Atelier thématique THEIA

Le paludisme forestier au Myanmar : identification des paysages forestiers à risque dans une diversité d'environnements

Eva Legendre

Doctorante en 3ème année au SESSTIM, équipe QuanTIM

Directeurs de thèse : Jean Gaudart & Jordi Landier

- **Le paludisme :** maladie infectieuse vectorielle causée par un parasite du genre *Plasmodium* et transmises par les moustiques du genre *Anopheles*
- **Sous-région du Grand Mékong :**
  - ➔ Important progrès réalisé pour la lutte contre le paludisme
  - ➔ Elimination *P. falciparum* en 2023 & toute forme en 2030
  - ➔ *P. falciparum* & *P. vivax* responsables de la majorité des cas et des décès liés au paludisme
  - ➔ Forte hétérogénéité spatiale

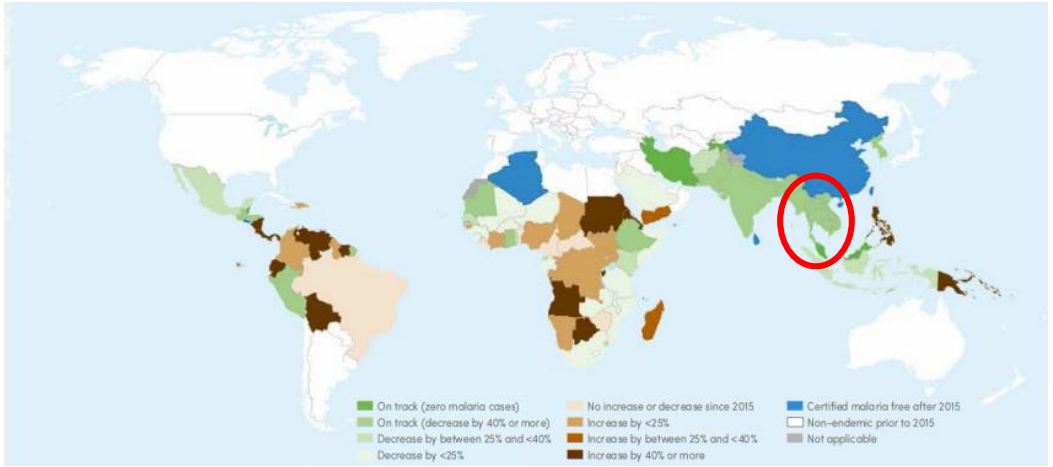


Figure 1. Carte des pays où le paludisme est endémique en fonction des objectifs GTS (incidence des cas de paludisme en 2020 par rapport à 2015). Source : estimation OMS – GTS: Global technical strategy for malaria 2016-2030.

P. falciparum | *P. vivax*

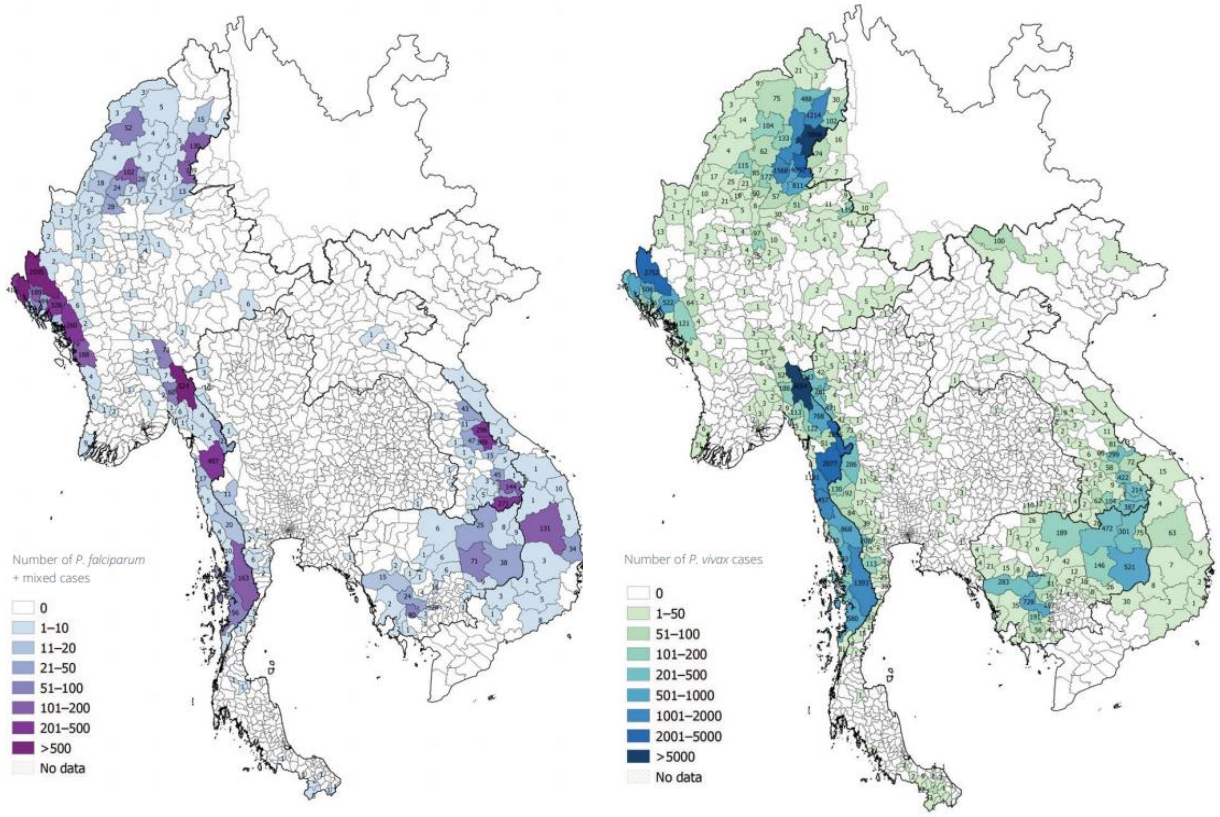


Figure 2. Distribution of *P. falciparum* & *P. vivax* malaria cases in the GMS in 2021. Source : The Mekong Malaria Elimination Program, Bulletin March 2022.

- **Le paludisme forestier :** la transmission du paludisme est fortement associé aux activités dans les environnements forestiers
  - ➔ Interventions ciblées sur les personnes « allant en forêt »
  - ➔ **Peu probable que toutes les environnements forestiers et activités aient le même risque**
  - ➔ Dans ce contexte de pré-élimination, il y a besoin de ciblage des interventions et d'allocation de ressources à une échelle géographique fine

Est-ce que tous les environnements forestiers ont le même risque ?

- **Myanmar :** pays avec du paludisme dans les zones frontalières et montagneuses
- **Programme METF (Malaria Elimination Task Force) :**

➔ Localisation : région Karen/Kayin située à la frontière avec la Thaïlande

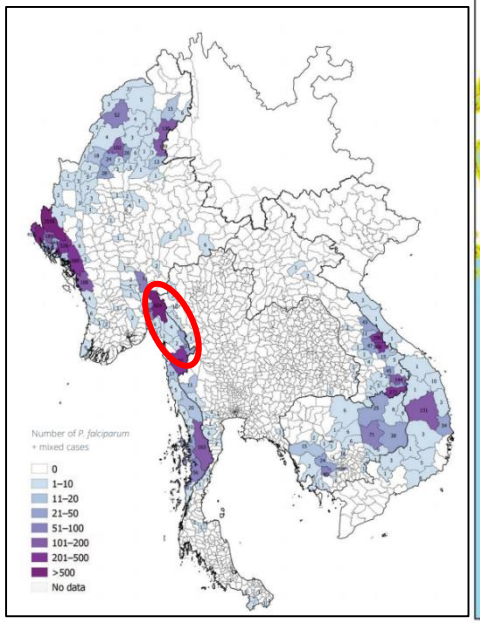
➔ Objectif : lancé en 2014 pour réduire la transmission de *P. falciparum*

➔ Principe :

1/ mise à disposition du diagnostique précoce et du traitement au niveau de « malaria posts » : test systématique des fièvres par TDR *P. falciparum-P. vivax* → 95% ouvert en 2016

2/ traitement de masse dans les villages de haute prévalence sous-microscopique

Quels types d'environnements forestiers et quels types d'activités humaines sont associés localement à une plus grand incidence ou persistance du paludisme à l'échelle du village ?



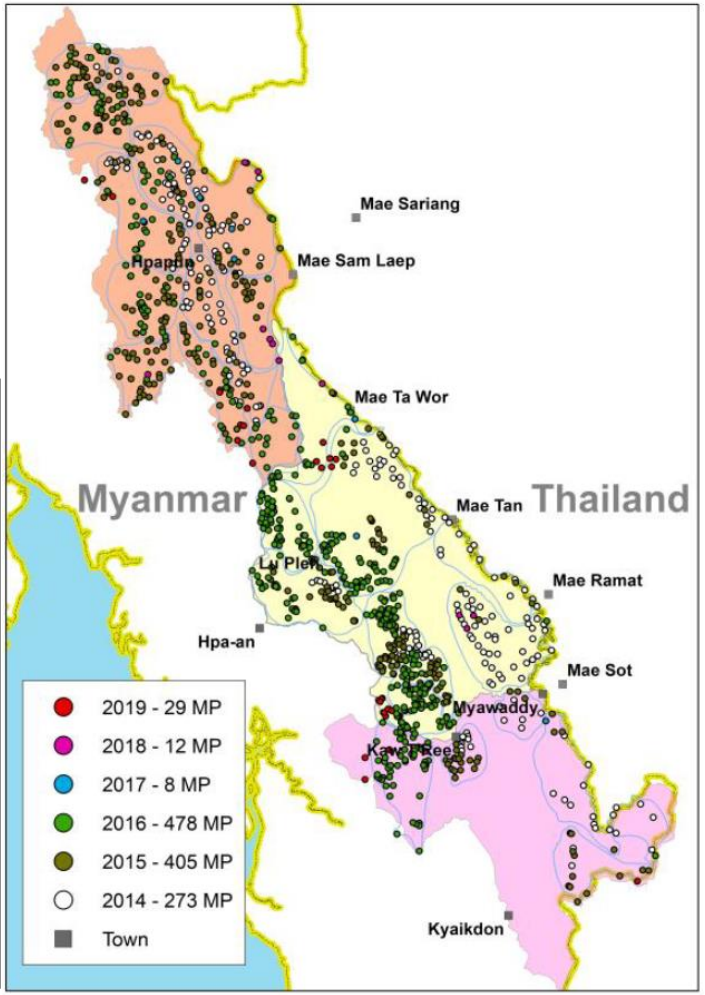
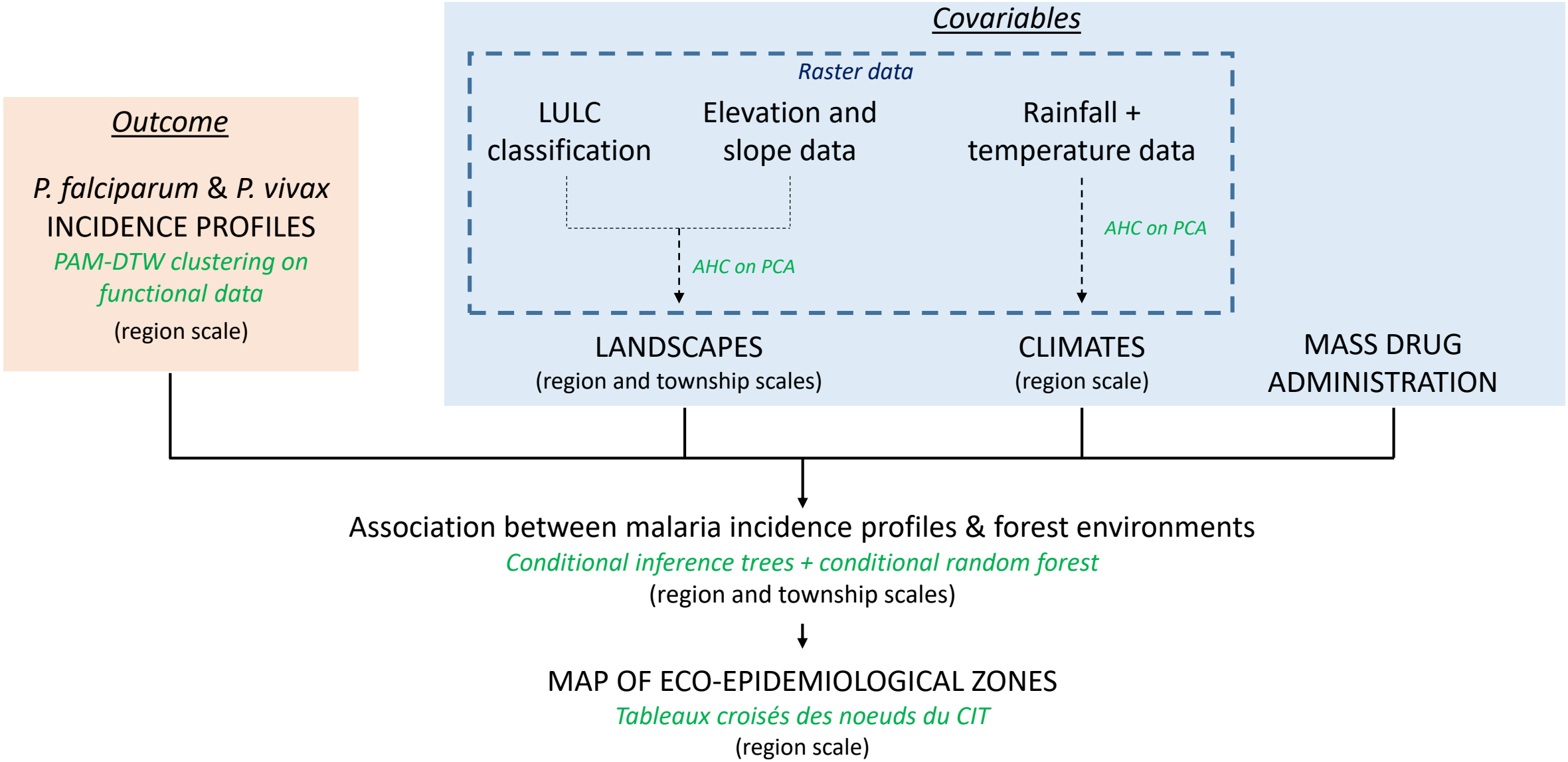
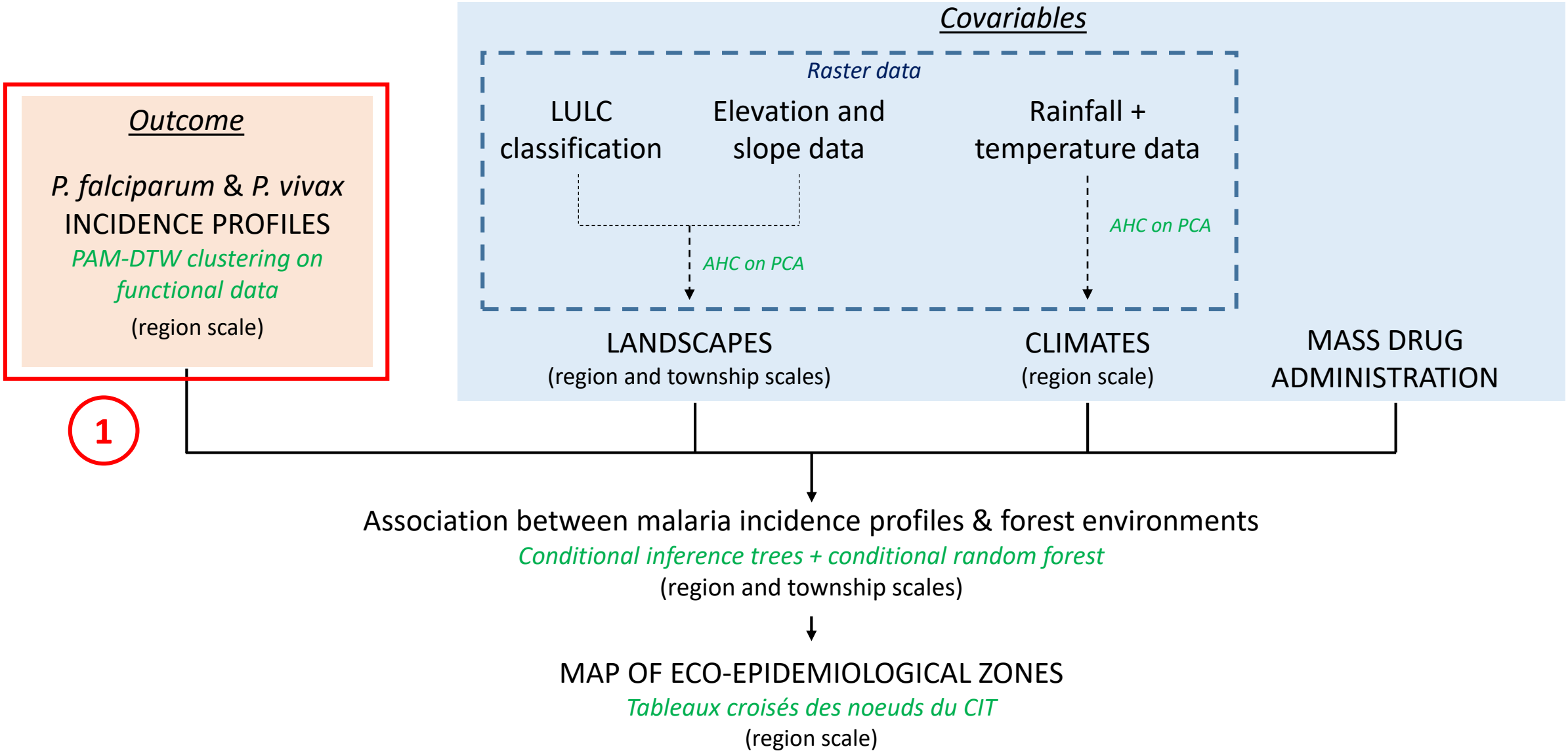


Figure 3. Carte de la région cible du programme METF et de l'état d'ouverture des malaria postes en décembre 2019 (n=1205). Source : Malaria Elimination Task Force Activity Report Update May 2014 – December 2019

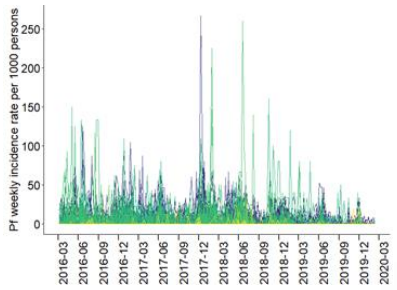

Covariables
Raster data
LULC classification
Elevation and slope data
Rainfall + temperature data
AHC on PCA
AHC on PCA
Outcome
P. falciparum & P. vivax
INCIDENCE PROFILES
PAM-DTW clustering on functional data
(region scale)
LANDSCAPES
(region and township scales)
CLIMATES
(region scale)
MASS DRUG ADMINISTRATION
Association between malaria incidence profiles & forest environments
Conditional inference trees + conditional random forest
(region and township scales)
MAP OF ECO-EPIDEMIOLOGICAL ZONES
Tableaux croisés des noeuds du CIT
(region scale)


Covariables
Raster data
LULC classification
Elevation and slope data
Rainfall + temperature data
AHC on PCA
AHC on PCA
Outcome
P. falciparum & P. vivax
INCIDENCE PROFILES
PAM-DTW clustering on functional data
(region scale)
1
LANDSCAPES
(region and township scales)
CLIMATES
(region scale)
MASS DRUG ADMINISTRATION
Association between malaria incidence profiles & forest environments
Conditional inference trees + conditional random forest
(region and township scales)
MAP OF ECO-EPIDEMIOLOGICAL ZONES
Tableaux croisés des noeuds du CIT
(region scale)

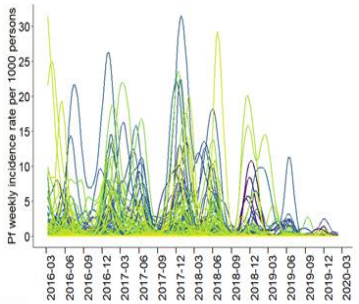
A. Outcome : Construction des profils d'incidence

- Data : incidence des cas de paludisme (*P. falciparum* & *P. vivax*) enregistrés par les malaria postes de 2016 à 2020 (n=662)
- Méthode : classification des villages par l'algorithme PAM associé à la métrique DTW sur données fonctionnelles

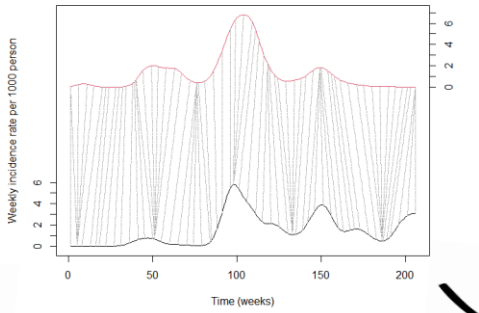
Données brutes : taux d'incidence hebdomadaire



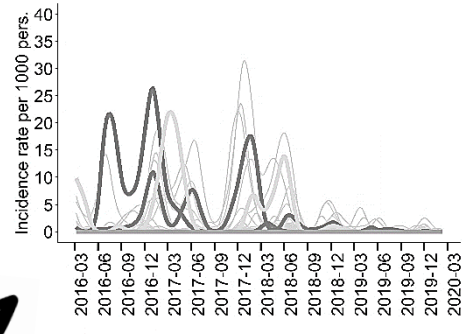
Données fonctionnelles



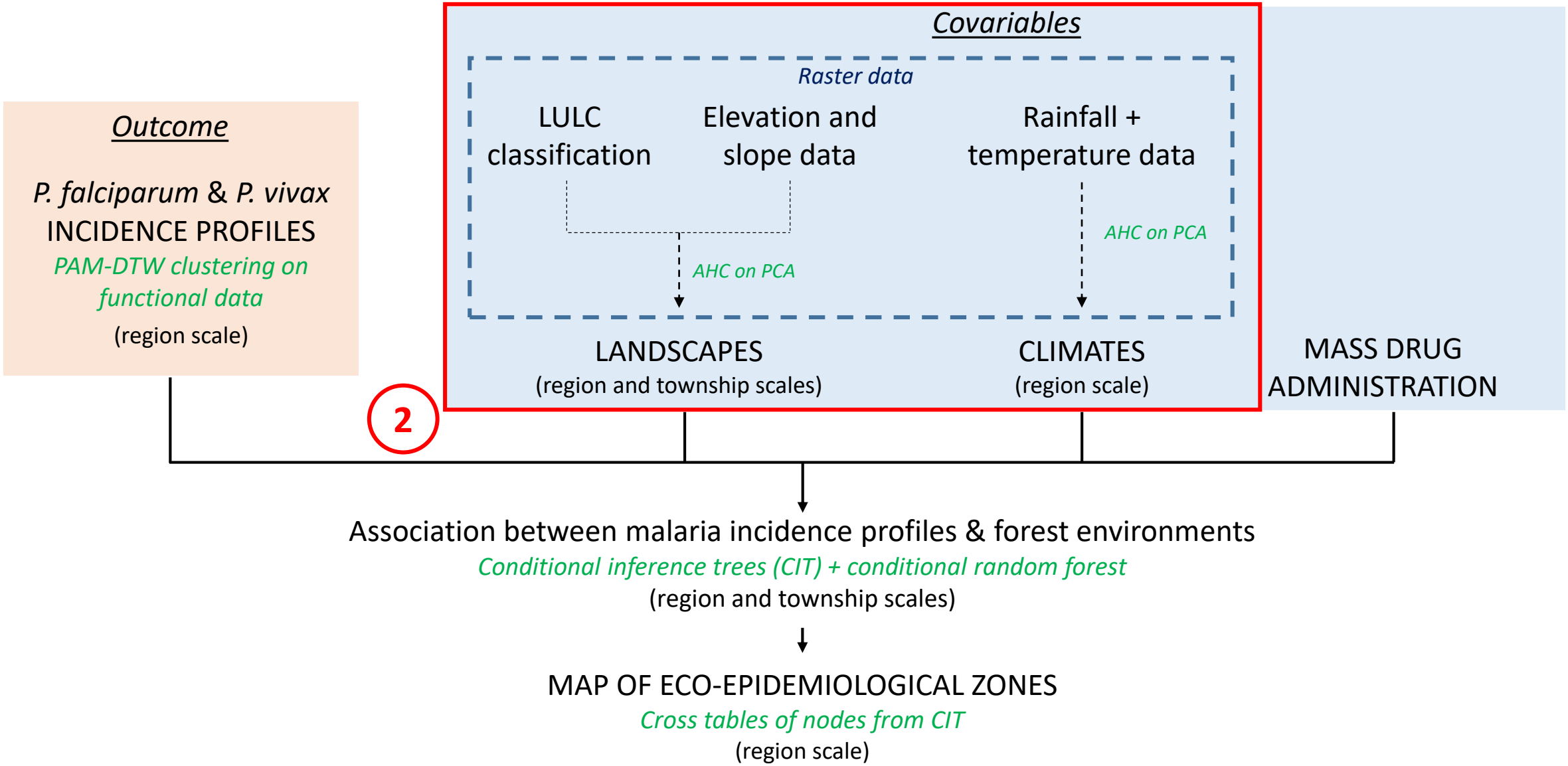
Matrice de distance DTW



Profils d'incidence



1. *Lissage des séries chronologiques par transformation fonctionnelle*
2. *Calcule distance DTW entre chaque village*
3. *Classification PAM*


Outcome
P. falciparum & P. vivax
INCIDENCE PROFILES
PAM-DTW clustering on functional data
(region scale)
Covariables
Raster data
LULC classification
Elevation and slope data
Rainfall + temperature data
AHC on PCA
AHC on PCA
LANDSCAPES
(region and township scales)
CLIMATES
(region scale)
MASS DRUG ADMINISTRATION
2
Association between malaria incidence profiles & forest environments
Conditional inference trees (CIT) + conditional random forest
(region and township scales)
MAP OF ECO-EPIDEMIOLOGICAL ZONES
Cross tables of nodes from CIT
(region scale)

B. Covariables environnementales

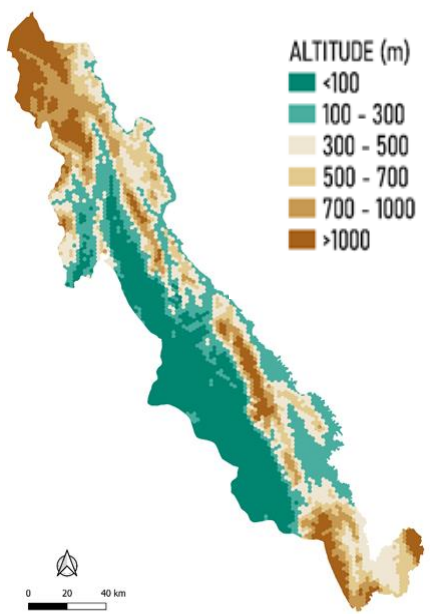
Zone d'étude divisée en hexagones de 2km de largeur

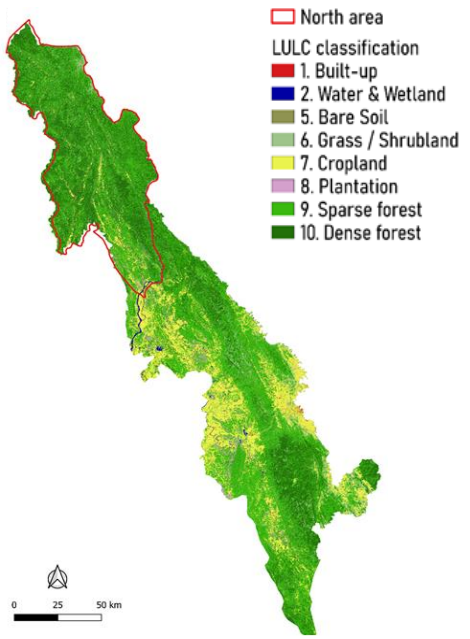
Paysages

- **Données d'altitude et de pente** : GMTED 2010 digital elevation model
- **Couverture & occupation du sol** : classification réalisée par Florian Girond et Vincent Herbreteau, UMR ESPACE DEV
  - → Image Sentinel 2 de 2019 à 2020 de haute résolution spatiale (10m à 60m) et temporelle (≈5 jours)
  - → Méthode OBIA : object-based image analysis
  - → Validation par une sélection de 300 points aléatoires du sol et photo-interprétation de Google Earth

Climat

- **Données de température** nuit/jour de Google Earth Engine : MODIS/006/MOD11A2 (1km résolution spatiale)
- **Données de pluviométrie** journalière de Google Earth Engine : UCSB-CHG/CHIRPS/DAILY (resolution 5.5 km)





Moyenne, médiane, écart-type, min, max

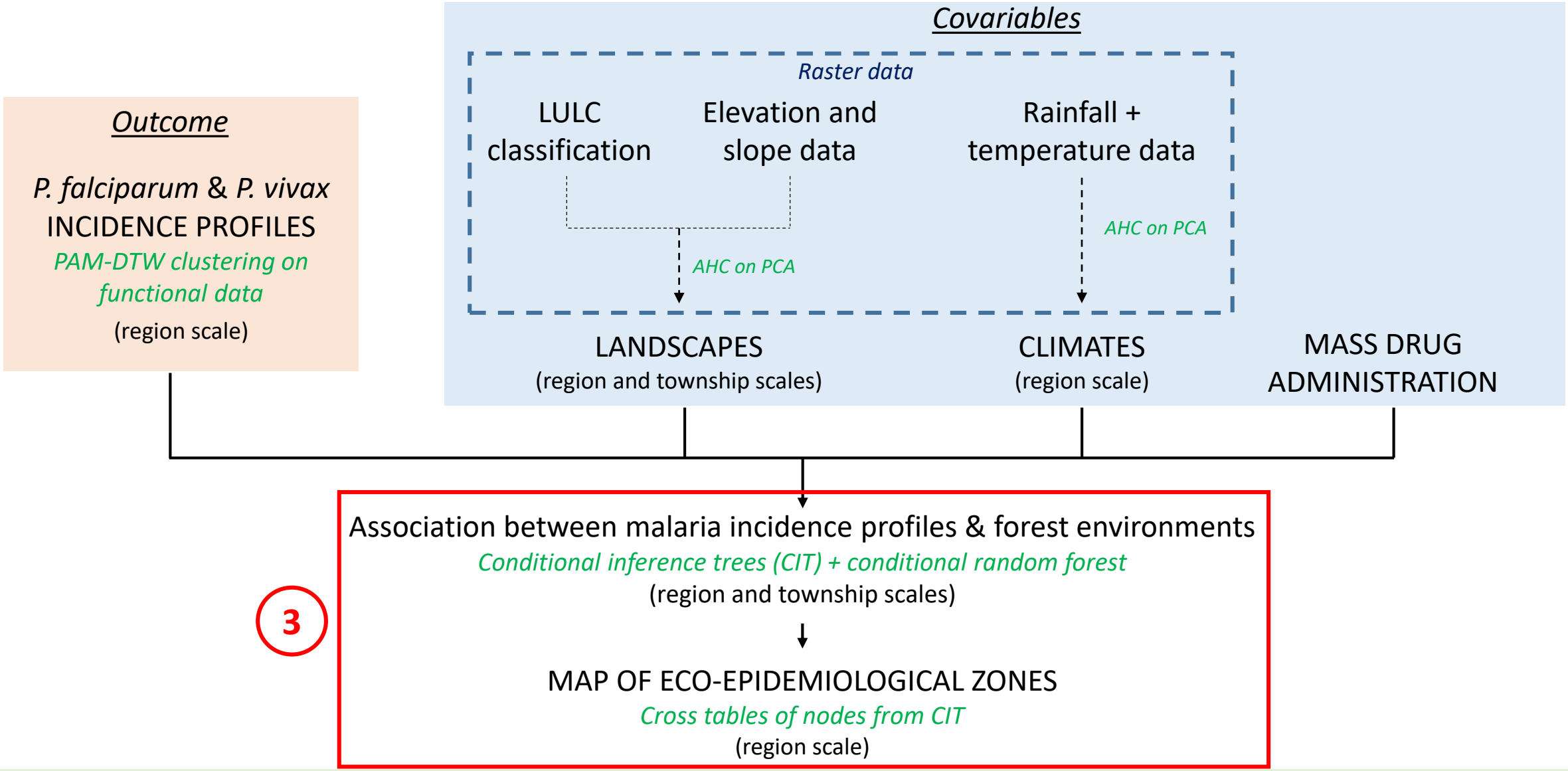
Indices de fragmentations

Classification ascendante hiérarchique sur composantes principales

PAYSAGES

→ Échelle de la région

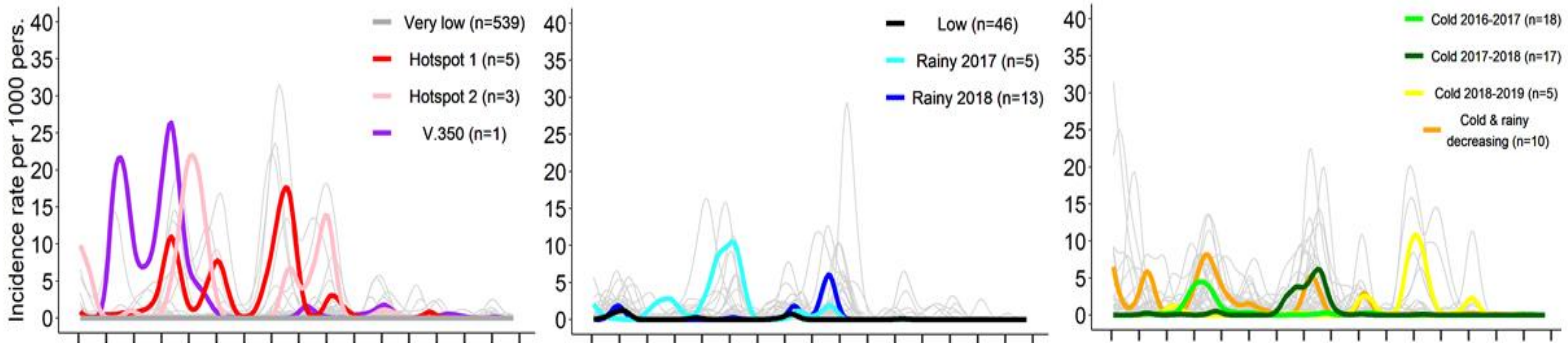
→ Echelle de la zone Nord


Covariables
Raster data
LULC classification
Elevation and slope data
Rainfall + temperature data
AHC on PCA
AHC on PCA
Outcome
P. falciparum & P. vivax
INCIDENCE PROFILES
PAM-DTW clustering on functional data
(region scale)
LANDSCAPES
(region and township scales)
CLIMATES
(region scale)
MASS DRUG ADMINISTRATION
Association between malaria incidence profiles & forest environments
Conditional inference trees (CIT) + conditional random forest
(region and township scales)
3
MAP OF ECO-EPIDEMIOLOGICAL ZONES
Cross tables of nodes from CIT
(region scale)

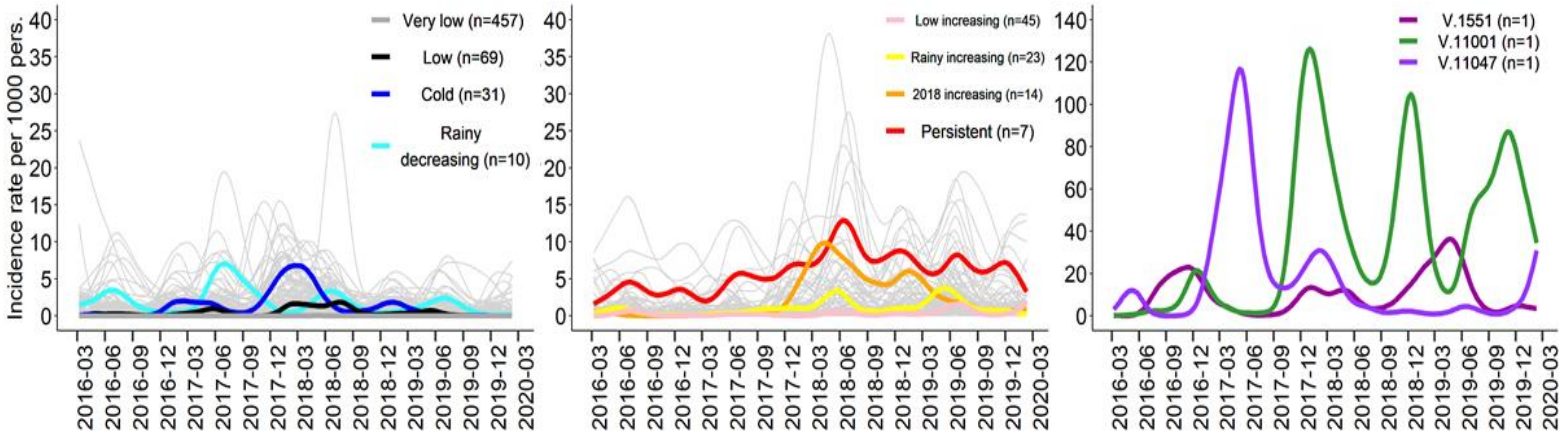
A. Profiles d'incidence

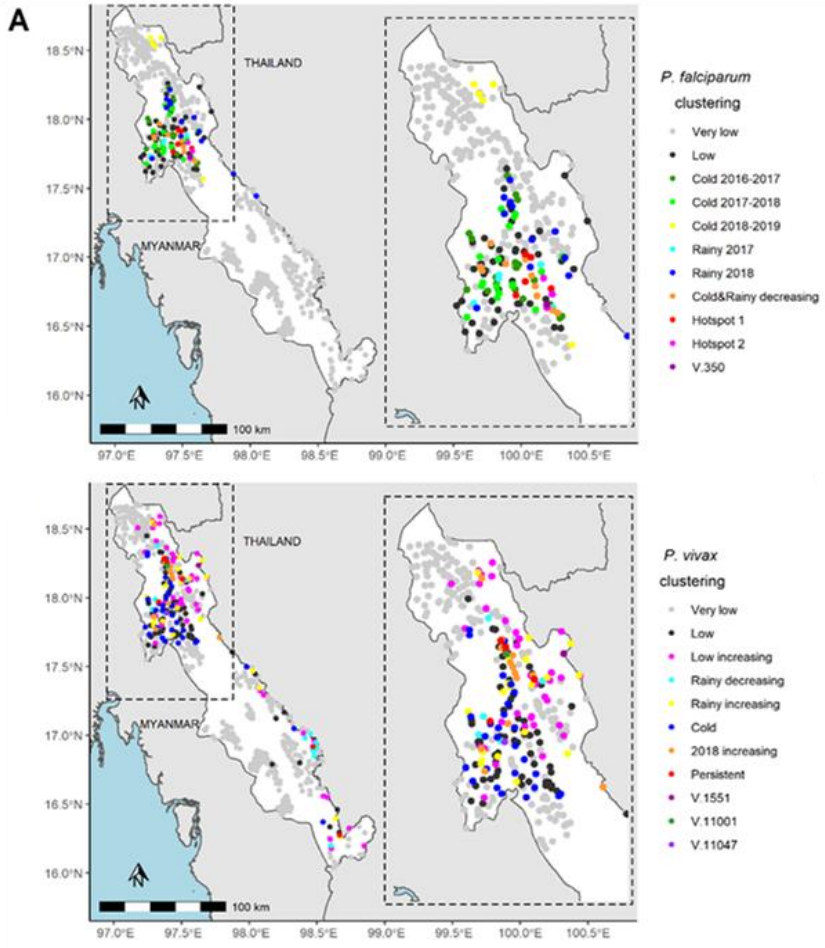
➔ 11 profils d'incidence identifiés pour *P. falciparum* et *P. vivax* distingués en fonction de leur amplitude, saisonnalité et tendance

P. falciparum



P. vivax



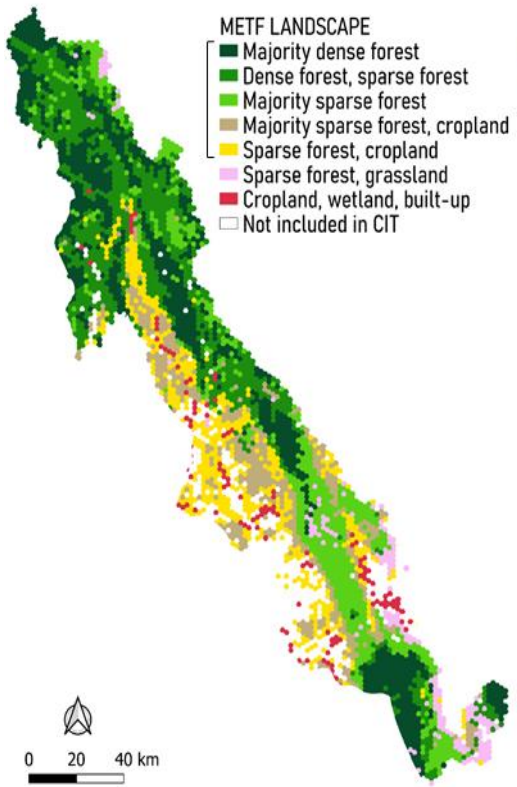


B. Paysages & Climat

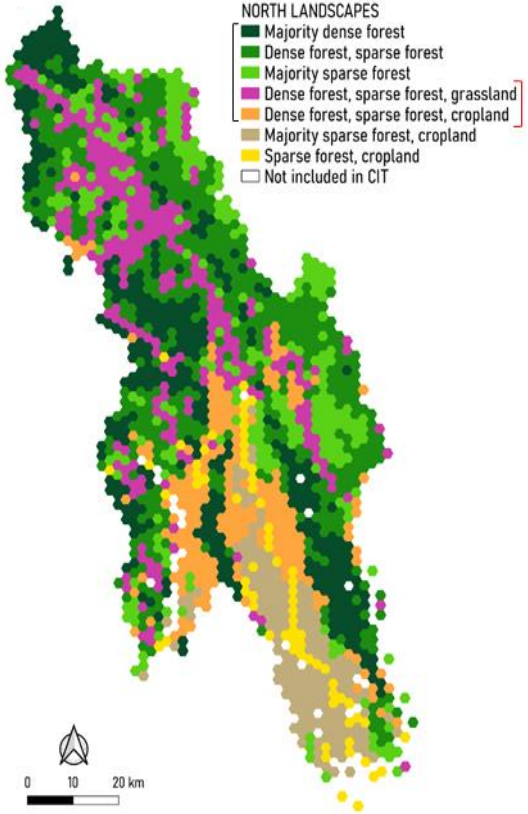
- Région recouverte à 74% de forêts (forêt clairsemée & forêt dense)
- 17 paysages identifiés à l'échelle de la région
- 2 paysages spécifiquement identifiés à l'échelle de la zone nord

➔ Grande diversité de paysages forestiers identifiés dans une région montagneuse et forestière avec un gradient de « naturel » à anthropisé

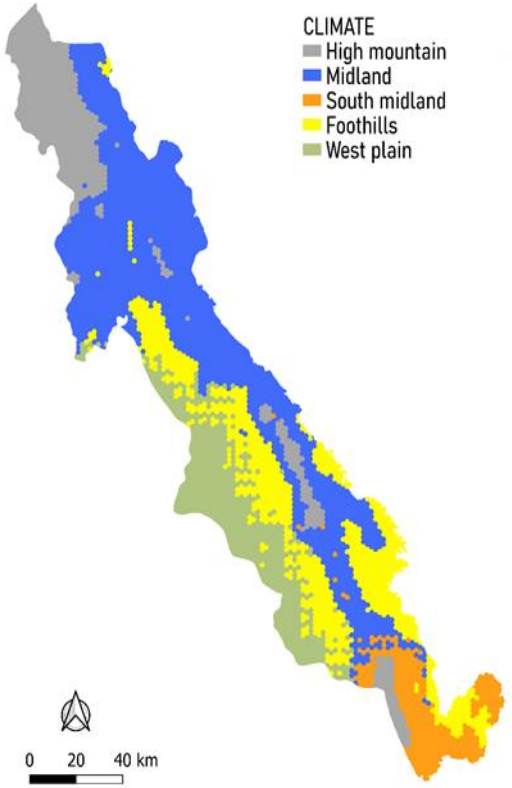
Paysage à l'échelle de la région



Paysages à l'échelle de la zone Nord



Climat

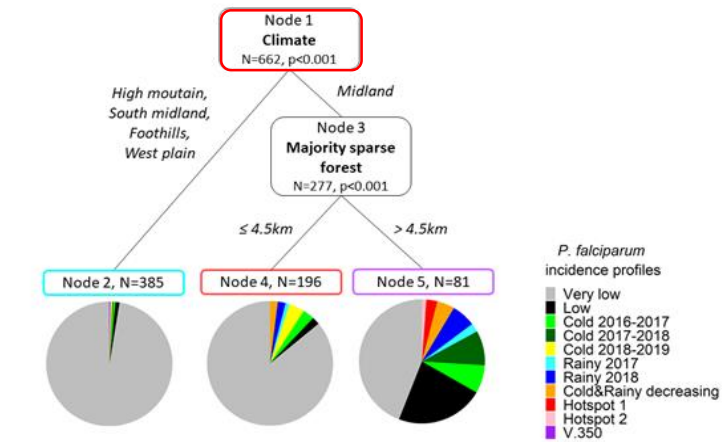


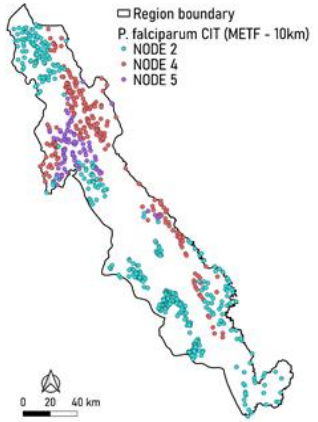
C. Association entre les profiles d'incidence et l'environnement

➔ Principalement 1 climat et 2 paysages associés aux profils d'incidence

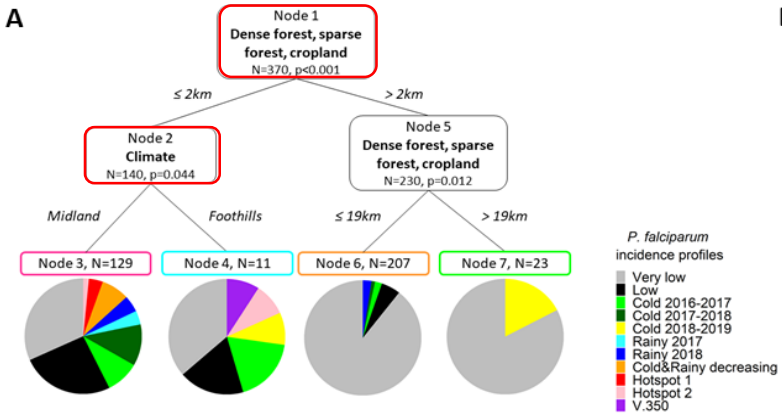
Région | Zone Nord

P. falciparum

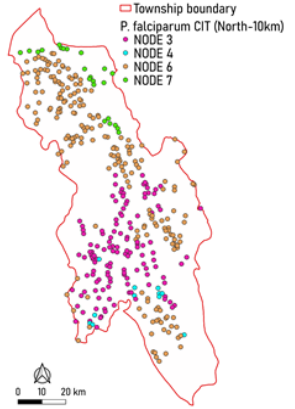




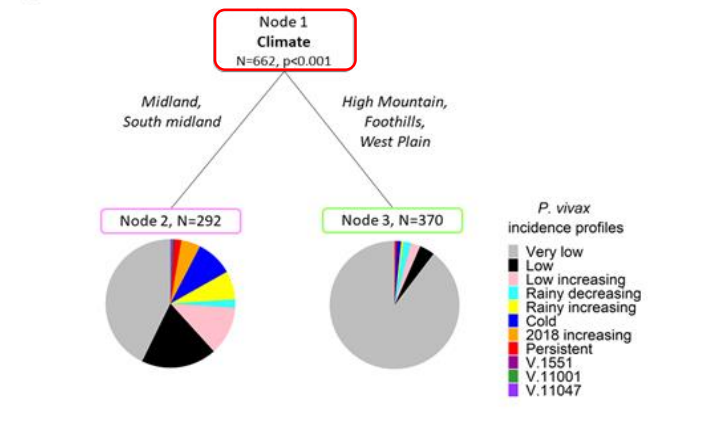
A

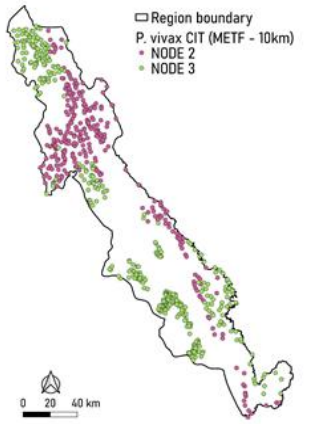


B

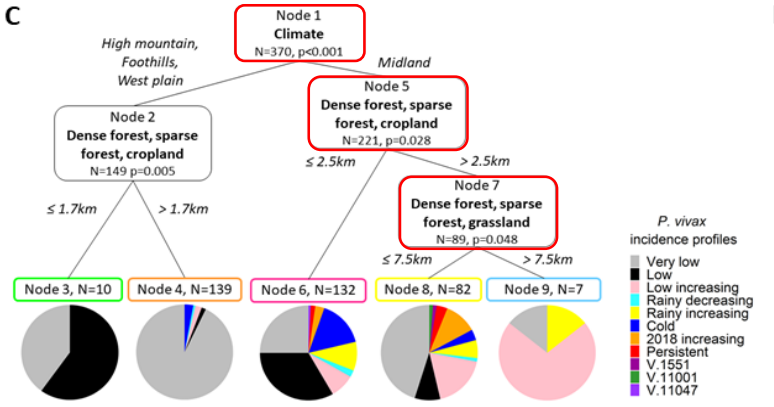


P. vivax

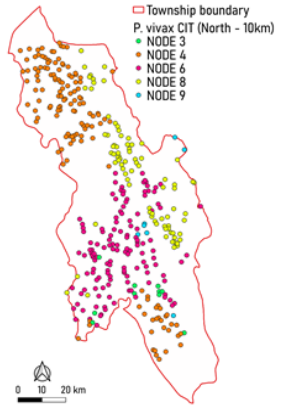




C



D



D. Zones éco-épidémiologiques

A. Echelle région vs. échelle zone nord pour *P. falciparum*

A)		METF region		
		Midland (N3)	Not in Midland (N2)	Total
North area	≤2km DSC; Midland (N3)	129 (19.5)	0 (0)	129 (19.5)
	≤2km DSC; Foothills (N4)	0 (0)	11 (1.7)	11 (1.7)
	>2km DSC (N5)	92 (13.9)	138 (20.8)	230 (34.7)
	Not in North area	56 (8.5)	236 35.6	292 (44.1)
	Total	277 (42)	385 (58)	662 (100)

➔ 4 profils de risque

B. Echelle région vs. échelle zone nord pour *P. vivax*

B)		METF region, 15 km			
		Midland, South Midland (N2)	Not in Midland, South Midland ; <900m SG (N4)	Not in Midland, South Midland ; >900m SG (N5)	Total
North area, 10 km	Not in Midland; <1.7km DSC (N3)	0 (0)	0 (0)	10 (1.5)	10 (1.5)
	Not in Midland; >1.7km DSC (N4)	0 (0)	5 (0.7)	134 (20.2)	139 (21)
	Midland; <2.5km DSC (N6)	132 (19.9)	0 (0)	0 (0)	132 (19.9)
	Midland; >2.5km DSC; <7.5km DSG (N8)	82 (12.4)	0 (0)	0 (0)	82 (12.4)
	Midland; >2.5km DSC; >7.5km DSG (N9)	7 (1.1)	0 (0)	0 (0)	7 (1.1)
	Not in North area	71 (10.7)	19 (2.9)	202 (30.5)	292 (44.1)
	Total	292 (44.1)	24 (3.6)	346 (52.3)	662 (100)

➔ 6 profils de risque

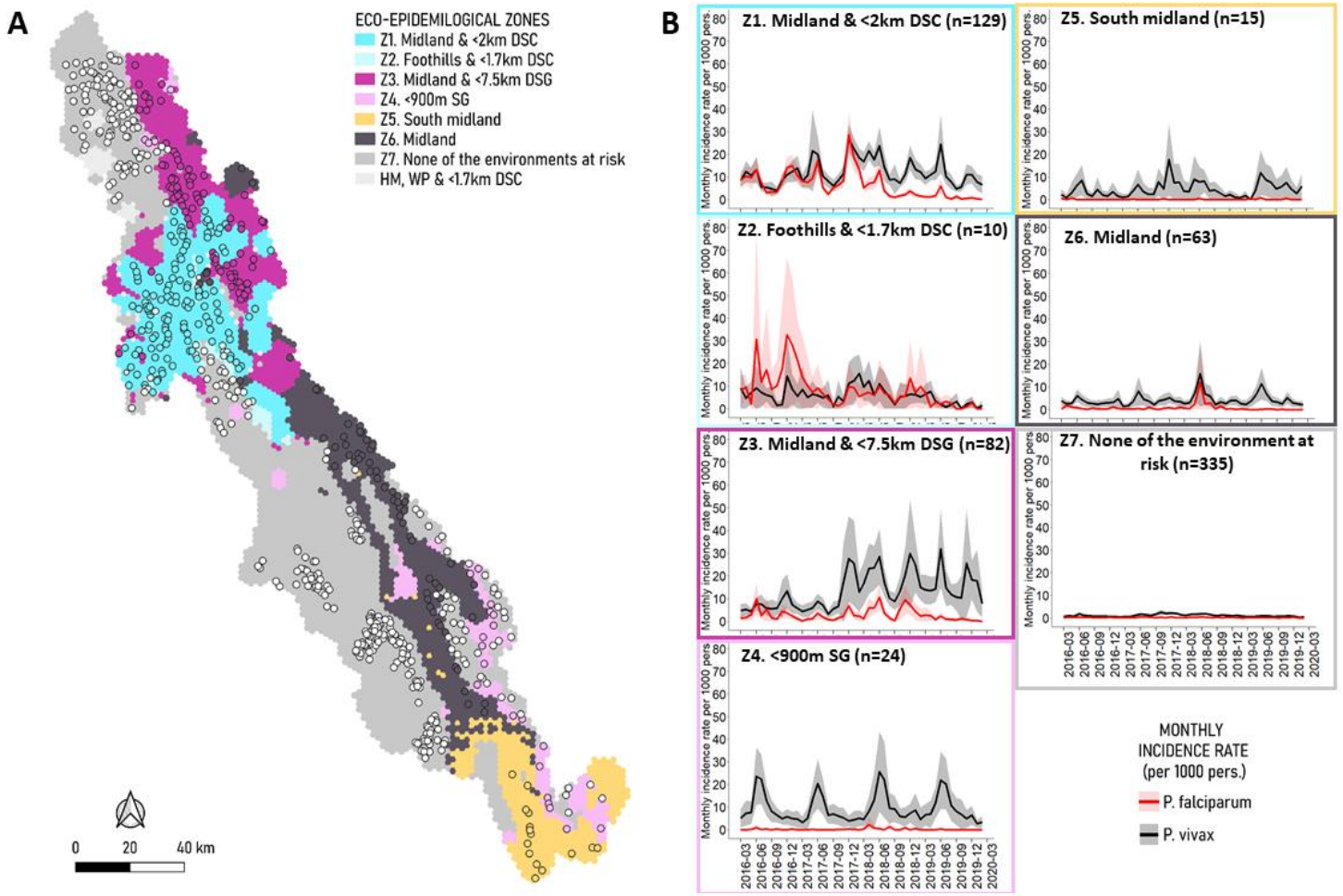
C. *P. falciparum* vs. *P. vivax*

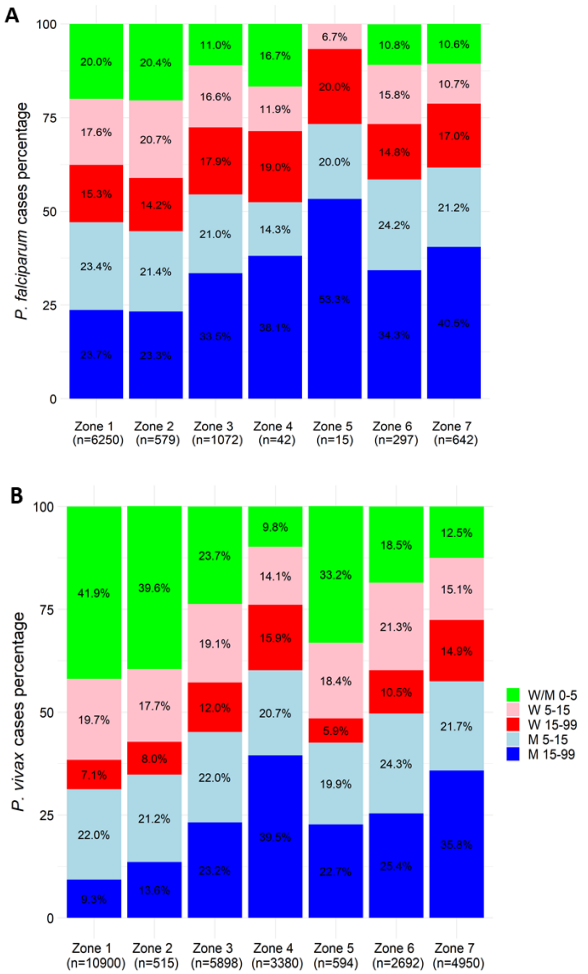
C) Pv \ Pf	Not in Midland; >2km DSC	In Midland; >2km DSC	Foothills; <2km DSC	In Midland; <2km DSC
Not in Midland, South Midland; >900m SG; >1.7km DSC	**335 (50.6)** Z7	0 (0)	1 (0.15)	0 (0)
Not in Midland, South Midland; <900 SG; >1.7km DSC	**24 (3.6)** Z4	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Not in Midland, South Midland; <1.7km DSC; >900m SG	0 (0)	0 (0)	**10 (1.5)** Z2	0 (0)
In Midland, South Midland; >2.5km DSC; >7.5km DSG	**15 (2.3)** Z5	**63 (9.5)** Z6	0 (0)	0 (0)
In Midland; <2.5km DSC	0 (0)	3 (0.45)	0 (0)	**129 (19.4)** Z1
In Midland; >2.5km DSC; <7.5km DSG	0 (0)	**82 (12.4)** Z3	0 (0)	0 (0)

➔ 7 zones éco-épidémiologiques

D. Zones éco-épidémiologiques

➔ 7 zones éco-épidémiologiques avec différentes profils d'incidence de paludisme et différentes population à risque





3. DISCUSSION

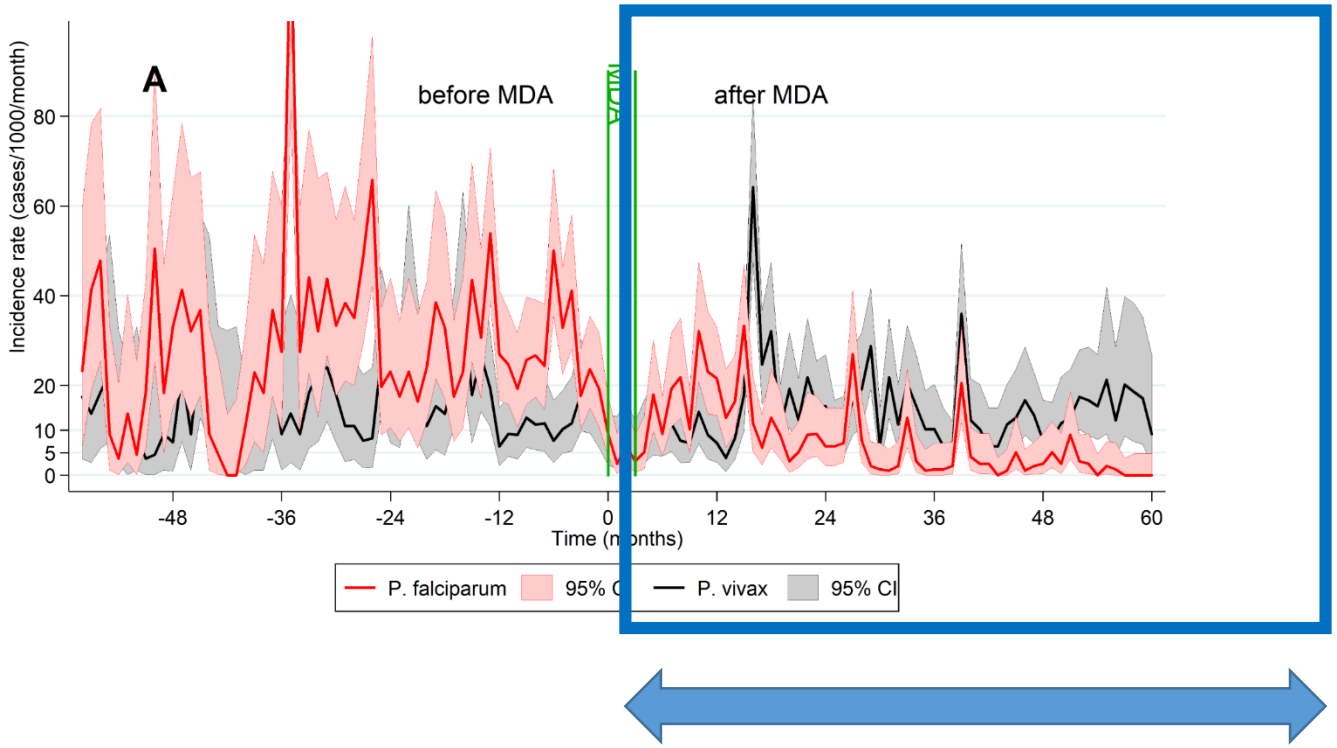
- Dans une région majoritairement forestière, grande diversité de paysages forestiers avec un gradient de « naturel » à anthropisé
- 1 climats et 2 paysages associés aux profils d'incidence principalement
- Autre étude sur les villages ayant uniquement reçu de la MDA : incidence post-MDA plus faible pour les villages à proximité du paysage mêlant de la forêt dense, clairsemée et des basses végétations
- 7 zones éco-épidémiologiques avec différentes profils d'incidence de paludisme et différentes population à risque

➔ La forêt n'est pas un environnement homogène

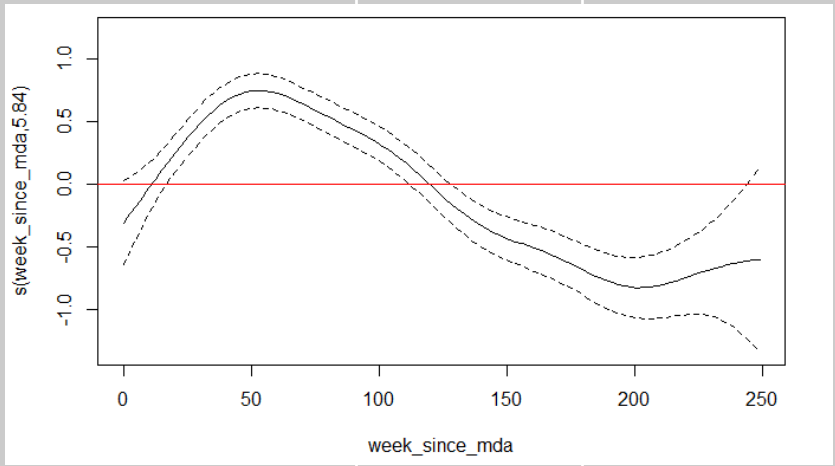
➔ Incite à prendre en compte dans la modélisation cette diversité d'environnement forestier

➔ Intéressant pour le ciblage d'intervention et la planification de la surveillance

Factors associated with MDA impact



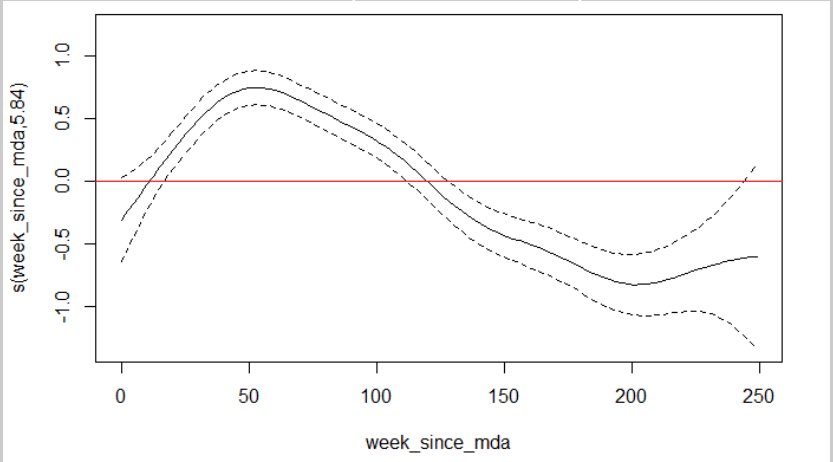
Post MDA study PF incidence study:
Incidence follow-up= 4.2 years (range=2.6-6.6)
Clinical PF cases recorded=16 (range=0-171)

Variable		Incidence Rate Ratio	95% CI	p.value
Climate	Warm hot season/midland	0.23	0.10-0.52	0.0004
Nearer Landscape Mountain valley	+1 km	1.36	1.00-1.85	0.052
Nearer Landscape Mountain side	+1 km	0.80	0.72-0.89	0.00004
Incidence in neighbouring villages 2 months before (5 weeks ma)	+1 case/1000/week	1.15	1.11-1.19	$<10^{-6}$
Occurrence of ≥1 stock out at the malaria post in the previous month	Yes/No	1.51	1.26-1.82	0.00001
Additional mass intervention(s) conducted	Yes/No	0.30	0.21-0.42	$<10^{-6}$
Time since MDA spline				$<10^{-15}$

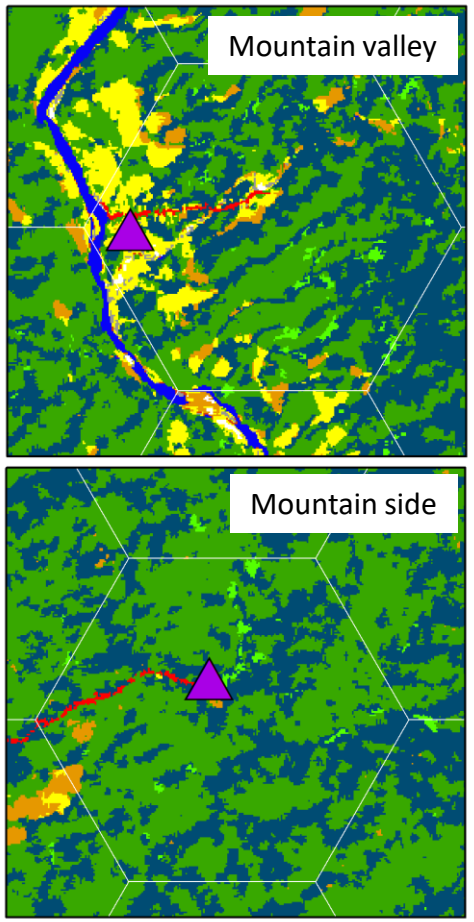
Results: factors associated with post-MDA PF incidence

Village effects: environment

Post-MDA management

Variable		Incidence Rate Ratio	95% CI	p.value
Climate	Warm hot season/midland	0.23	0.10-0.52	0.0004
Nearer Landscape Mountain valley	+1 km	1.36	1.00-1.85	0.052
Nearer Landscape Mountain side	+1 km	0.80	0.72-0.89	0.00004
Incidence in neighbouring villages 2 months before (5-week moving avg)	+1 case/1000/week	1.15	1.11-1.19	$<10^{-6}$
Occurrence of ≥1 stock out at the malaria post in the previous month	Yes/No	1.51	1.26-1.82	0.00001
Additional mass intervention(s) conducted	Yes/No	0.30	0.21-0.42	$<10^{-6}$
Time since MDA spline				$<10^{-15}$

Results: factors associated with post-MDA PF incidence



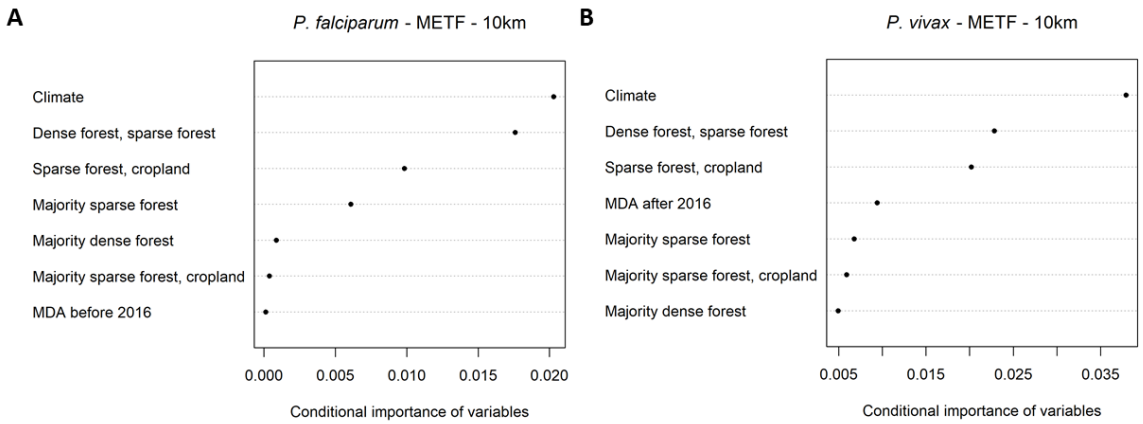
Rice paddies
River
Deforestation+
Build-up

Pop. Density+
Connectivity?

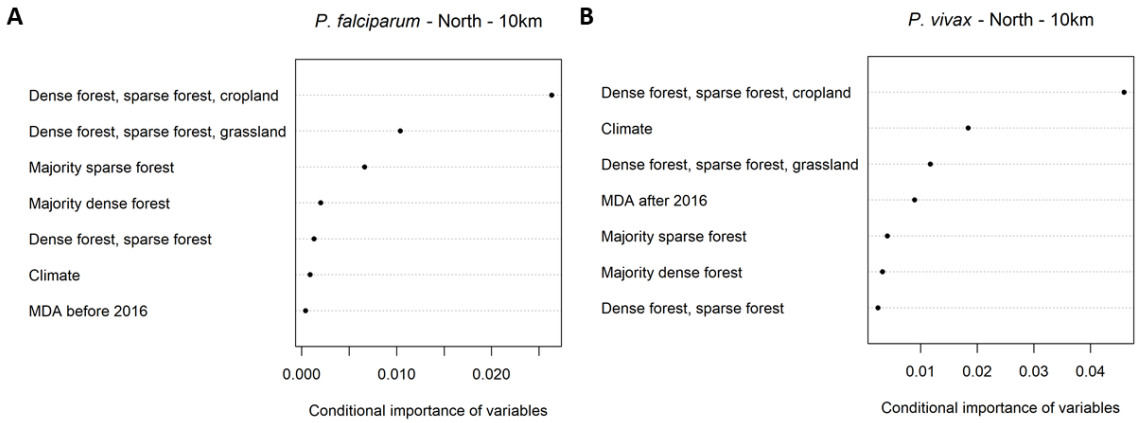
Altitude+
Steep+
Land. frag. -

Remote?
Farms away from the village?

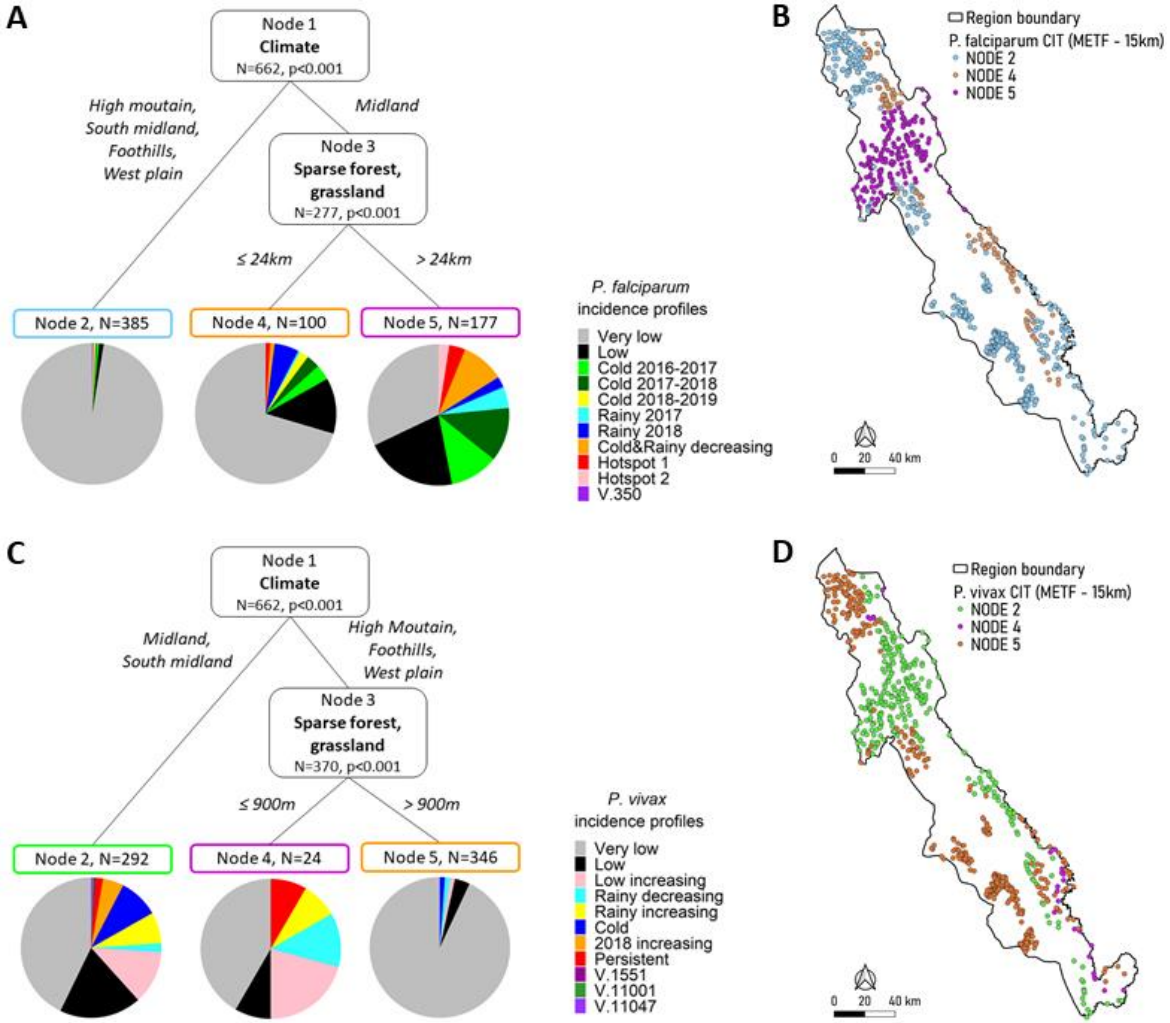
CRF - Région – 10 km



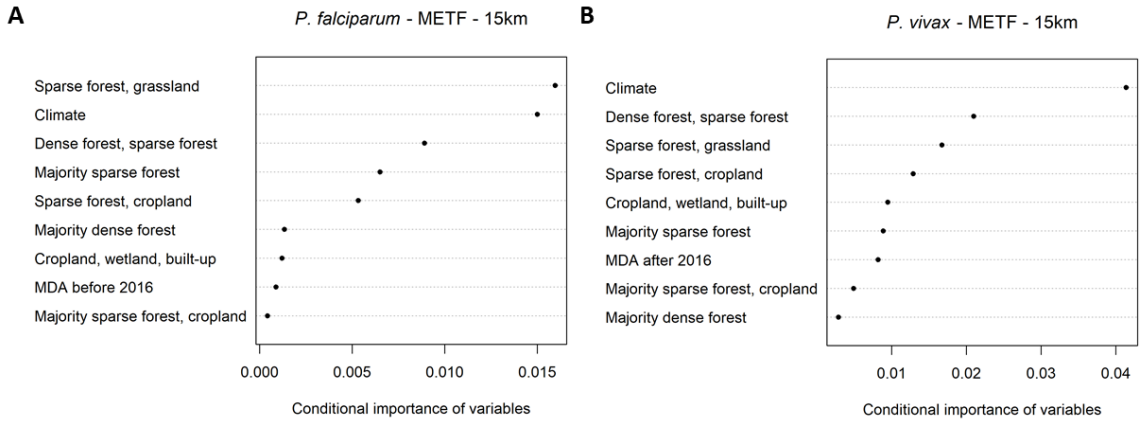
CRF - Zone Nord – 10 km



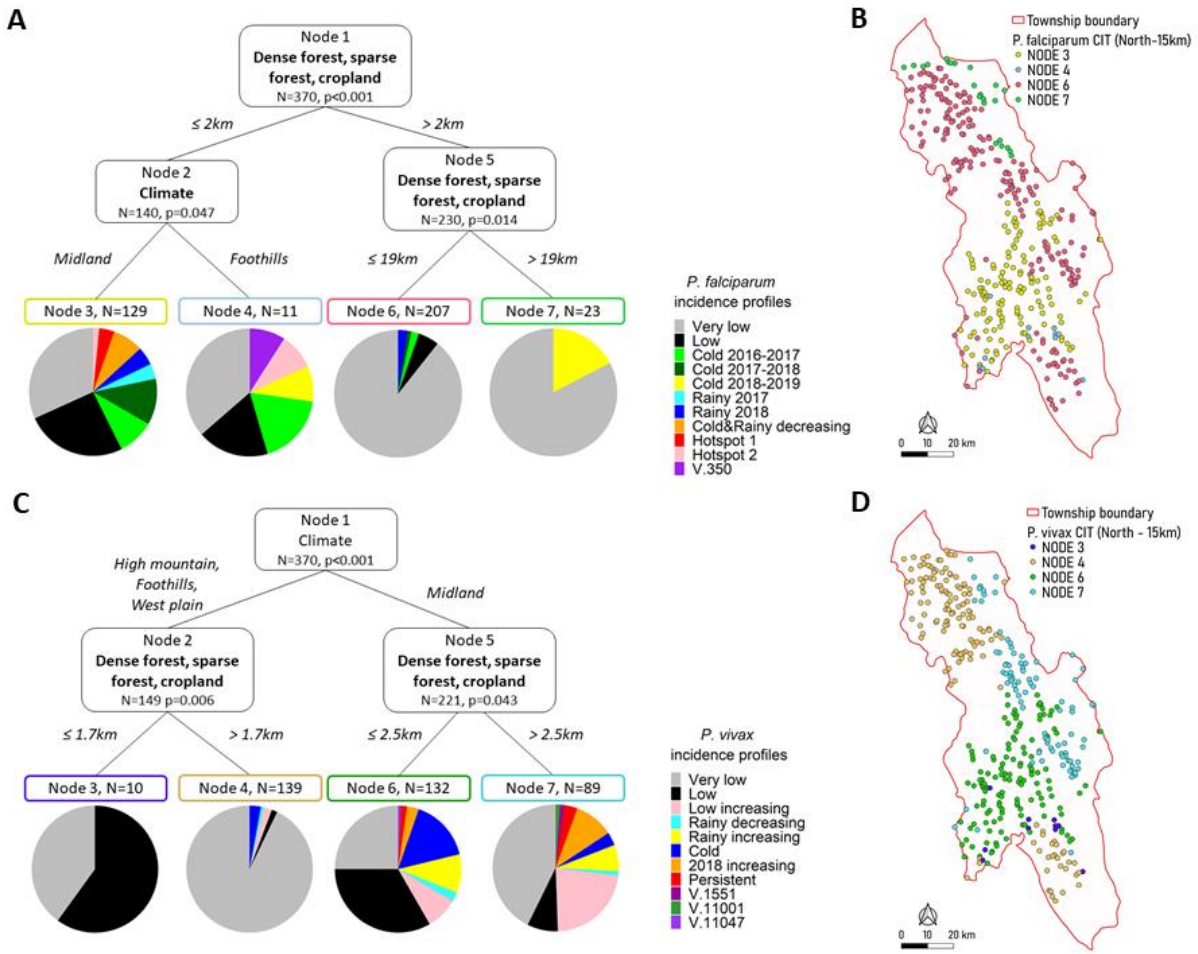
CIT - Région – 15 km



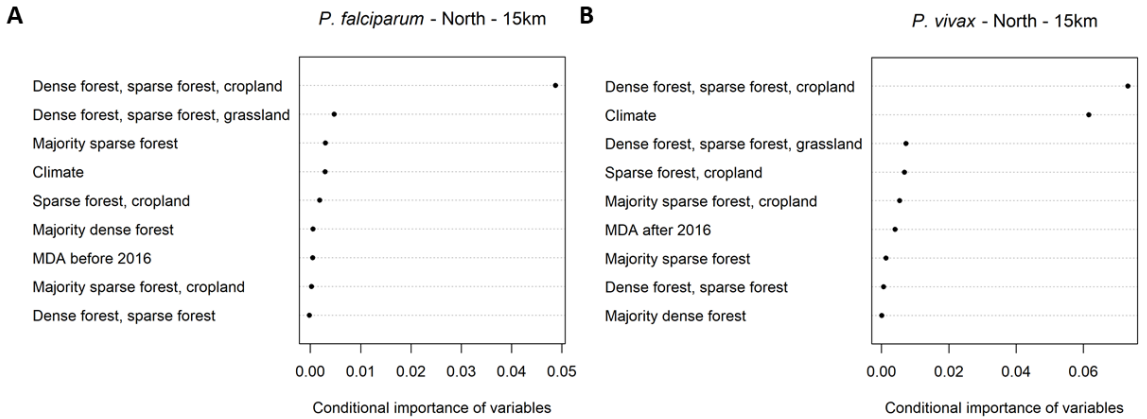
CRF - Région – 15 km



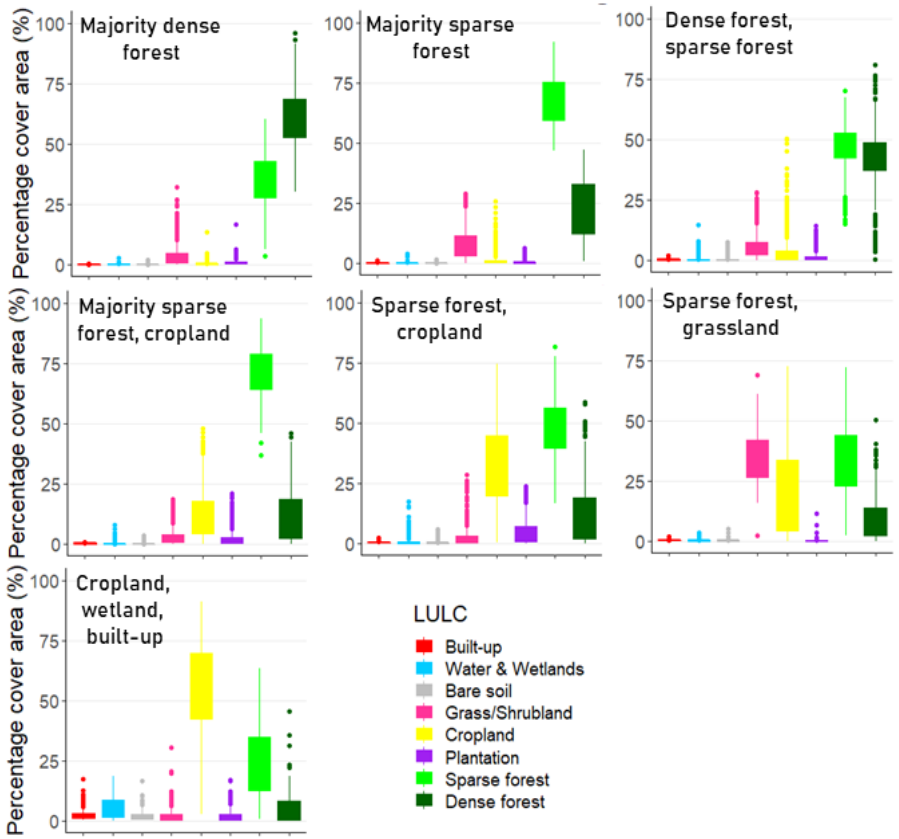
CIT – Zone Nord – 15 km



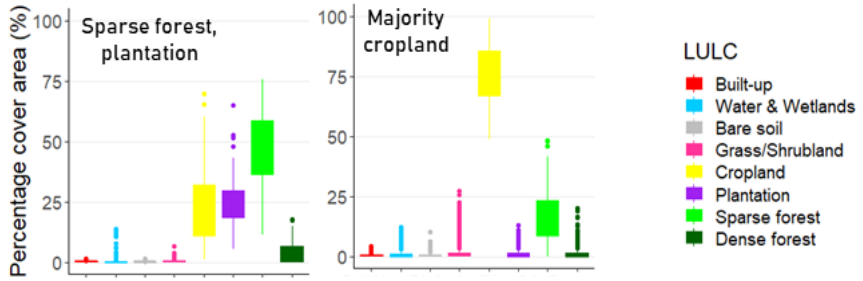
CRF – Zone Nord – 15 km



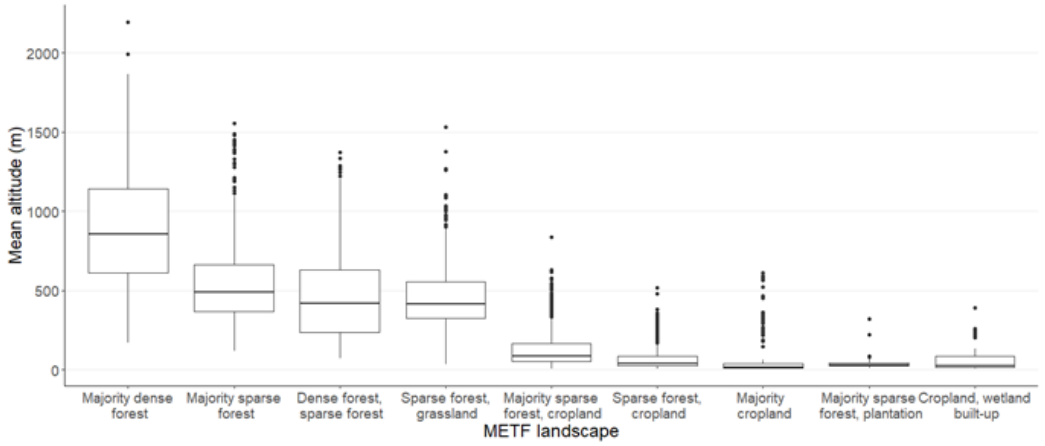
A)

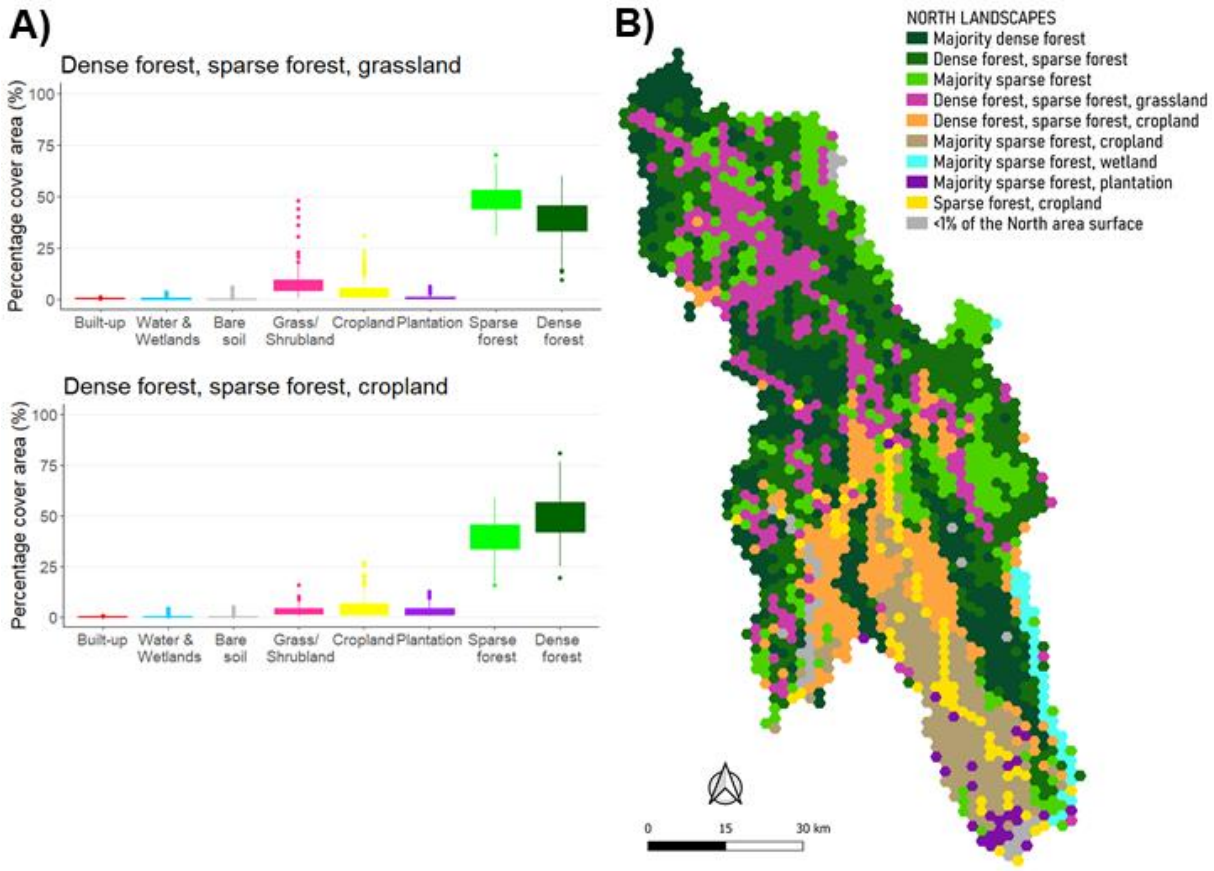

Majority dense forest
Majority sparse forest
Dense forest, sparse forest
Majority sparse forest, cropland
Sparse forest, cropland
Sparse forest, grassland
Cropland, wetland, built-up
Percentage cover area (%)
LULC
Built-up
Water & Wetlands
Bare soil
Grass/Shrubland
Cropland
Plantation
Sparse forest
Dense forest

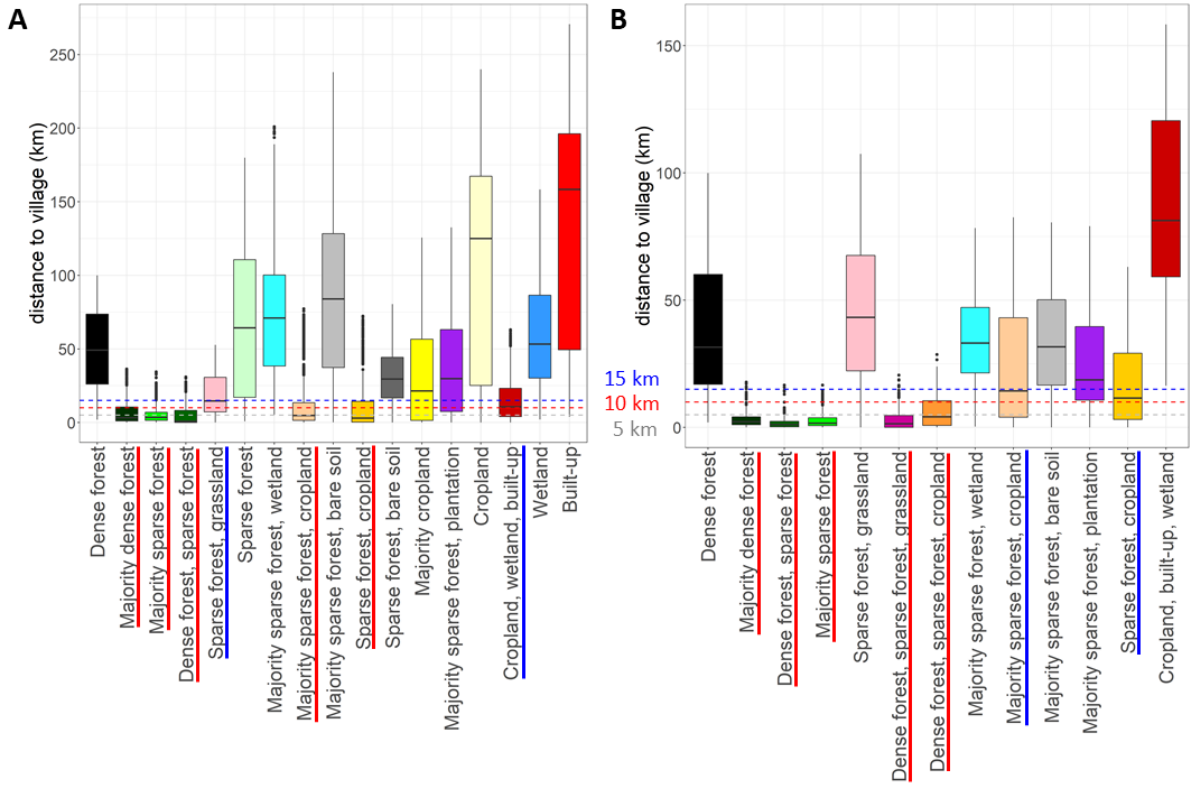
B)

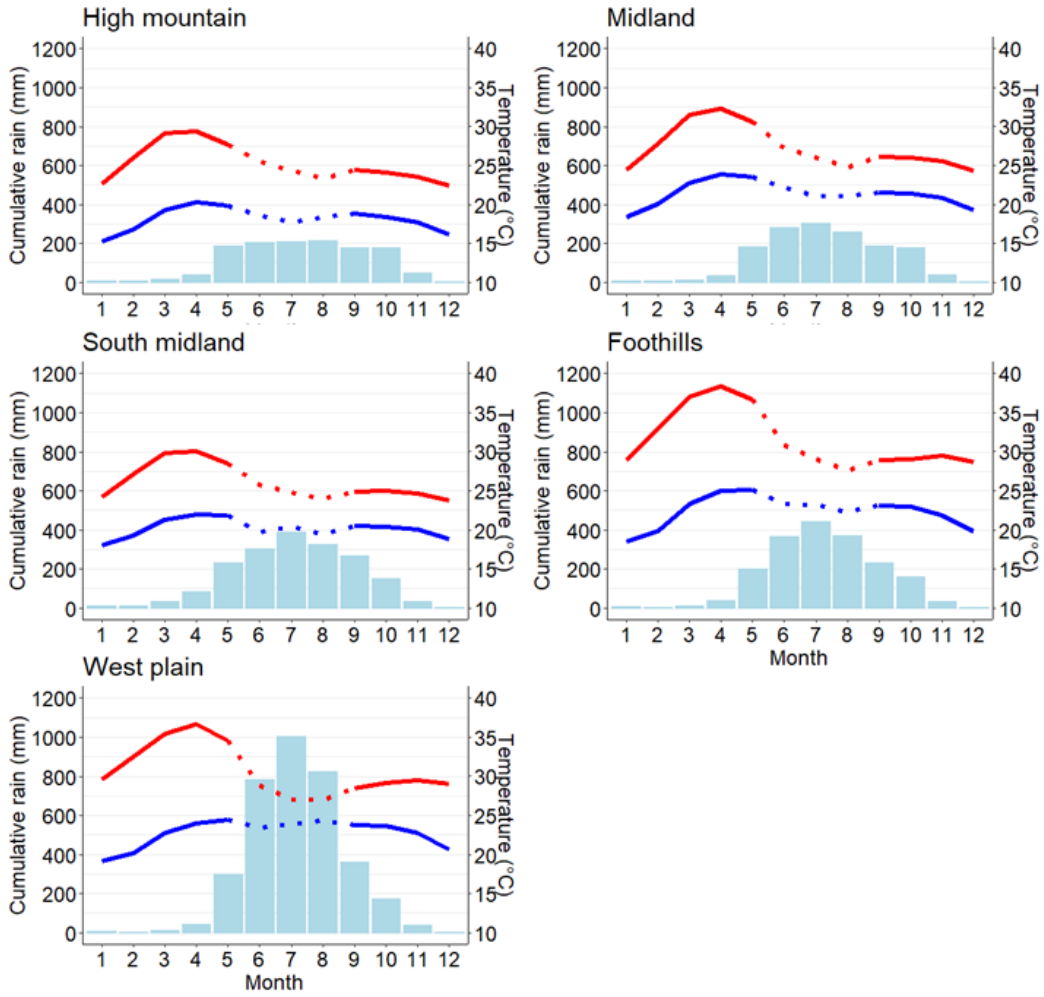

Sparse forest, plantation
Majority cropland
Percentage cover area (%)
LULC
Built-up
Water & Wetlands
Bare soil
Grass/Shrubland
Cropland
Plantation
Sparse forest
Dense forest

C)


Mean altitude (m)
Majority dense forest
Majority sparse forest
Dense forest, sparse forest
Sparse forest, grassland
Majority sparse forest, cropland
Sparse forest, cropland
Majority cropland
Majority sparse forest, plantation
Cropland, wetland built-up
METF landscape


A)
Dense forest, sparse forest, grassland
Percentage cover area (%)
Built-up
Water & Wetlands
Bare soil
Grass/ Shrubland
Cropland
Plantation
Sparse forest
Dense forest
Dense forest, sparse forest, cropland
B)
NORTH LANDSCAPES
Majority dense forest
Dense forest, sparse forest
Majority sparse forest
Dense forest, sparse forest, grassland
Dense forest, sparse forest, cropland
Majority sparse forest, cropland
Majority sparse forest, wetland
Majority sparse forest, plantation
Sparse forest, cropland
<1% of the North area surface
0
15
30 km


A
distance to village (km)
Dense forest
Majority dense forest
Majority sparse forest
Dense forest, sparse forest
Sparse forest, grassland
Sparse forest
Majority sparse forest, wetland
Majority sparse forest, cropland
Majority sparse forest, bare soil
Sparse forest, cropland
Sparse forest, bare soil
Majority cropland
Majority sparse forest, plantation
Cropland
Cropland, wetland, built-up
Wetland
Built-up
B
15 km
10 km
5 km
Dense forest, sparse forest, grassland
Dense forest, sparse forest, cropland
Majority sparse forest, bare soil
Majority sparse forest, plantation
Cropland, built-up, wetland


High mountain
Midland
South midland
Foothills
West plain
Cumulative rain (mm)
Temperature (°C)
Month