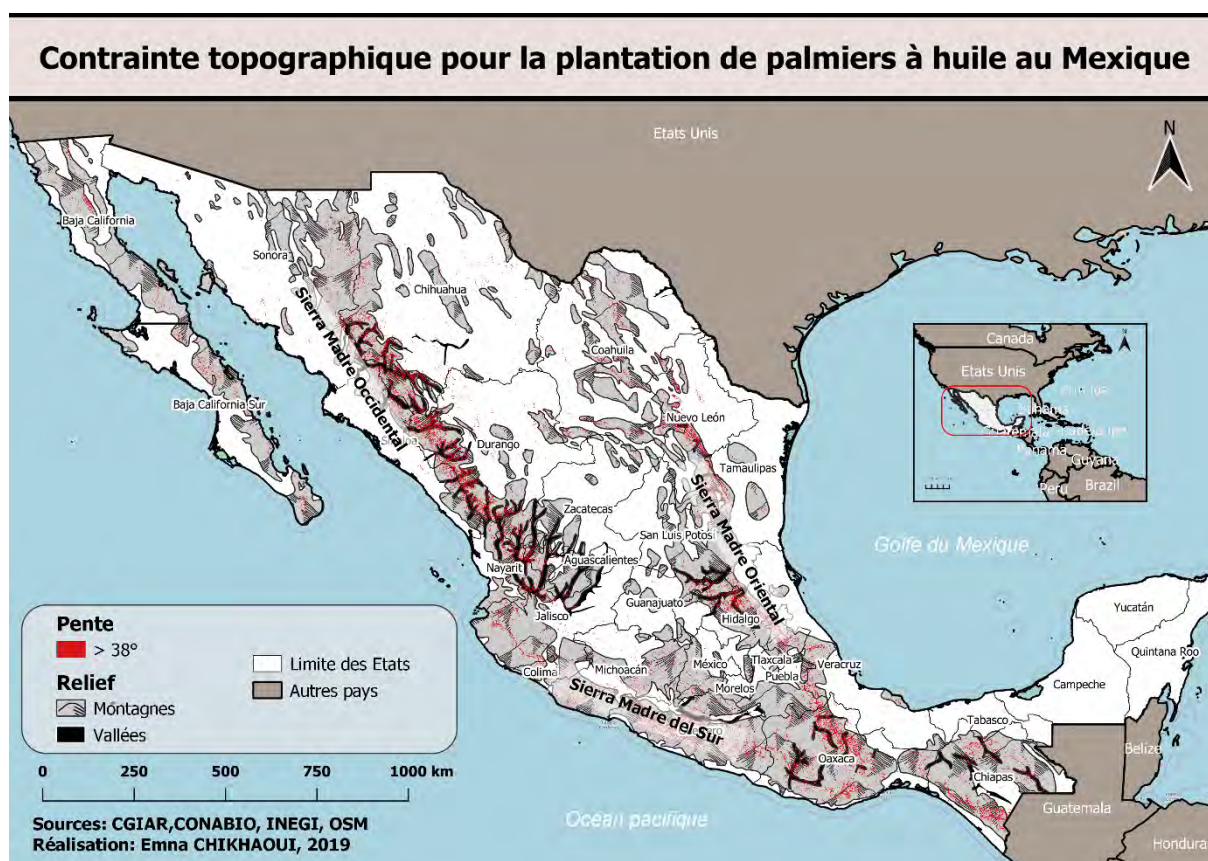


Figure 18. Carte de contrainte topographique pour la plantation du palmier à huile au Mexique

4.1.5 Potentiel théorique

La combinaison de tous les facteurs cités précédemment (sol, climat et topographie) donne le potentiel théorique de plantation de palmier à huile au Mexique (**Figure 19**). Il limite la zone d'étude à la partie Sud du pays et plus précisément aux bandes littorales Est et Ouest.

C'est là où la température est adéquate (moins de 4 mois froid), la pluviométrie est forte (dépasse les 1200 mm/an) et le déficit hydrique est faible (moins de 6 mois de sécheresse) ainsi que la pente.

Tandis que l'effet des contraintes pédologiques se manifeste au niveau de rendement qui le favorise au niveau de la côte Est (Tabasco, Veracruz) avec plus que 30 t FFB/ha. (**Tableau 11**)

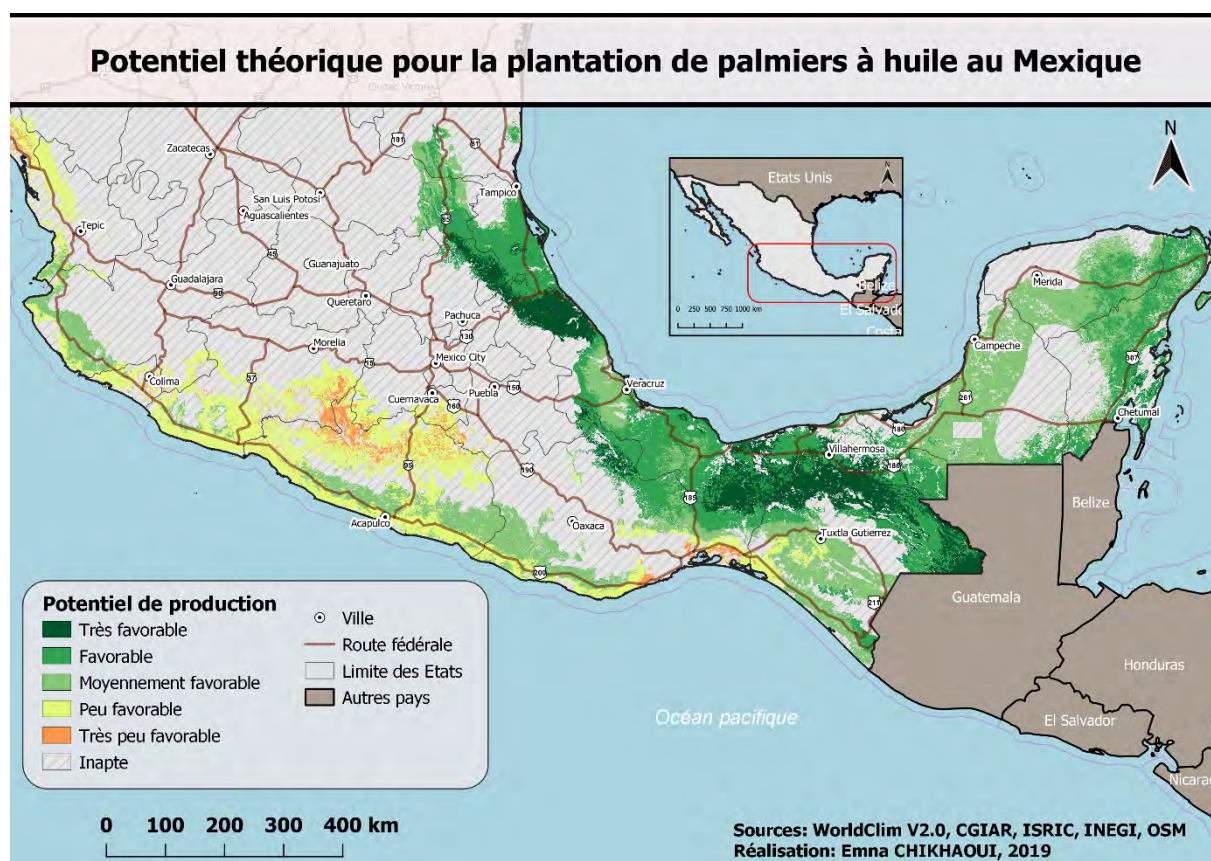


Figure 19. Carte du potentiel théorique pour la plantation du palmier à huile au Mexique

4.2 Potentiel durable

4.2.1 Potentiel durable

Le potentiel théorique de plantation du palmier est limité à la partie Sud du pays, c'est pour cela que la suite des traitements était réalisée seulement sur cette partie.

L'extraction des zones à conserver selon la méthodologie HCS (zones protégées, les paysages forestiers intacts...) (Annexe1 : Figure 33) des superficies théoriquement convertibles en palmiers à huile, a permis d'élaborer la carte des régions disponibles à la plantation selon les standards de durabilité (Figure 20).

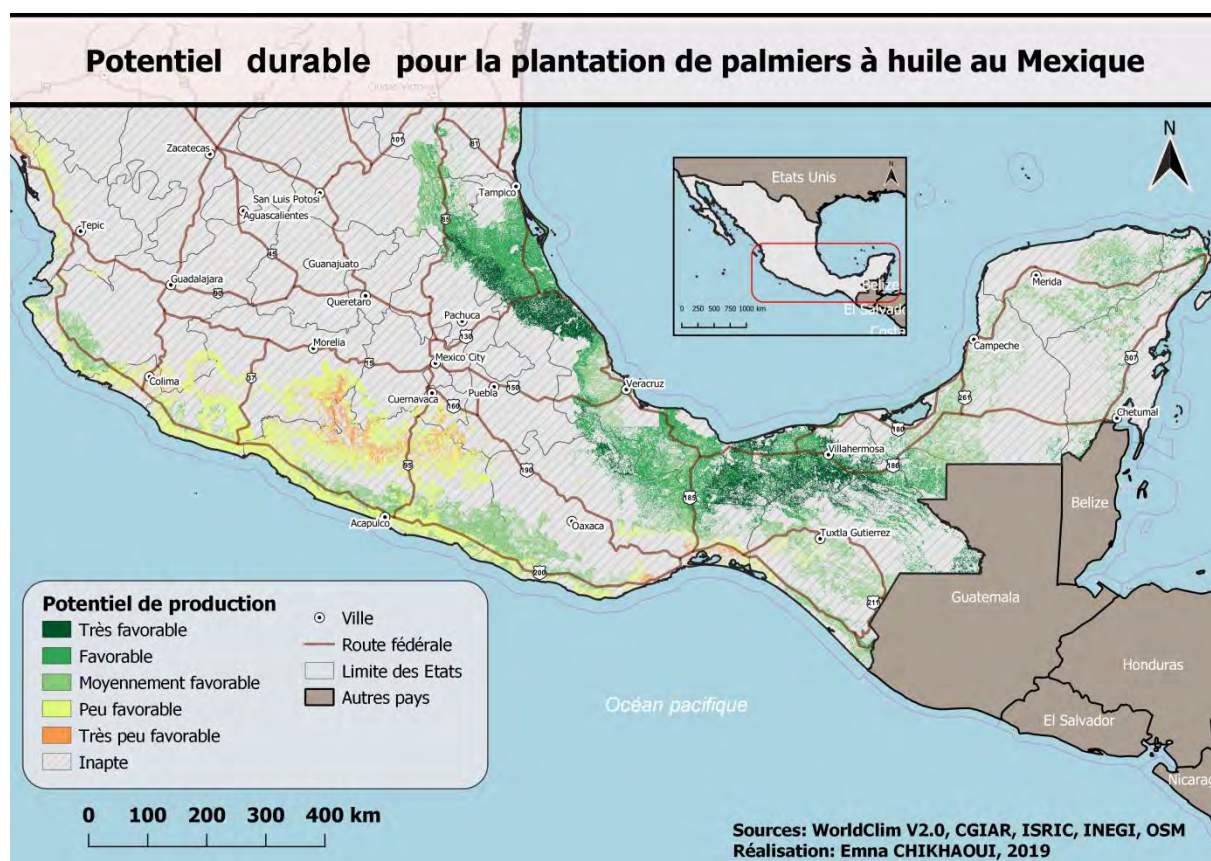


Figure 20. Carte du potentiel durable pour la plantation du palmier à huile au Mexique

Une réduction des surfaces de plantation de palmiers à huile était remarquée dans les zones à fort rendement comme Veracruz et Tabasco suite à l'élimination des zones protégées y existantes. De même, pour Chiapas, Yucatán, Quintana Roo et Campeche qui abritent des énormes forêts tropicales. (Tableau 11)

Tableau 11. Surface de plantation du palmier à huile selon les potentiels

Classe de rendement	Très favorable	Favorable	Moyennement favorable	Peu favorable	Très peu favorable	Total
Rendement (T FBB / ha)	30 – 38	20 – 30	10 – 20	5 – 10	2 – 5	-
Surface en millions d'hectares (M ha)						
Potentiel théorique	4.55	11.53	13.60	8.38	1.06	39.12
Potentiel durable	2.45	5.10	5.35	5.15	0.64	18.69

4.2.2 Pourcentage de la surface de plantation

La disponibilité des terres convertibles en palmiers est fonction de l'occupation des sols. En fait, le pourcentage de plantation varie selon les cultures existantes et les pâturages.

4.2.2.1 Scénario 1 : Elevage extensif

Avec ce scénario, la majorité des terres à Veracruz, Tabasco, Campeche et Chiapas ne sont plantables qu'à 10% puisque les pâturages occupent de vastes étendues dans ces états (**Figure 21**).

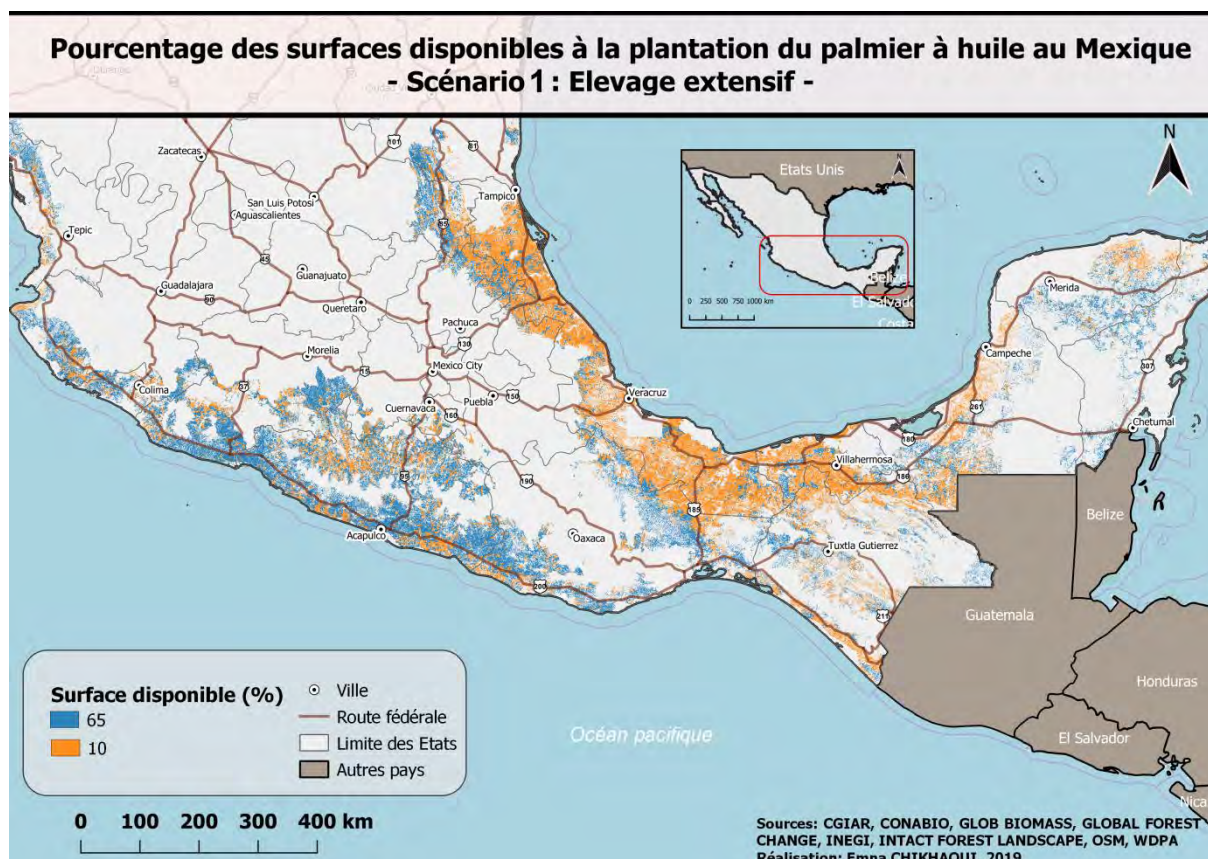


Figure 21. Carte de la disponibilité des terres à la plantation du palmier selon le scénario 1

4.2.2.2 Scénario 2 : Elevage intensif

4.2.2.2.1 Intensif à minima

Presque toute la partie Ouest est disponible à plantation jusqu'à 65% ainsi que la moitié des zones convertibles à Campeche et Yucatán. Quant à Veracruz et Tabasco, ils ont des taux de conversion variés avec une domination des terres aux tantièmes de transformation oscillant entre 0 et 50%.

Une petite zone non convertible est détectée à San Luis Potosí. (**Figure 22**)

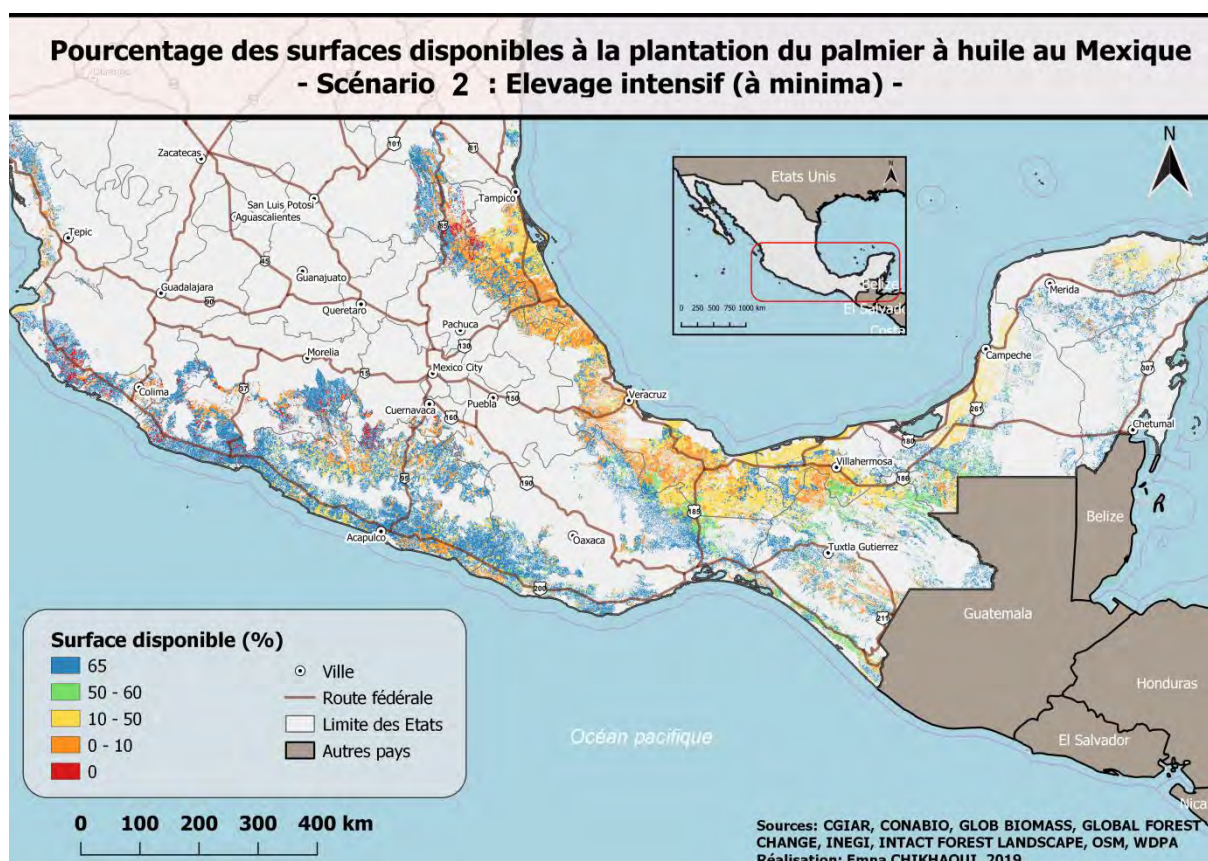


Figure 22. Carte de la disponibilité des terres à la plantation du palmier selon le scénario 2

4.2.2.2 Intensif doublé

L'intensification de l'élevage a fait croître le taux de conversion en palmier de la fourchette 10 - 50% à 50 - 60% dans tous les états. Aussi, la zone non convertible décelée dans le scénario à minima est devenue apte à la plantation du palmier avec un pourcentage compris entre 10 et 50%. (Figure 23)

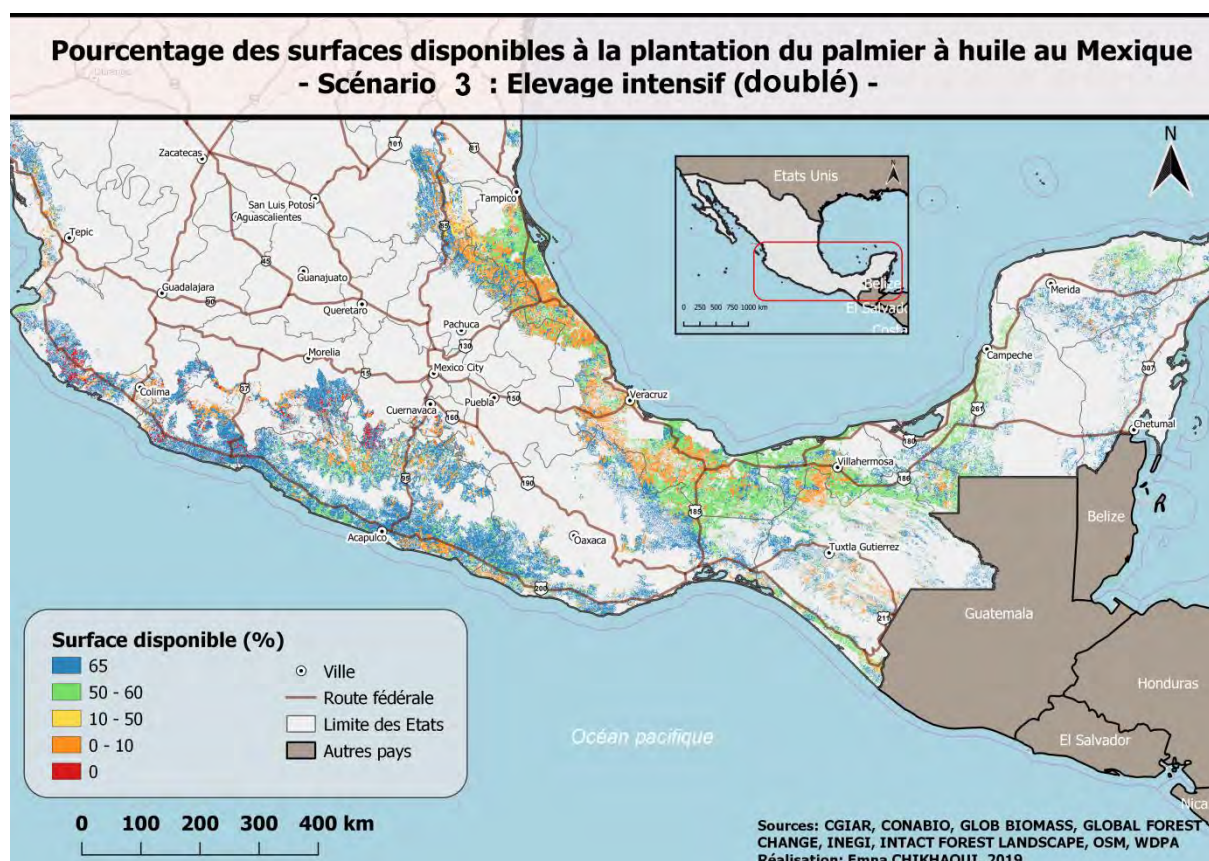


Figure 23. Carte de la disponibilité des terres à la plantation du palmier selon le scénario 3

Tableau 12. Surface de plantation du palmier à huile selon les scénarios

Pourcentage de plantation (%)		0	0 – 10	10 – 50	50 – 60	65	Total
Surface en millions d'hectares (M ha)							
Scénario extensif		-	8.91	-	-	9.78	18.69
Scénario intensif	A minima	0.51	3.70	3.62	1.08	9.78	
	Doublé	0.38	3.70	0.15	4.68	9.78	

Partie 5 : Discussion

5.1 Les potentiels de production de palmier à huile

5.1.1 La production est fonction du climat et du sol

Les conditions pédoclimatiques cernent l'aptitude de production du palmier à huile au Sud Mexicain, dans les zones tropicales situées au-dessous du tropique du Cancer selon la classification climatique de Köppen-Geiger (**Annexe1 : Figure 27**). En fait, sur une surface de 196.44 millions de hectares (surface totale du Mexique) seulement 19.91% (39.12 M ha) est théoriquement disponible à la plantation. Mais ce qu'il faut souligner, c'est que plus que 75% de cette surface disponible fournit des rendements entre 10 et 38 t FFB/ha, autrement dit un potentiel de production moyen à très favorable (**Tableau 11**).

Cette bonne aptitude de production est concentrée selon la carte du potentiel théorique (**Figure 19**) sur la côte Est et diminue en allant vers l'Ouest pour arriver à des zones à rendement ne dépassant pas les 5 t FFB/ha.

La fluctuation de potentialité est résultante d'une pluviométrie annuelle limitée à 1200 mm avec des périodes de sécheresse qui excèdent les 4 mois tout au long de la côte pacifique. Cette zone témoigne aussi d'un sol aux propriétés physiques moins adaptées à la plantation du palmier.

De même, la variation de potentiels est fonction de la pente et de la nature du terrain. En fait, la bande littorale Ouest est dominée par une section montagneuse (Sierra Madre del Sur) à l'opposé de la partie entourant le golfe du Mexique où existent plusieurs plaines comme celles de Tabasco et de Campeche. Ces zones correspondent déjà aux surfaces actuellement plantées par du palmier à huile (**Annexe1 : Figure 34**).

Mais cela n'empêche de signaler que la région englobant la péninsule du Yucatán jusqu'au l'isthme de Tehuantepec est couverte par des forêts tropicales denses, ce qui rend leur préservation lors de la plantation du palmier à huile une priorité, d'où la nécessité des normes RSPO.

5.1.2 Impacts des aspects sociaux et environnementaux sur la production

L'application des critères RSPO a réduit les surfaces théoriquement plantables de plus que la moitié, laissant uniquement 18.69 M ha disponibles à la plantation dont 40% produisant au moins 20 t FFB/ha (**Tableau 11**).

La comparaison de la carte du potentiel durable (**Figure 20**) avec celle du potentiel théorique (**Figure 19**) montre que les zones les plus productives comme Chiapas, Campeche, Tabasco et Veracruz sont le siège de grandes surfaces non convertibles en raison de leur couverture par des forêts denses, des

zones protégées et des zones humides. En plus, les petits espaces existants entre ces régions - qui sont normalement destinés à la plantation du palmier à huile- sont comblés par des superficies à usage agricole voire des cultures ou des pâturages (**Annexe1 : Figure 33**).

Cette occupation du territoire ajoute encore une contrainte sociale à prendre en considération selon les normes RSPO à travers les différents scénarios d'évaluation de surface réellement disponibles à la plantation du palmier en fonction des activités d'élevage.

5.1.2.1 Disponibilité des terres dans le cas d'un élevage extensif

Ce scénario considère que tous les pâturages sont destinés à l'alimentation des bétails, ce qui divise les surfaces disponibles à la plantation de palmiers en deux moitiés. Une part plus grande (9.78 M ha) est convertible à 65% et concentrée principalement sur le littoral pacifique où le rendement est faible et une autre moindre (8.91 M ha) convertible à 10% située sur l'autre littoral. En effet, les régions à fort rendement sont moins accessibles à la conversion vu les immenses pâturages y existants. (**Tableau 12**)

5.1.2.2 Disponibilité des terres dans le cas d'un élevage intensif

Cette fois-ci, la part plantable du pâturage est fonction de la densité des bovins. La première situation s'intéresse au seuil minimal naturel de bétails par hectare dans chaque état tandis que l'autre double cette capacité.

Ces deux scénarios suivent l'antécédent dans une fourchette de pourcentage de la plantation. En effet, comme l'élevage extensif, ils conservent les 9.81 M ha de zones plantables à 65%, concentrées sur la côte Ouest à faible rendement et sur l'autre côte qui a un fort potentiel de production

Mais la nouveauté par rapport à ce qui précède, c'est l'apparition des zones inaptes à la plantation du palmier (dédiées en totalité aux activités d'élevage) retranchant 2% des surfaces convertibles.

Aussi, d'autres variations de pourcentage de plantation entre 10% et 65%, sont distinguées surtout sur le littoral du golfe. Pour la situation minimale, presque l'un tiers des superficies à potentiel disponible nul gagnent des taux de conversion de 10 à 50% en passant au scénario intensif à la limite de Veracruz et San Luis Potosí. De même pour les 3.51 M ha disponibles de 10 à 50% qui passent, à leur tour, à 50 – 60 % sur toute la bande littorale Est. (**Tableau 12**)

5.2 Comparaison avec le plan Mexicain national de plantation de palmier à huile

La SAGARPA a identifié dans sa planification agricole nationale pour l'année 2017 – 2030, les zones potentielles de plantation du palmier. Elles sont de l'ordre de 10 dont 4 sont des régions stratégiques (**Figure 24**), c'est-à-dire à rendement maximal. (SAGARPA, 2017)

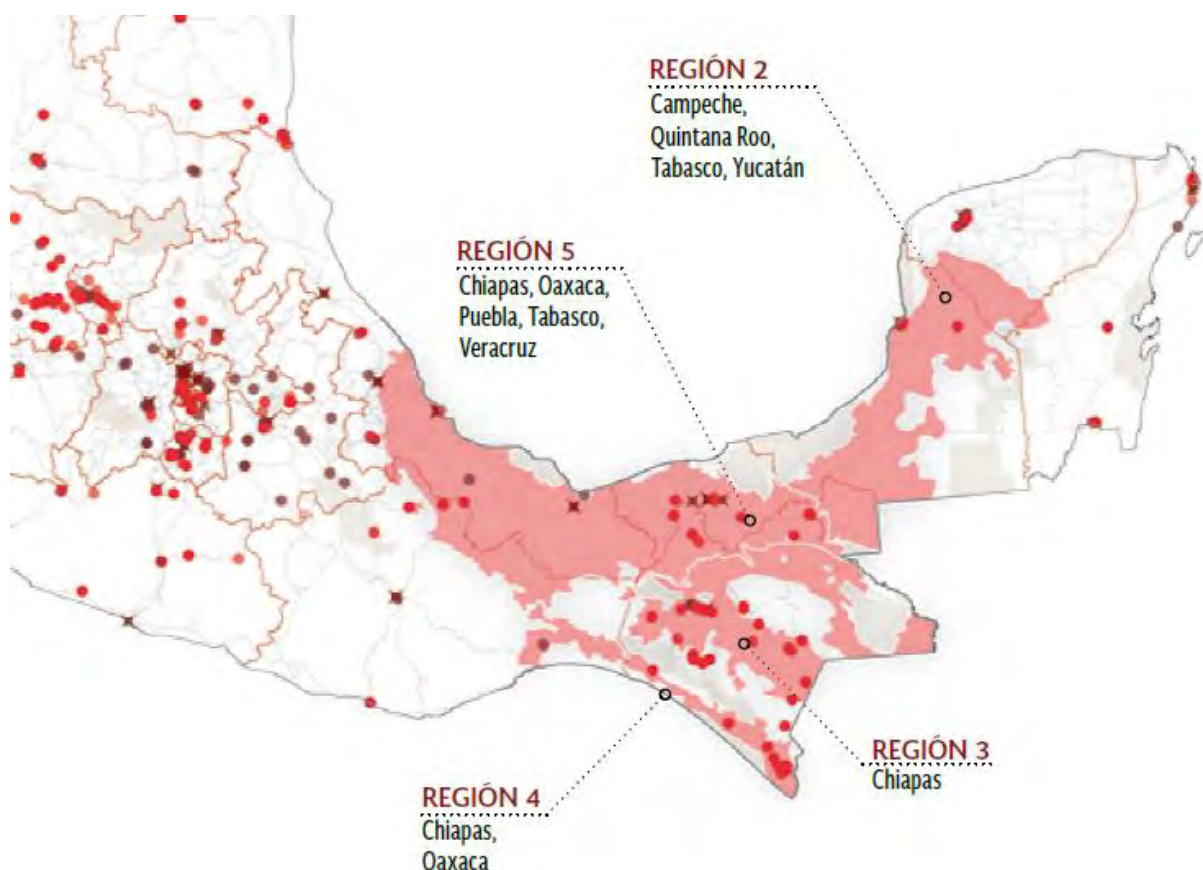


Figure 24. Planification nationale pour la plantation du palmier à huile au Mexique (2017– 2030)
(source : (SAGARPA, 2017))

Les régions stratégiques couvrent toujours les 4 Etats producteurs (Veracruz, Campeche, Tabasco et Chiapas) avec quelques superficies d'autres nouvelles Etats comme Oaxaca et, Yucatán.

Cette zonation coïncide bien avec mes résultats du potentiel durable (**Figure 21**). Toutefois, une grande zone à bon rendement vers le Nord de Veracruz est identifiée dans cette étude qui ne figure pas dans le plan stratégique mexicain.

Cela est dû peut-être au système d'élevage relativement intensif existant dans cette région. D'après la carte des pourcentages de plantation selon le scénario qui prend en compte l'élevage intensif à minima (**Figure 22**), la zone concernée est le siège d'une conversion qui ne dépasse pas les 10% avec des zones impossibles à planter en palmier à huile vu la capacité de charge des terres en bétails.

D'ailleurs les superficies destinées à l'élevage bovin à Veracruz dépassent les 50% de la surface totale de l'Etat, soit 3.5 M ha dont 2.7 M ha couvertes par des prairies cultivées. En fait, l'élevage est une activité productive d'importance socioéconomique pour l'État; il occupe la première place nationale dans les stocks de bovins et dans la production de viande en plus de la 6ème place dans la production du lait. Aussi, le pâturage libre est un système de production prédominant et se distingue par son importance dans la production de bovins à double vocation. (Vilaboa-Arroniz *et al.*, 2009)

5.3 Critiques des méthodes et des techniques du travail

5.3.1 Limite méthodologique

5.3.1.1 Aptitude des sols à la plantation du palmier

L'étude s'est basée au début sur la nature des sols pour déterminer leur aptitude à la plantation suivant la base de données fournie par la FAO et les travaux antérieurs réalisés dans ce domaine (GAZULL *et al.*, 2015). Mais des difficultés ont été révélées :

- Les données fournies par la FAO se basent sur celles de WRB (Base de référence mondiale) de 1974 alors que la version que je dispose c'est celle de 2006. La corrélation des différentes informations peut engendrer des incertitudes, vu qu'il y a plusieurs classes de sols qui ont été supprimées ou/et ajoutées avec le développement du système de classification.
- Les vertisols sont considérés selon la FAO comme 100% inaptes à la plantation du palmier, ce qui a causé des soucis parce que ce type de sols occupe des surfaces importantes au Mexique qui sont déjà plantées par des palmiers surtout à Campeche. Et d'après (Ochs, 1977) les vertisols sont des sols pauvres mais ils peuvent être aptes à la culture des palmiers s'ils sont bien amendés.

Tous ces facteurs nous ont poussés à adopter une autre approche basée plutôt sur les caractéristiques physiques du sol. Mais il serait intéressant de prendre en considération les propriétés chimiques du sol (pH, teneur de matière organique, concentration des éléments nutritifs...) car selon (Jacquemard, 2011) les restrictions d'usage d'un terrain pour planter du palmier pourront avoir pour origine les caractéristiques chimiques, physiques ou topographiques.

5.3.1.2 Contraintes sociales et économiques

Les contraintes sociales prises en considération dans l'étude ont été limitées aux aires d'expansion urbaines alors que les routes ont été négligées malgré qu'elles fassent partie des paramètres d'évaluation des risques selon la méthode HCS. En fait, le développement urbain au Mexique est très rapide et non-coordonné. Il est caractérisé par le fait qu'il est distant, dispersé et déconnecté (Kim & Zangerling, 2016). Cela revient à dire que l'infrastructure et surtout les routes ne sont pas des facteurs freinant l'installation humaine.

Par ailleurs, les contraintes économiques liées au secteur de production d'huile de palme n'ont pas été étudiées à cause de la difficulté à cerner et paramétrer les modèles de production existants au Mexique. D'après les missions effectuées par CIRAD, le modèle industriel est le plus présent. Les usines s'approvisionnent depuis leurs propres plantations ainsi que des plantations des producteurs de différentes catégories (petit, moyen, grand). Ces derniers n'ont aucun problème de parcourir de grandes distances pour vendre leurs fruits.

5.3.2 Limite technique

5.3.2.1 Manipulation de données sur python

Le traitement sur python a été chronophage. La mise en place d'un algorithme qui fonctionne correctement avec tous les types de données a été un peu difficile. Par exemple les « NoData » (la valeur indiquant qu'il n'y pas de données dans certaines cellules) sont différentes d'un raster à un autre, vu qu'ils n'ont pas la même source. Ainsi, une attention particulière a été donnée à chacun des rasters pour détecter ces cellules et les changer en fonction de la finalité. C'est vrai qu'il existe une fonction de Gdal qui détecte automatiquement ces « Nodata » (GetNoDataValue()), mais parfois elle n'arrive pas à identifier la valeur, ce qui m'oblige à le faire manuellement.

Aussi, les boucles « for » sont trop lentes à tourner surtout que toutes mes matrices sont de grande taille (plus que 10 000 lignes et 20 000 colonnes !). Pour cela, ça s'est avéré nécessaire de chercher d'autres alternatives comme l'indexation de l'array numpy. Par exemple au lieu d'écrire cela :

```
for y in range(cols): #Remplissage par les lignes
    for x in range(rows): #parcourir les colonnes
        if B[x,y] < 5:
            B[x,y] = 0
```

On peut écrire cette ligne :

```
B[B<5]=0
```

Cependant, une fois la mise en place de l'algorithme est terminée, tout devient automatisé et très simple à exécuter et même reprendre le traitement plusieurs fois rapidement.

5.3.2.2 Exigences de la méthodologie HCS

La méthodologie HCS exige de travailler avec des cartes en mode vecteur qui permettent de délimiter les patches des forêts alors que la majorité des données utilisées sont en mode raster d'où l'analyse par pixel qui peut dériver un peu les informations liées au territoire. Cette dérivation peut être accentuée avec le ré-échantillonnage de certaines couches pour avoir une résolution uniforme. Par exemple, les données climatiques à résolution de base de 1km² qui ont été rapportées à la résolution des données liées au sol (250 m * 250 m) pour élaborer la couche du potentiel théorique qui, à son tour, a été ré-échantillonnée à 1 ha (soit 100 m * 100 m) suivant la couche de la biomasse pour établir le potentiel durable.

De même, la méthodologie HCS indique la nécessité d'aller sur terrain pour estimer le stock du carbone et déterminer les usages des sols à partir des entretiens avec la population locale. Mais vu l'impossibilité de la tâche, ces deux étapes se sont réalisées à partir des couches de biomasse et d'occupation des sols et des scénarios mis en place. Les résultats présentés sont donc à prendre avec précautions.

Conclusion et perspectives

Au terme de cette mission de recherche, je peux conclure que l'objectif qui m'a été attribuée a été atteint. La modélisation spatiale des facteurs biophysiques en prenant en considération les standards de durabilité (RSPO qui inclue HCS et HCV) de la plantation du palmier à huile a abouti à une carte de potentiel durable disponible à la plantation du palmier à huile au Mexique. Seulement le Sud du pays est apte à cette culture avec un très bon potentiel dans le Sud-Est.

Cette étude a illustré l'influence des zonations pédoclimatiques sur l'aptitude des terres à la plantation et leur rentabilité. Aussi, elle a mis en valeur l'importance de la prise en considération aussi bien des contraintes sociales qu'environnementales dans l'identification des espaces dédiés à cette culture pour assurer une production rentable consciente des enjeux environnementaux qu'elle pourrait poser et respectant des terres déjà utilisées par d'autres pratiques.

De plus, elle a souligné le rôle primordial des systèmes d'information géographique (SIG) en tant qu'outil d'aide à la décision en zoomant sur les traitements SIG via Python. Ce langage de programmation simple et puissant. Il permet de créer des sauvegardes des analyses effectuées, de convertir des données spatiales de façon simple voire même de monter un propre moteur de manipulation.

Il est évident que cette réalisation cartographique m'a été très profitable. Grâce à ce stage, j'ai pu développer mes compétences en programmation pour des fins géographiques. En fait, cela m'a aidée à bien mettre en œuvre certaines exigences des standards de durabilité comme l'analyse de connectivité sur des données raster pour la méthodologie HCS. De même, l'automatisation de certains processus m'a fait gagner beaucoup de temps comme pour le calcul du déficit hydrique sur 12 mois avec 24 couches ! Et je n'oublie pas de mentionner la facilité des reclassifications avec python qui sont flexibles à l'encontre de celles existantes dans les logiciels SIG. J'ajoute aussi que ce stage était une occasion pour moi pour apprendre à bien distinguer les sources des données sur internet et à bien vérifier leur fiabilité. Enfin, être impliquée dans un projet lié à l'agronomie m'a permis de mettre à l'épreuve mes connaissances dans ce domaine tout en les combinant avec la géomatique.

Ce type de combinaison de domaines (géomatique-agronomie) ouvre la porte à plusieurs perspectives surtout dans le domaine d'évaluation de potentiel de production. Ainsi, pour la suite de ce travail, les scripts python pourront être optimisés pour rendre les traitements plus performants. Aussi, il est possible de mettre en place un modèle de simulation pour évaluer la durabilité de la production du palmier à huile au Mexique, à long terme, dans un contexte de changement climatique.

Bibliographie

- Adriani Z., Anderson P., Aritonang S., Ballhorn U., & Barclay B. 2017. *The HCS approach toolkit _ Module 4*.
- ANIAME. 2012. *Palma de aceite en el sureste mexicano*.
- Aubert M.-H., Champanhet F., Bénézit J.-J., & Talon M.-R. 2016. *Durabilité de l'huile de palme et des autres huiles végétales*.
- Balu N., Ismail N., & Aini K.N. 2015. Competitiveness of the Oil Palm Industry in Colombia. 15, p. 12.
- Barrientos M. & Soria C. 2019. Guatemala Palm Oil Area Harvested Annual Growth Rate. Disponible sur : < <https://www.indexmundi.com/agriculture/?country=gt&commodity=palm-oil&graph=area-harvested-growth-rate> > (Consulté le 26 août 2019).
- Barthel M., Jennings S., Schreiber W., Sheane R., Royston S., Fry J., Khor Y.L., McGill J., Europäische Kommission, & Generaldirektion Umwelt. 2018. *Study on the environmental impact of palm oil consumption and on existing sustainability standards final report and appendices*.
- Batidzirai B., Smeets E.M., & Faaij A.P.. 2012. *Harmonising bioenergy resource potentials — Methodological lessons from review of theart bioenergy potential assessments*.
- Bello J.L.D. 2015. *HACIA UNA ECOLOGÍA POLÍTICA DE LA PALMA ACEITERA EN EL PERÚ*.
- Castellanos-Navarrete A. & Jansen K. 2017. *Why do smallholders plant biofuel crops? The « politics of consent » in Mexico*.
- CEDRSSA. 2014. *Palma de aceite en México*.
- Central Intelligence Agency. 2017. The World Factbook - Mexico. Disponible sur : < <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/mx.html> > (Consulté le 27 août 2019).
- Corley & Tinker. 2015. *Oil Palm : 5th edition*.
- De La Rosa D. 2012. Qualitative and Quantitative Land Evaluations. , p. 8.
- Furumo P.R. & Aide T.M. 2017. Characterizing commercial oil palm expansion in Latin America: land use change and trade. *Environmental Research Letters*. 12(2), p. 024008.
- GAZULL, GOULAOUIC, & Brunelle. 2019. *Evaluation du potentiel mondial d'huile de palme low ILUC risk*.
- Gazull L., Goulaouic R., & Feintrenie L. 2015. *Cartographie du potentiel de production durable de palmier à huile certifiable RSPO dans le bassin du Congo*.
- Greenpeace. 2013. *Identifying High Carbon Stock (HCS) Forest for Protection*.
- HCS Approach Steering Group. 2015. *L'Approche Haut Stock de Carbone: la Zéro Déforestation en pratique*.

- HCV Resource Network. 2017. *Guide générique pour l'identification des Hautes Valeurs de Conservation*.
- Hernández-Rojas D.A., López-Barrera F., & Bonilla-Moheno M. 2017. Análisis preliminar de la dinámica de uso del suelo asociada al cultivo palma de aceite (*Elaeis guineensis*) en México. Disponible sur : < <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v52n6/2521-9766-agro-52-06-875.pdf> > (Consulté le 26 août 2019).
- High Carbon Stock Approach Steering Group. 2017. *The HCS approach toolkit _ Module 5*.
- Hoyle D. & Senior M. 2014. *A technical comparison of the HCV and HCS approaches*.
- INEGI. 2016. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Disponible sur : <<http://www.inegi.org.mx/>> (Consulté le 26 août 2019).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2000. Land Use, Land-Use Change, and Forestry, Cambridge University Press, New York, pp.1-20
- Jacquemard J.-C. 2011. Le palmier à huile. , p. 275.
- Kim Y. & Zangerling B. 2016. Mexico Urbanization Review: Managing Spatial Growth for Productive and Livable Cities in Mexico. , p. 147.
- Lesage, C. 2017. Est-il possible d'assurer un développement durable du palmier à huile en Amérique Latine?
- Matesanz S., Gómez-Fernández A., Alcocer I., & Escudero A. 2015. Fragment size does not matter when you are well connected: effects of fragmentation on fitness of coexisting gypsophiles. *Plant Biology (Stuttgart, Germany)*. 17(5), p. 1047-1056.
- Morelle D. & Lejeune P. 2000. *Élaboration d'une méthode quantitative et globale d'évaluation de l'aptitude des terres à l'agriculture : application à la Région wallonne (Belgique)*.
- Naranjo F. 2015. Deforestation and palm oil cultivation in Latin America | RSPO Palm Oil Debate | RSPO - Roundtable on Sustainable Palm Oil. Disponible sur : < <https://www.rspo.org/about/palm-oil-debate/blog/deforestation-and-palm-oil-cultivation-in-latin-america> > (Consulté le 26 août 2019).
- Ochs. 1977. Les contraintes écologiques du développement des oléagineux pérennes palmier et cocotier) en Afrique occidentale et centrale.
- Pirker J. & Mosnier A. 2015. *Global oil palm suitability assessment*.
- Pirker J., Mosnier A., Kraxner F., Havlík P., & Obersteiner M. 2016. What are the limits to oil palm expansion? *Global Environmental Change*. 40, p. 73-81.
- Quencez. 1996. *La culture du palmier à huile en Afrique intertropicale: les conditions du milieu physique*.
- Rosoman P.G. & McWilliam R. 2015. Arbre de décision pour l'analyse des parcelles de forêt HCS. , p. 16.
- RSPO. 2018. *RSPO Principles and Criteria 2018*.

- . 2019. RSPO (Roundtable on Sustainable Palm Oil). Disponible sur : < <https://www.rspo.org/about> > (Consulté le 26 août 2019).
- SAGARPA. 2004. *Plan nacional del sistema producto palma de aceite 2004 -2014*.
- . 2017. *Planificación agrícola nacional 2017-2030*.
- Santacruz de Leon, M. G. 2012. Políticas gubernamentales y reconversion productiva: el caso de la palma de aceite en Mexico. Observatorio de la economía Latinoamericana.
- SIAP. 2017. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Disponible sur: <<https://ww.siap.gob.mx> > (Consulté le 26 août 2019).
- Simon D., Davies G., & Ancrenaz M. 2019. Changes to Sabah’s orangutan population in recent times: 2002–2017. *PLOS ONE*. 14(7), p. e0218819.
- Sumarga E., Hein L., Hooijer A., & Vernimmen R. 2016. Hydrological and economic effects of oil palm cultivation in Indonesian peatlands. *Ecology and Society*. 21(2).
- UN Data. 2015. Mexico. Disponible sur : < <http://data.un.org/en/iso/mx.html> > (Consulté le 27 août 2019).
- Van Lanen H. 1991. *Qualitative and quantitative physical land evaluation: an operational approach*.
- Vijay V., Pimm Stuart L., N. Jenkins C., & , J. Smith S. 2016. The Impacts of Oil Palm on Recent Deforestation and Biodiversity Loss. Disponible sur : < <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0159668> > (Consulté le 27 août 2019).
- Vilaboa-Arroniz J., Díaz-Rivera P., Ruiz-Rosado O., Platas-Rosado D.E., González-Muñoz S., & Juárez-Lagunes F. 2009. CARACTERIZACIÓN SOCIOECONÓMICA Y TECNOLÓGICA DE LOS AGROECOSISTEMAS CON BOVINOS DE DOBLE PROPÓSITO DE LA REGIÓN DEL PAPALOAPAN, VERACRUZ, MÉXICO. , p. 11.