

Géoépidémiologie du paludisme dans un contexte d'élimination : l'Etat Karen, Myanmar

Jordi Landier
Groupe GéoEpi - UMR SESSTIM
IRD-INSERM-Aix Marseille Univ
Marseille, France

jordi.landier@ird.fr

Contexte

→ Région du Mékong et paludisme

- persistance de zones de transmission : difficiles d'accès, zones montagneuses, forestières
- contexte d'urgence face à l'émergence de *P. falciparum* multirésistant
- comment allouer efficacement des interventions dans un contexte de plus en plus hétérogène ?
- facteurs de risque individuels :
 - => stratégies dirigées vers les personnes « qui vont en forêt »

Traitement préventif intermittent des personnes « qui vont en forêt » au Cambodge

- 1900 traitements distribués sur 8 mois à 700 personnes, pour prévenir 10 épisodes de paludisme à *P. falciparum* et 94 épisodes de paludisme à *P. vivax* (Tripura et al, LID 2023)
- ~2000 traitements distribués sur 7 mois à 284 personnes, pour une diminution de prévalence de 2.5 à 0.3% pour *P. falciparum* (-6 infections) et de 20 à 4% pour *P. vivax* (-46 infections) pour les participants encore sous prophylaxie (Iv et al, Lancet regional WP, 2024)

Mieux comprendre l'hétérogénéité du risque à l'intérieur des régions de persistance

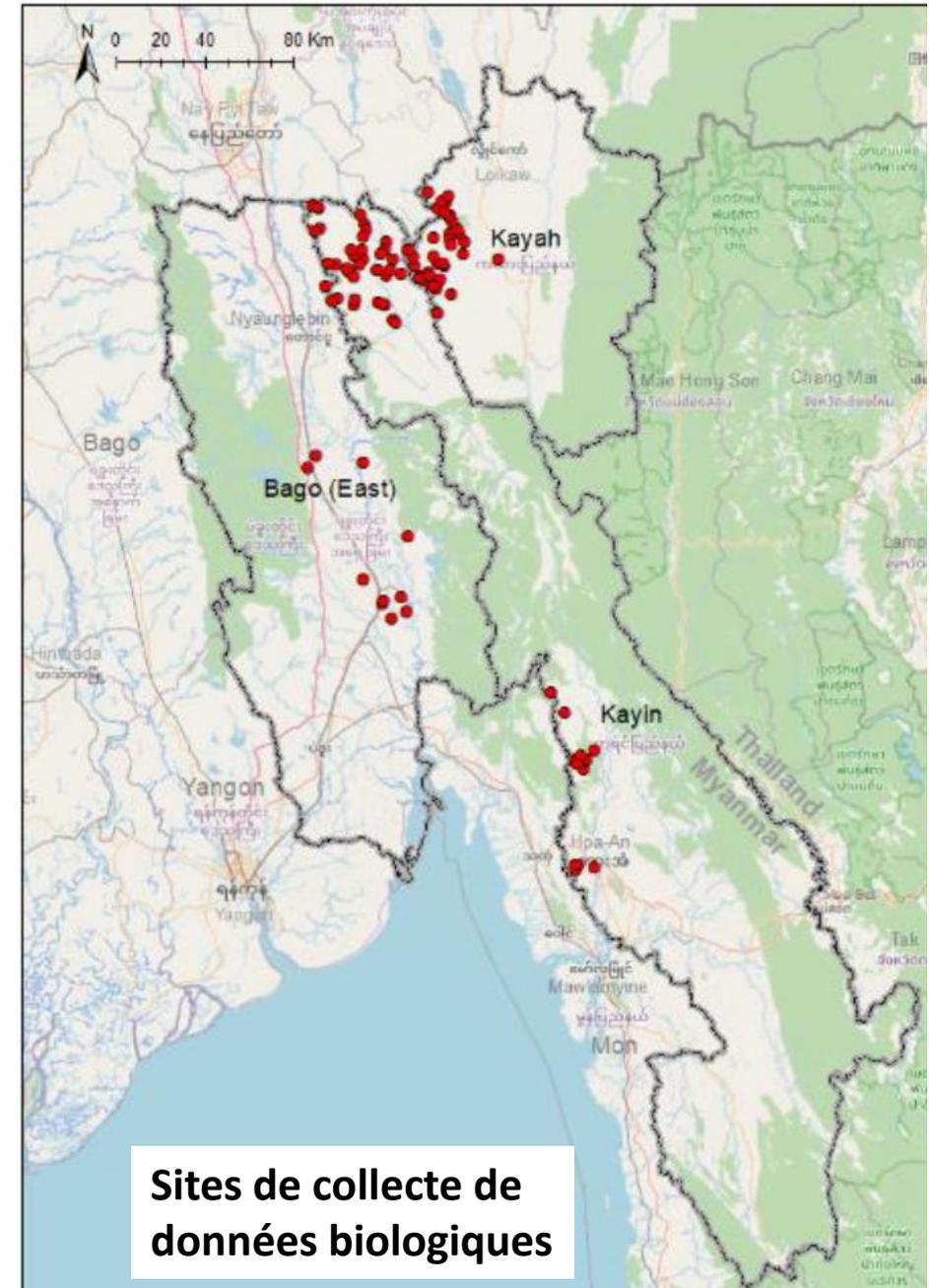
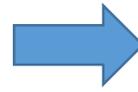
→ **surveillance** (élimination/résurgence) & **stratification** (allouer des interventions selon le contexte)

Contexte : un exemple récent

Utilisation de séroprévalence d'anticorps anti-salive d'Anophèles + anticorps anti-Plasmodium

+ données environnementales

+ modèle bayésien géospatial conjoint



Contexte

Utilisation de séroprévalence d'anticorps anti-salive d'Anophèles + anticorps anti-Plasmodium

+ données environnementales



+ modèle bayésien géospatial conjoint

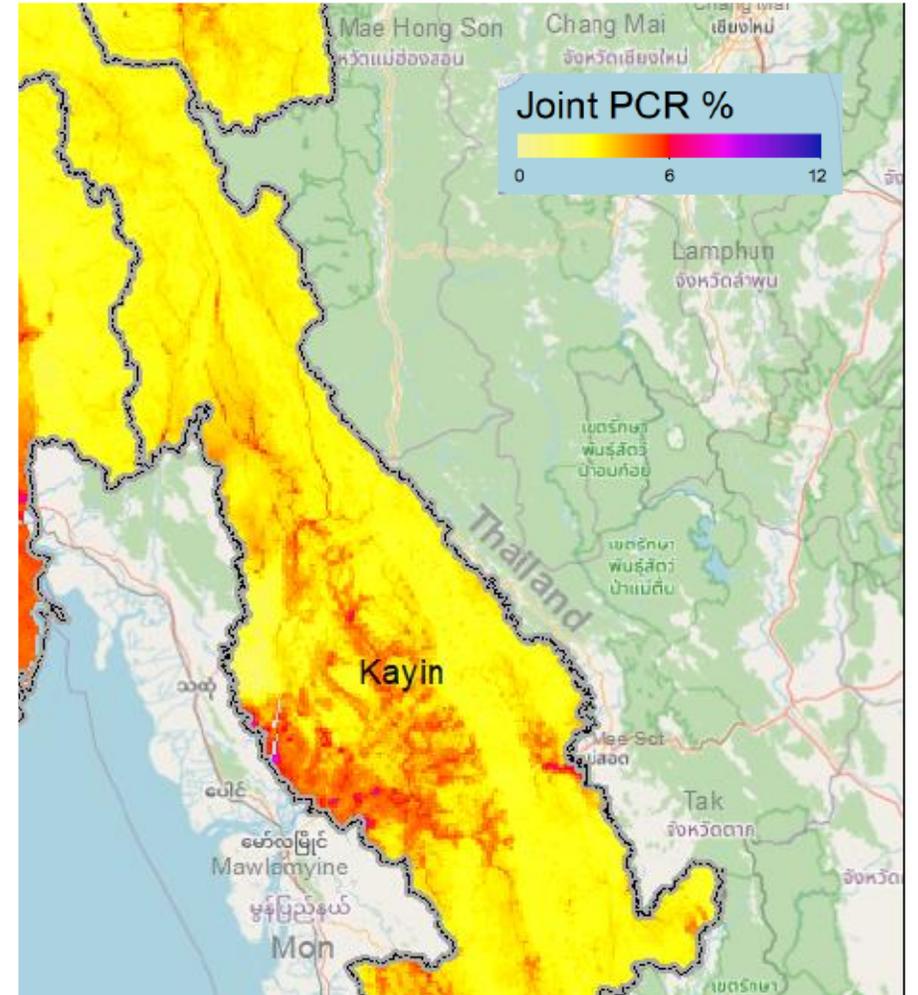
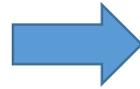
Variable	Description
Vectorial	
<i>An. dirus</i> occurrence (10) (probability)	MAP predicted occurrence
<i>An. minimus</i> occurrence (10) (probability)	MAP predicted occurrence
<i>An. maculatus</i> occurrence (10) (probability)	MAP predicted occurrence
Climatic	
Aridity index (11)	
Potential evapotranspiration (11) (mm/t)	
Rainfall (12) (mm)	2015 sum annual
Land surface temperature (day) (13) (°C)	2015 mean annual
Land surface temperature (night) (13) (°C)	2015 mean annual
Land surface temperature (diurnal difference) (13) (°C)	2015 mean annual (day-night difference)
Temperature Suitability Index for <i>P. falciparum</i> (14)	
Environmental	
Distance to water (15) (meters)	Measure of distance to lakes, wetlands, rivers, and streams, accounting for slope and precipitation
Tasseled Cap Wetness Index (16)	Measure of wetness, i.e., soil moisture, water, etc.
Topographic Wetness Index (17)	Elevation derived
Elevation (17) (meters)	
Slope (17)	Elevation derived
Enhanced Vegetation Index (18, 19)	2015 mean annual
Tree coverage fraction (% forest cover) (20)	
Tasseled Cap Brightness Index (16)	Measure of land reflectance, i.e., manmade structures, barren/rocky ground
Inaccessibility (21) (minutes)	Travel time to cities with population <5,000
Population density (people/pixel) (22, 23)	
Night-time lights (24)	Measures of presence of lights, i.e., cities, towns, etc.

Contexte

Utilisation de séroprévalence d'anticorps anti-salive d'Anophèles + anticorps anti-Plasmodium

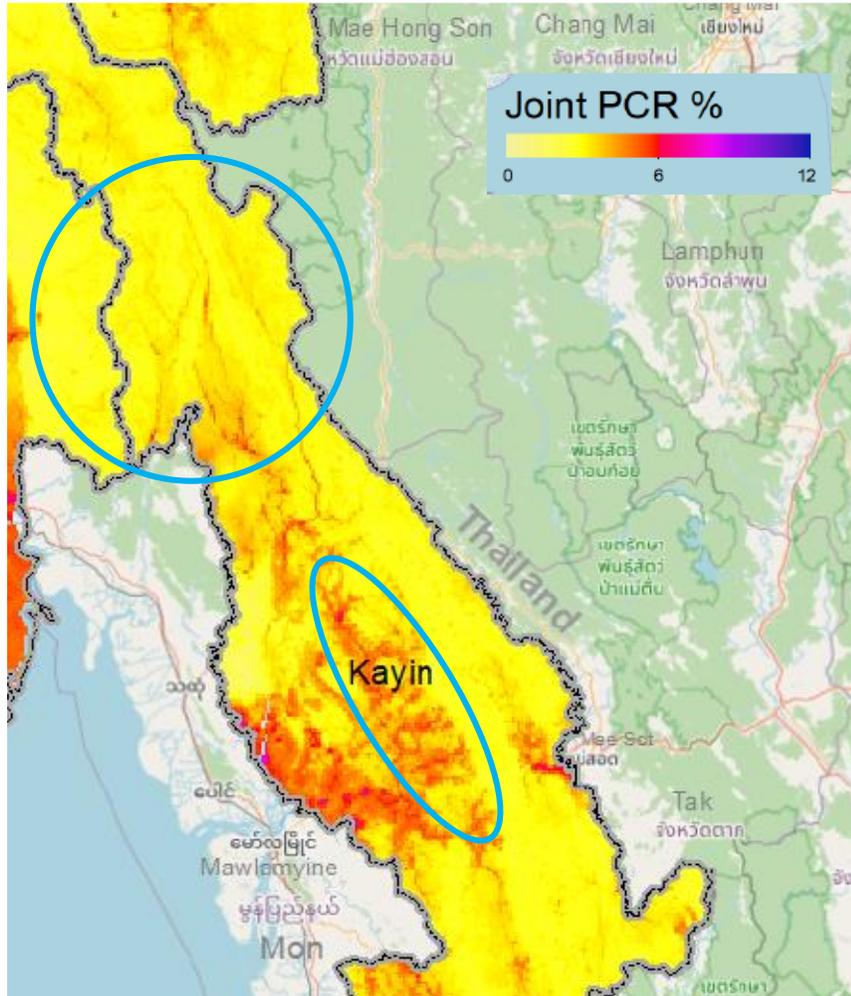
+ données environnementales

+ modèle bayésien geospatial conjoint

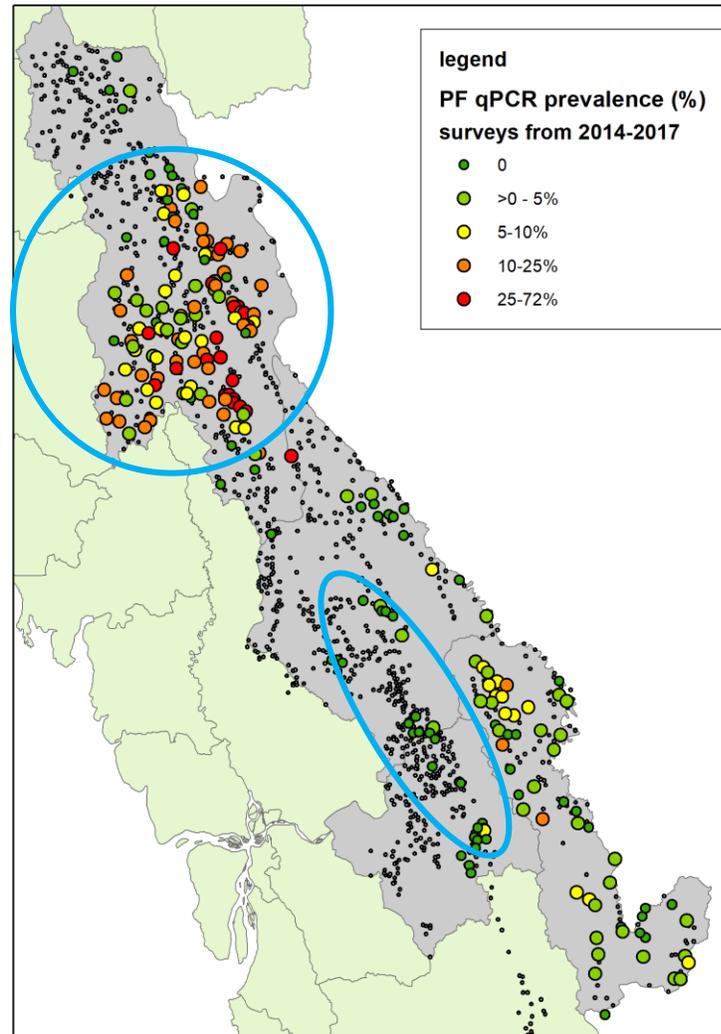


Prédiction – 2015/2016

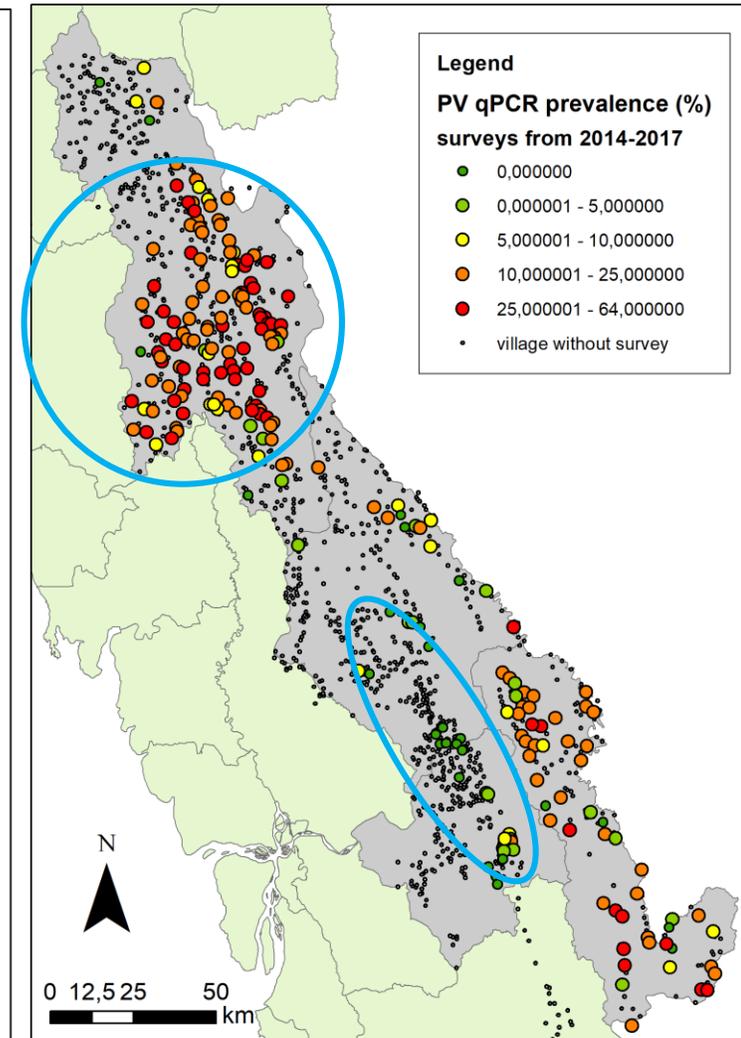
Contexte



Prédiction – 2015/2016



Observation – 2014-2017 – programme METF



Contexte : élimination du paludisme dans l'Est du Myanmar

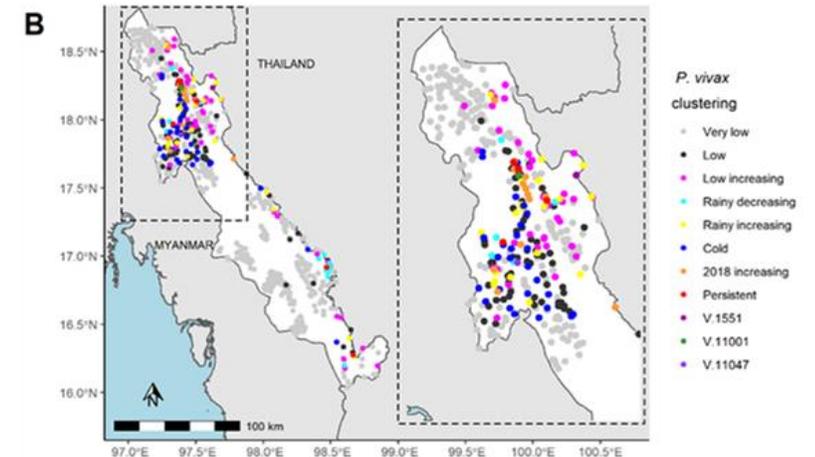
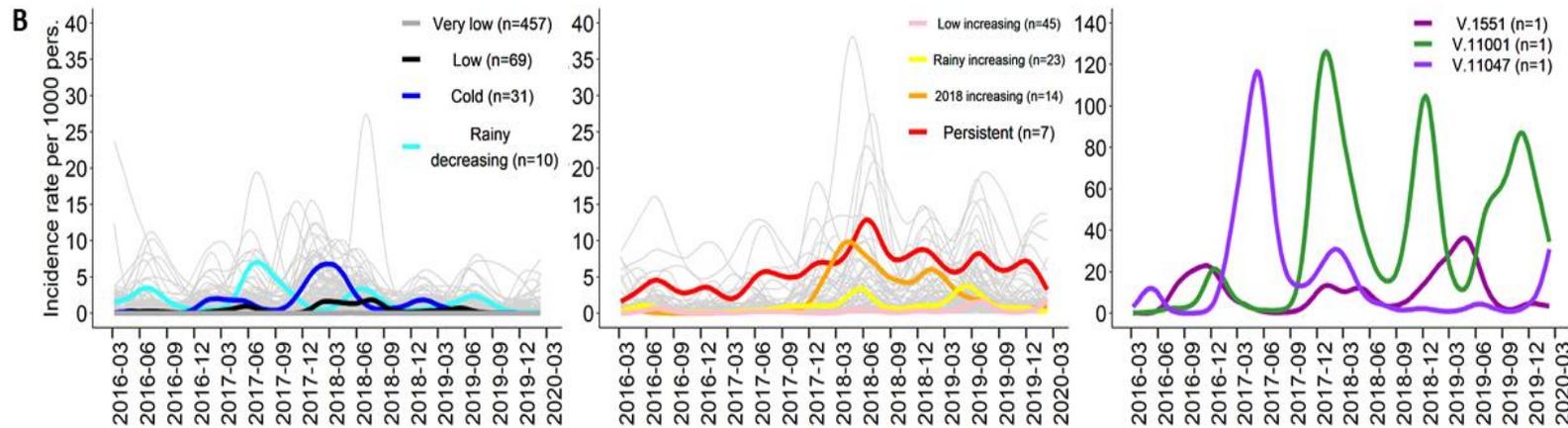
2014-2020 : programme METF en réponse à l'émergence de résistance à l'artémisinine et à la propagation de lignages de *Plasmodium falciparum* multi-résistant

- Accès au diagnostic précoce et au traitement du paludisme au niveau communautaire « malaria post »
 - Identification de réservoirs de portage asymptomatique (foyers de prévalence) et intervention de traitement de masse
 - Surveillance
- ➔ Données hebdomadaires d'incidence de paludisme à *P. falciparum* et *P. vivax*, à l'échelle village (pop 200-800 hab)

Contexte : élimination du paludisme dans l'Est du Myanmar



Travail d'Eva Legendre (THEIA 2022): classification de séries temporelles d'incidence sur 4 ans



Mise en évidence de zones écoépidémiologiques associées à la persistance

[Legendre et al, Epidemics 2023](#)
[Legendre et al, Parasites & vectors 2023](#)

➔ **Approfondir pour analyser les déterminants de la dynamique (variations annuelles et interannuelles)**

➔ **Explosion de *P. vivax* sur la période 2021-23**, préparer un travail d'analyse des contributions de facteurs naturels et anthropiques (insécurité etc...).

Objectifs

Rechercher des dynamiques annuelles locales de l'incidence du paludisme dans les villages de l'Etat Karen

Identifier les éventuels déterminants environnementaux de la dynamique locale et de ses variations interannuelles

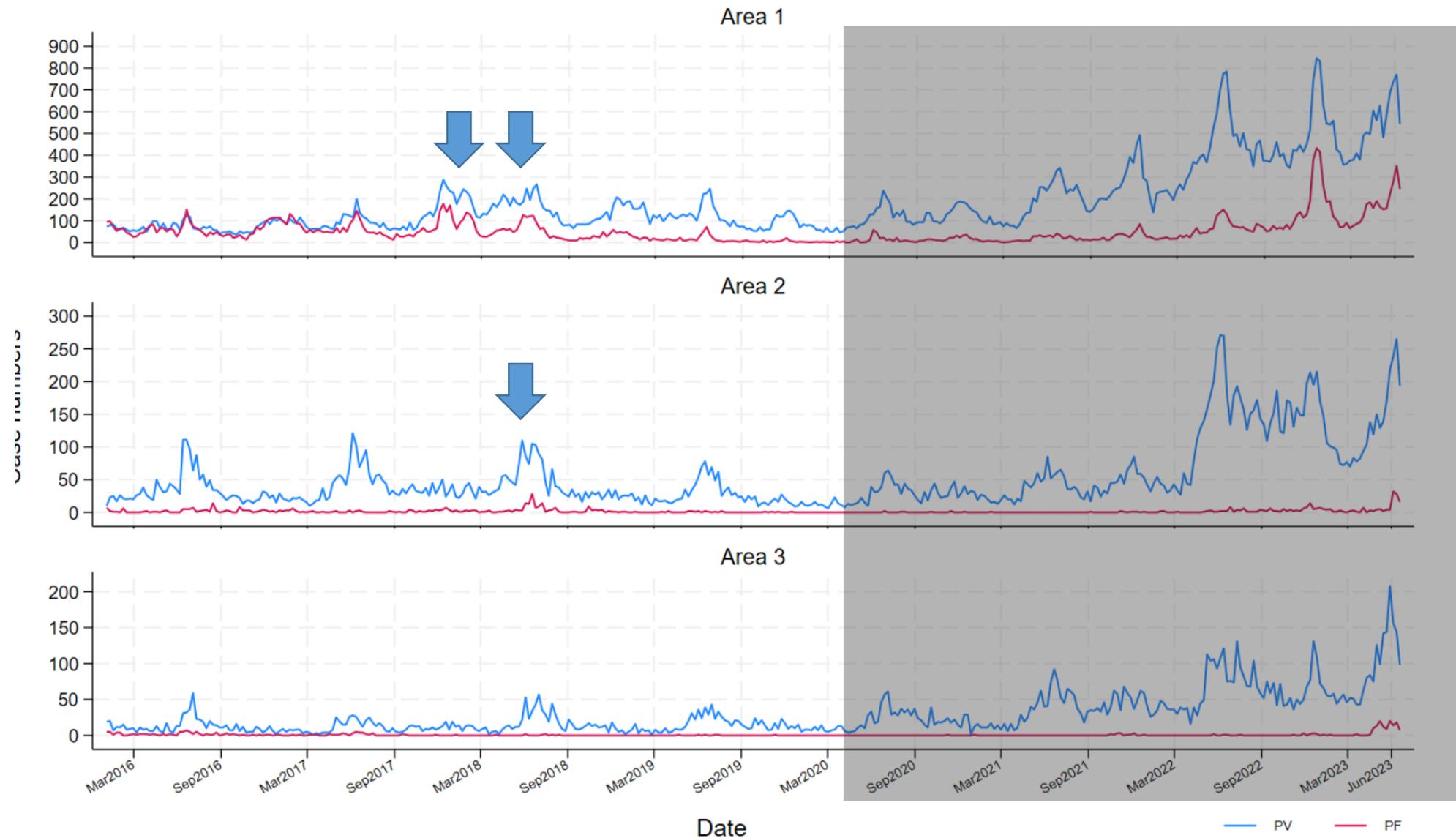
Présenter une approche d'épidémiologie/santé publique

Répliquable à l'échelle district de santé pour le Mali pour contribuer à la planification par le PNLP

Incidence du paludisme dans l'état Karen



Incidence du paludisme dans l'état Karen



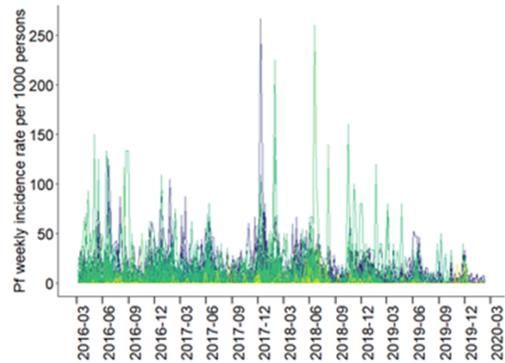
Méthodes

Rechercher des dynamiques annuelles locales de l'incidence du paludisme dans les villages de l'Etat Karen

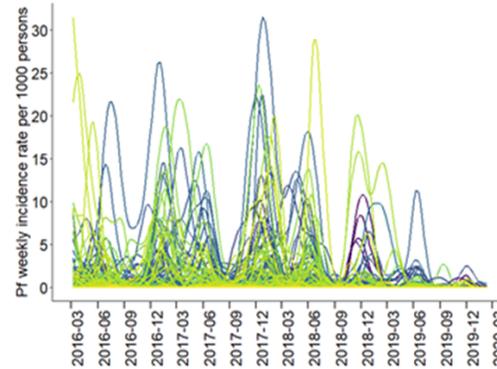
→ Découpage en séries temporelles *annuelles* (15/04, correspondant à la saison chaude – faible incidence)

→ Classification PAM après lissage FDA et calcul de distance DTW

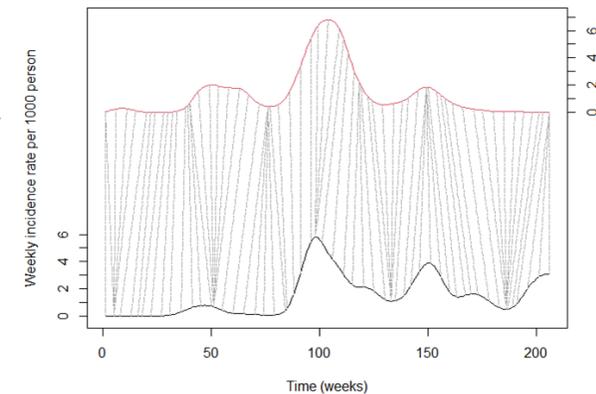
Données brutes



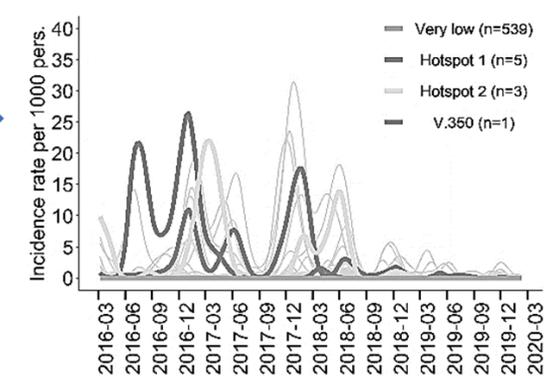
Données fonctionnelles



Matrice de distance DTW



Profils d'incidence



1

Lissage des séries chronologiques par transformation fonctionnelle

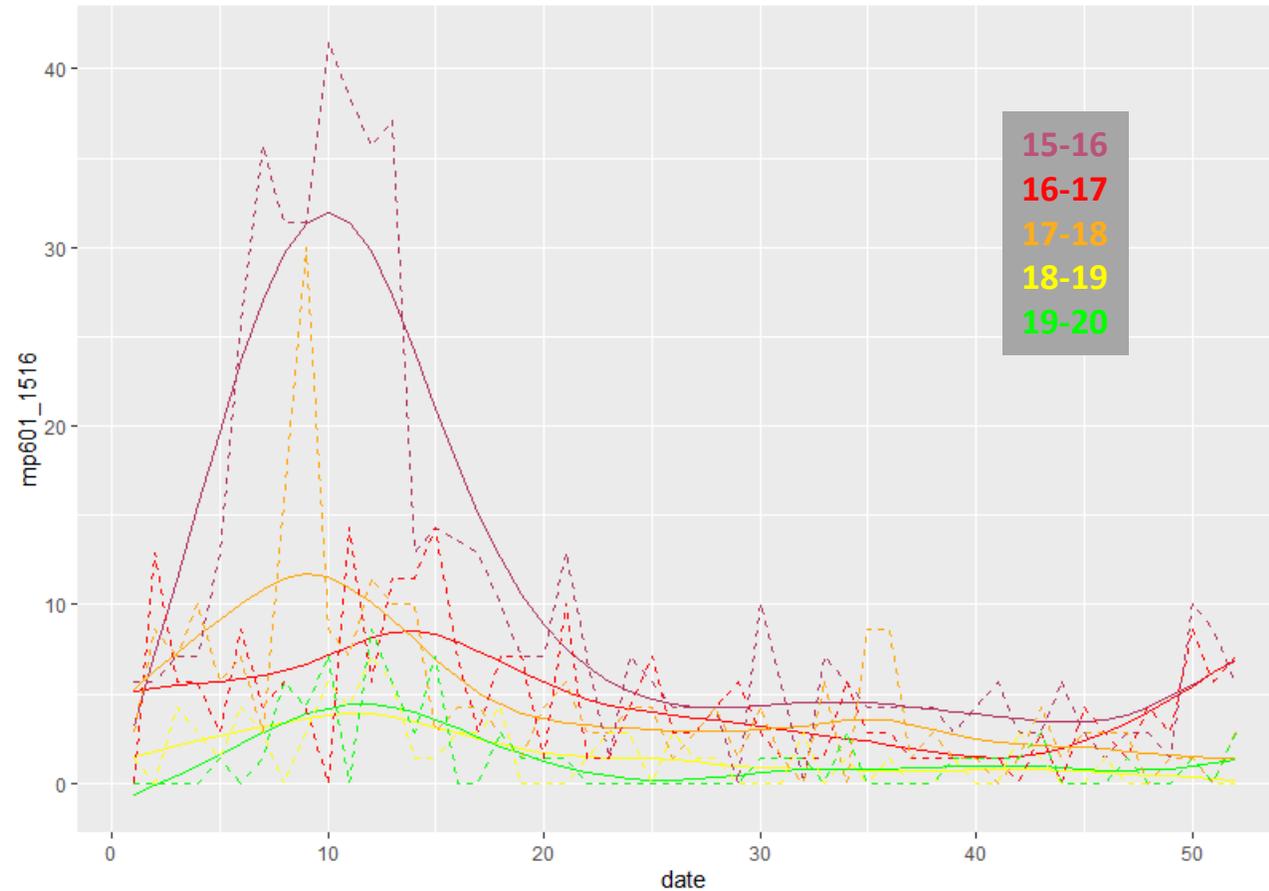
2

Calcule distance DTW

3

Classification PAM

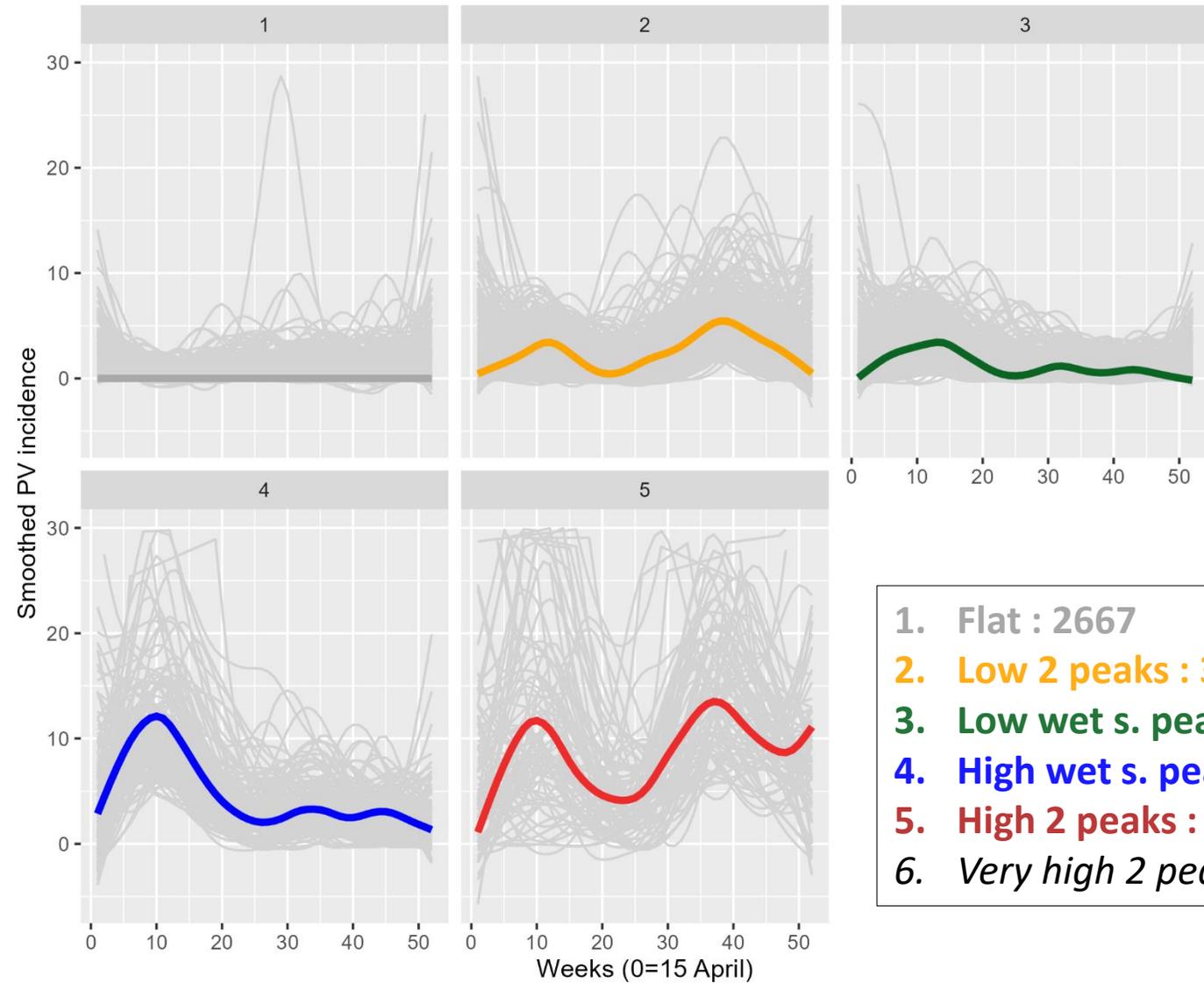
Incidence du paludisme dans l'état Karen



Données brutes et données lissées, pour 1 village, sur 5 ans

Profil d'incidence annuelle – *P. vivax*

801 villages
3347 années observées



1. Flat : 2667
2. Low 2 peaks : 324
3. Low wet s. peak : 539
4. High wet s. peak : 132
5. High 2 peaks : 81
6. Very high 2 peaks : 4

Relation entre les profils

801 villages
3347 années observées

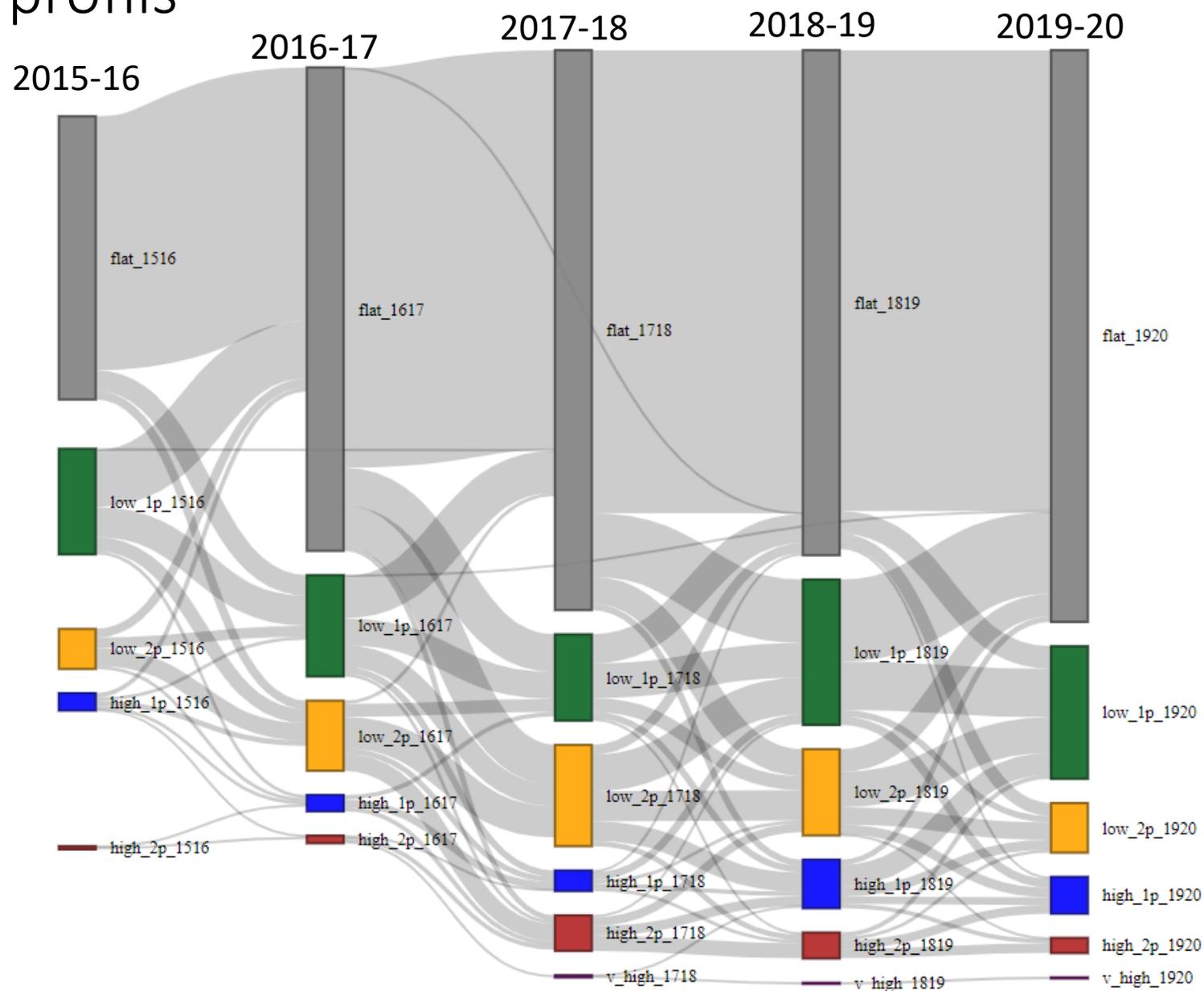
Flat

Low wet s. peak

Low 2 peaks

High wet s. peak

High 2 peaks

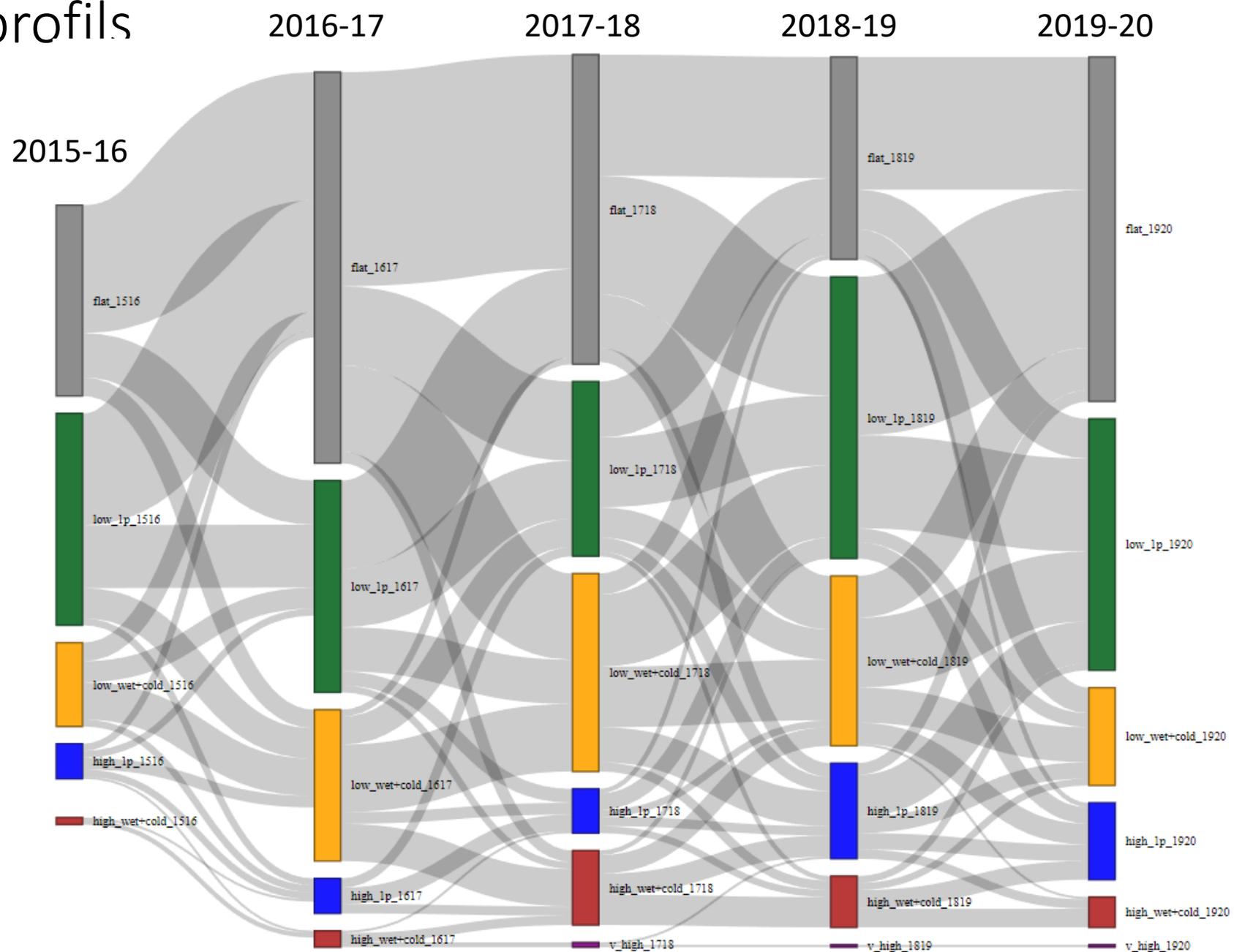


Relation entre les profils

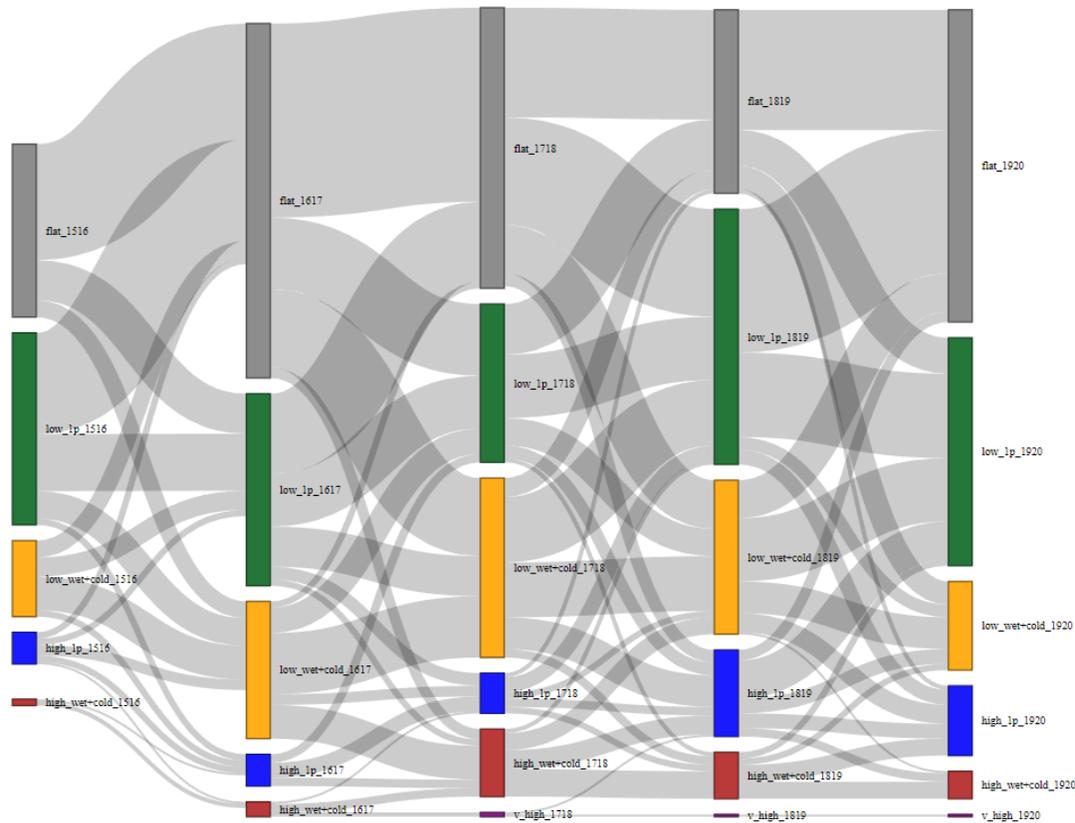
Villages
≥ 1 année hors profil « plat »
≥ 2 années de suivi

345 villages
1605 années observées

Flat
Low wet s. peak
Low 2 peaks
High wet s. peak
High 2 peaks



Relation entre les profils



		Profil année n+1				
		Flat	Low 1 p.	Low 2 p.	High 1 p.	High 2 p.
Profil année n	Flat					
	Low 1 peak					
	Low 2 peaks					
	High 1 peak					
	High 2 peaks					

**Certaines transitions semblent plus probables que d'autres
 >> explicable par l'environnement ?**

345 villages
 1605 années observées

Méthodes

Données environnementales

Plateforme GEE + {rgee} => **extraction standardisée facilitée à partir de polygones**

Sélection d'un jeu de données « type » : **observations** >> modèles ; **résolution spatiale fine** ; **fréquence $\leq 8j$** pour météo

- Pluviométrie = CHIRPS
- Températures, indices = MODIS
- Global forest change (Hansen)
- + LULC = SERVIR Mekong

Extraction **centrée sur les villages** (zone tampon)

Gestion de la colinéarité : ACP + classification ascendante hiérarchique

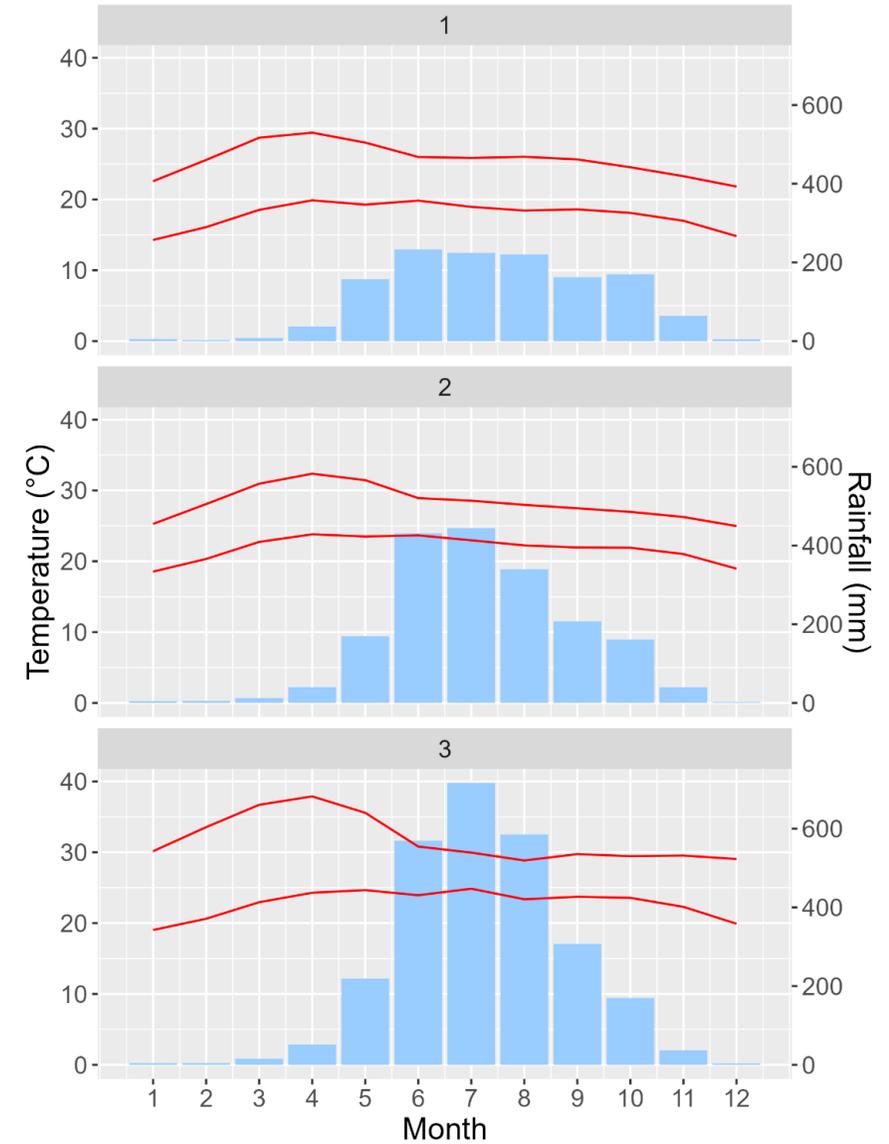
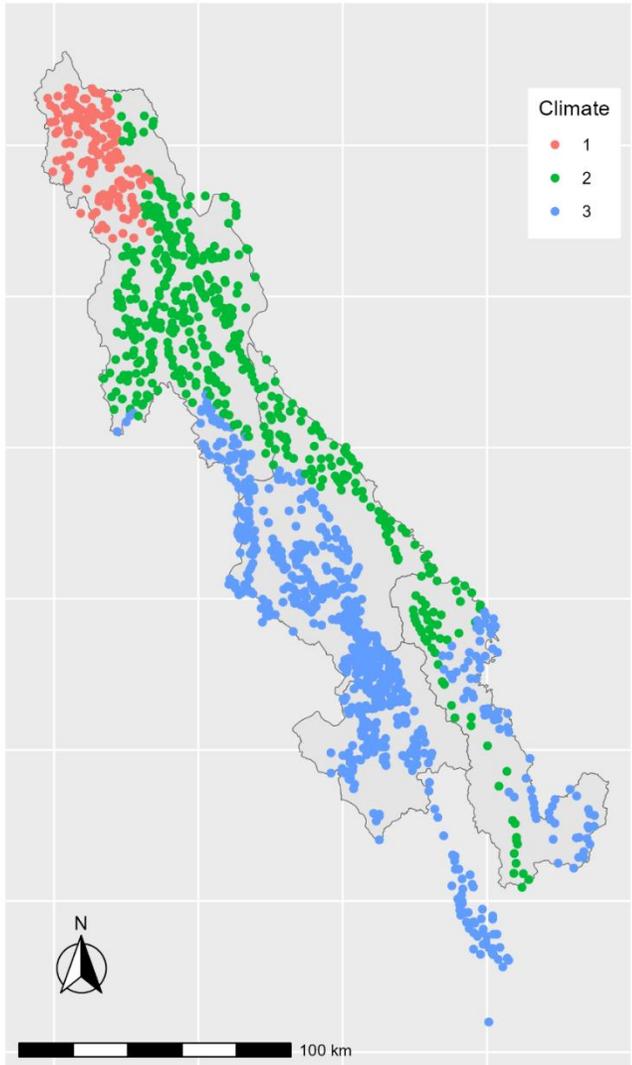
Profils

- **Climat (pluviométrie et températures moyennes mensuelles sur 10 ans)**
- **Paysage**
- **Dynamique de perte de forêt (niveau de déforestation et fragmentation sur 10 ans)**

Données météo annuelles (anomalie de cumul de pluie) et % de déforestation

Environnement

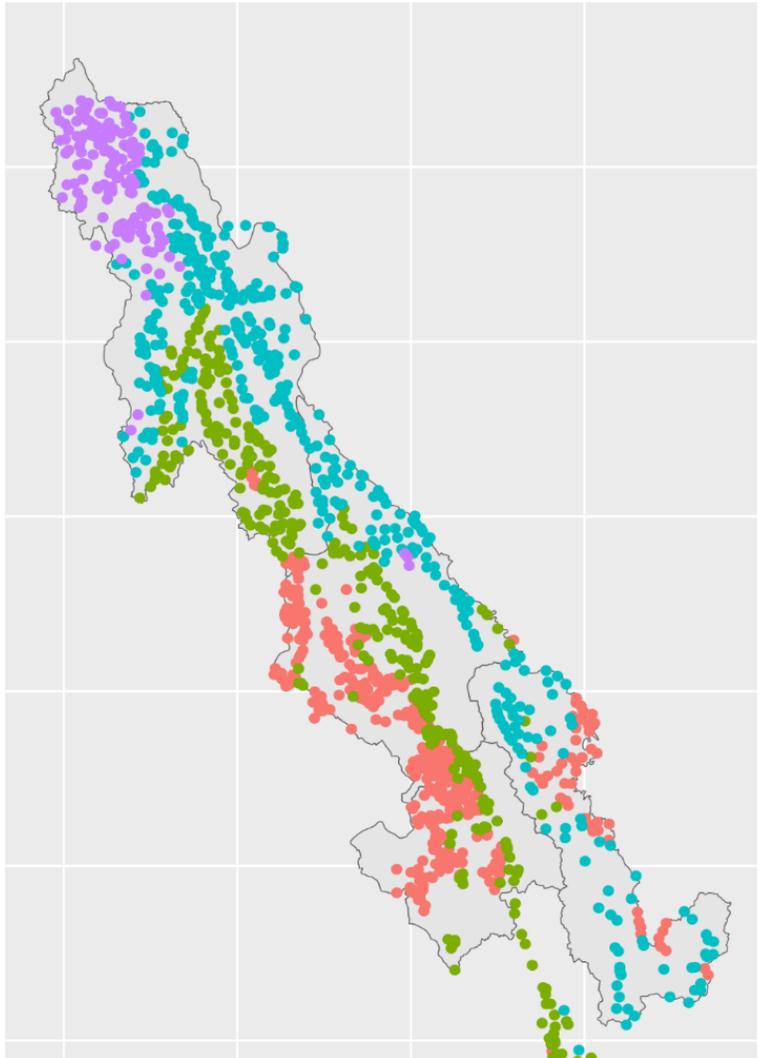
Extraction centrée sur le village > climat



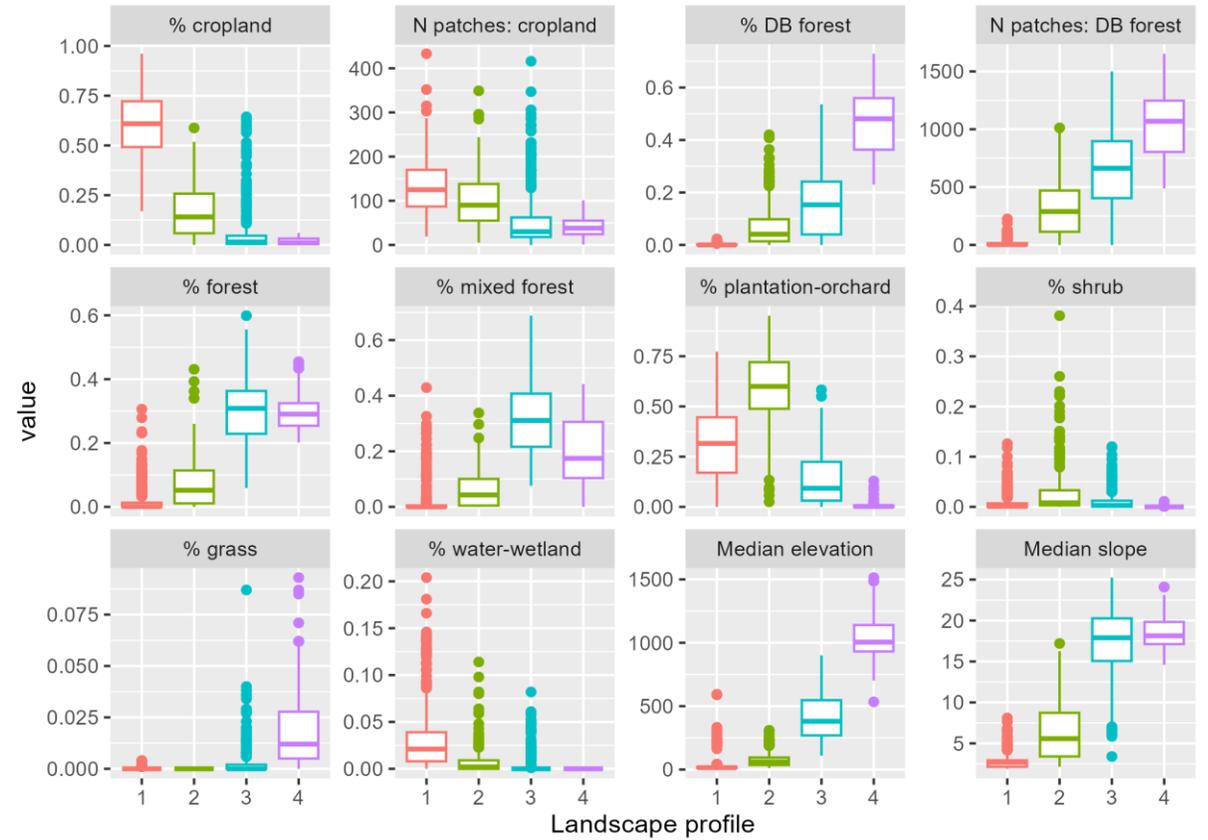
3 climats : frais et peu pluvieux (altitude) ; intermédiaire ; chaud et très pluvieux (plaines)

Environnement

Extraction centrée sur le village > paysage



landscape_mkg



4 paysages :

Agricole – plaines

Vallées larges et piémont

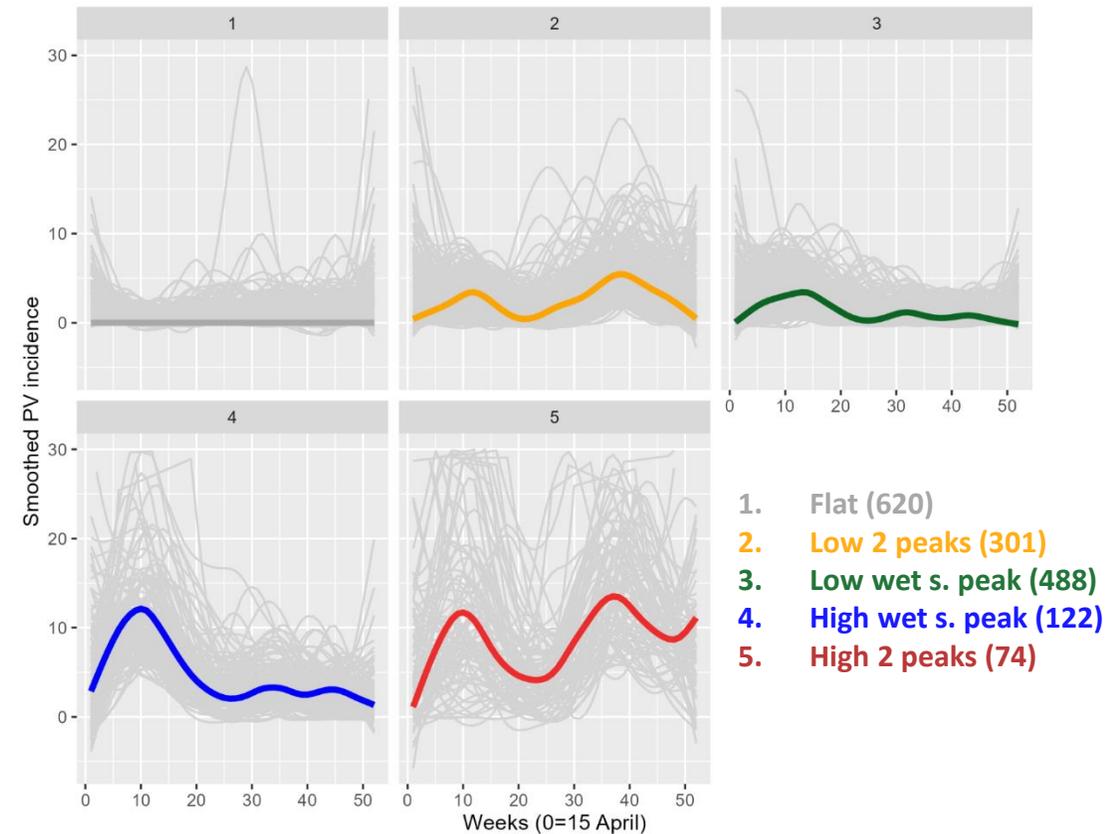
Vallées de montagne

Hautes terres

Méthodes

Analyse exploratoire des déterminants environnementaux associés au profil annuel d'incidence

- Parmi les villages présentant au moins 1 année autre qu'un profil « plat » & au moins 2 années observées
- Régression multinomiale
 - Paysage : 4 profils
 - Climat : 3 profils
 - Variables annuelles + lag : % déforestation; % anomalie pluie (+lag1)
 - Intervention de masse contre *P. falciparum* (oui/non)

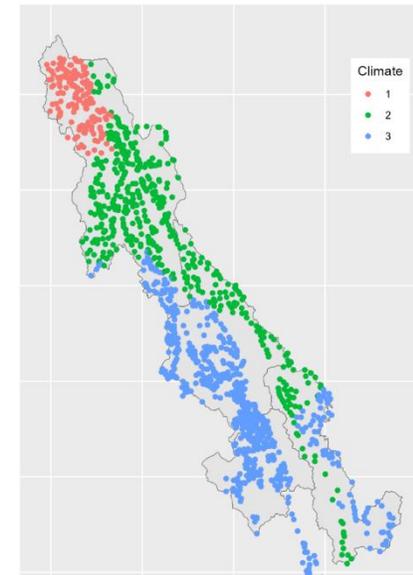
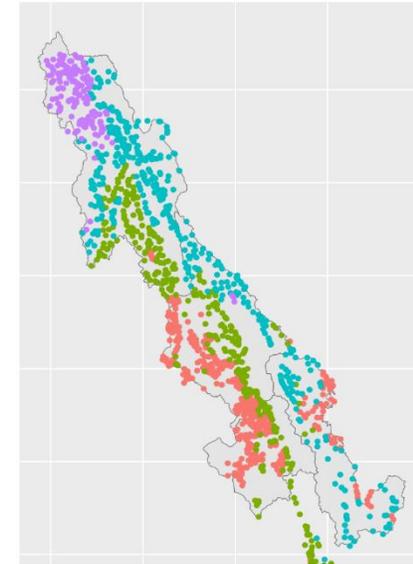


Environnement et profil d'incidence *P. vivax*

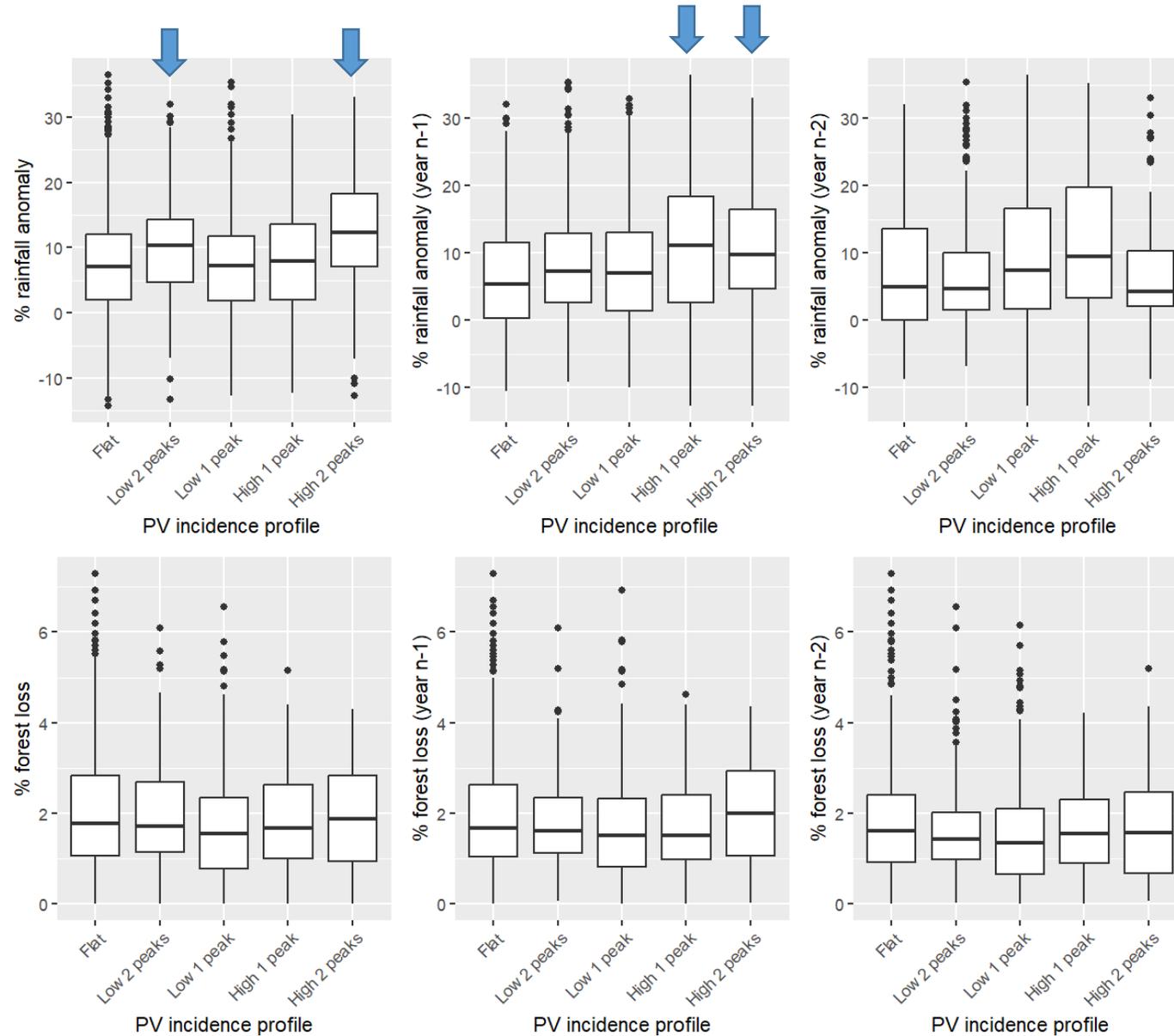
	Flat, N = 620 ¹	Low 2 peaks, N = 301 ¹	Low 1 peak N = 488 ¹	High 1 peak N = 122 ¹	High 2 peaks N = 74 ¹	Overall, N = 1,605 ¹
Paysage						
Agricole	38 (6.1%)	1 (0.3%)	51 (10%)	12 (9.8%)	5 (6.8%)	107 (6.7%)
Vallées larges + piémont	167 (27%)	113 (38%)	110 (23%)	16 (13%)	16 (22%)	422 (26%)
Vallées montagne	333 (54%)	176 (58%)	301 (62%)	91 (75%)	51 (69%)	952 (59%)
Hautes terres	82 (13%)	11 (3.7%)	26 (5.3%)	3 (2.5%)	2 (2.7%)	124 (7.7%)
Climate						
Mountain/cool	98 (16%)	10 (3.3%)	30 (6.1%)	4 (3.3%)	1 (1.4%)	143 (8.9%)
Intermediate	412 (66%)	279 (93%)	354 (73%)	97 (80%)	66 (89%)	1,208 (75%)
Plains/hot	110 (18%)	12 (4.0%)	104 (21%)	21 (17%)	7 (9.5%)	254 (16%)

Environnement et profil d'incidence *P. vivax*

	Flat, N = 620 ¹	Low 2 peaks, N = 301 ¹	Low 1 peak N = 488 ¹	High 1 peak N = 122 ¹	High 2 peaks N = 74 ¹	Overall, N = 1,605 ¹
Paysage						
Agricole	38 (6.1%)	1 (0.3%)	51 (10%)	12 (9.8%)	5 (6.8%)	107 (6.7%)
Vallées larges + piémont	167 (27%)	113 (38%)	110 (23%)	16 (13%)	16 (22%)	422 (26%)
Vallées montagne	333 (54%)	176 (58%)	301 (62%)	91 (75%)	51 (69%)	952 (59%)
Hautes terres	82 (13%)	11 (3.7%)	26 (5.3%)	3 (2.5%)	2 (2.7%)	124 (7.7%)
Climate						
Mountain/cool	98 (16%)	10 (3.3%)	30 (6.1%)	4 (3.3%)	1 (1.4%)	143 (8.9%)
Intermediate	412 (66%)	279 (93%)	354 (73%)	97 (80%)	66 (89%)	1,208 (75%)
Plains/hot	110 (18%)	12 (4.0%)	104 (21%)	21 (17%)	7 (9.5%)	254 (16%)



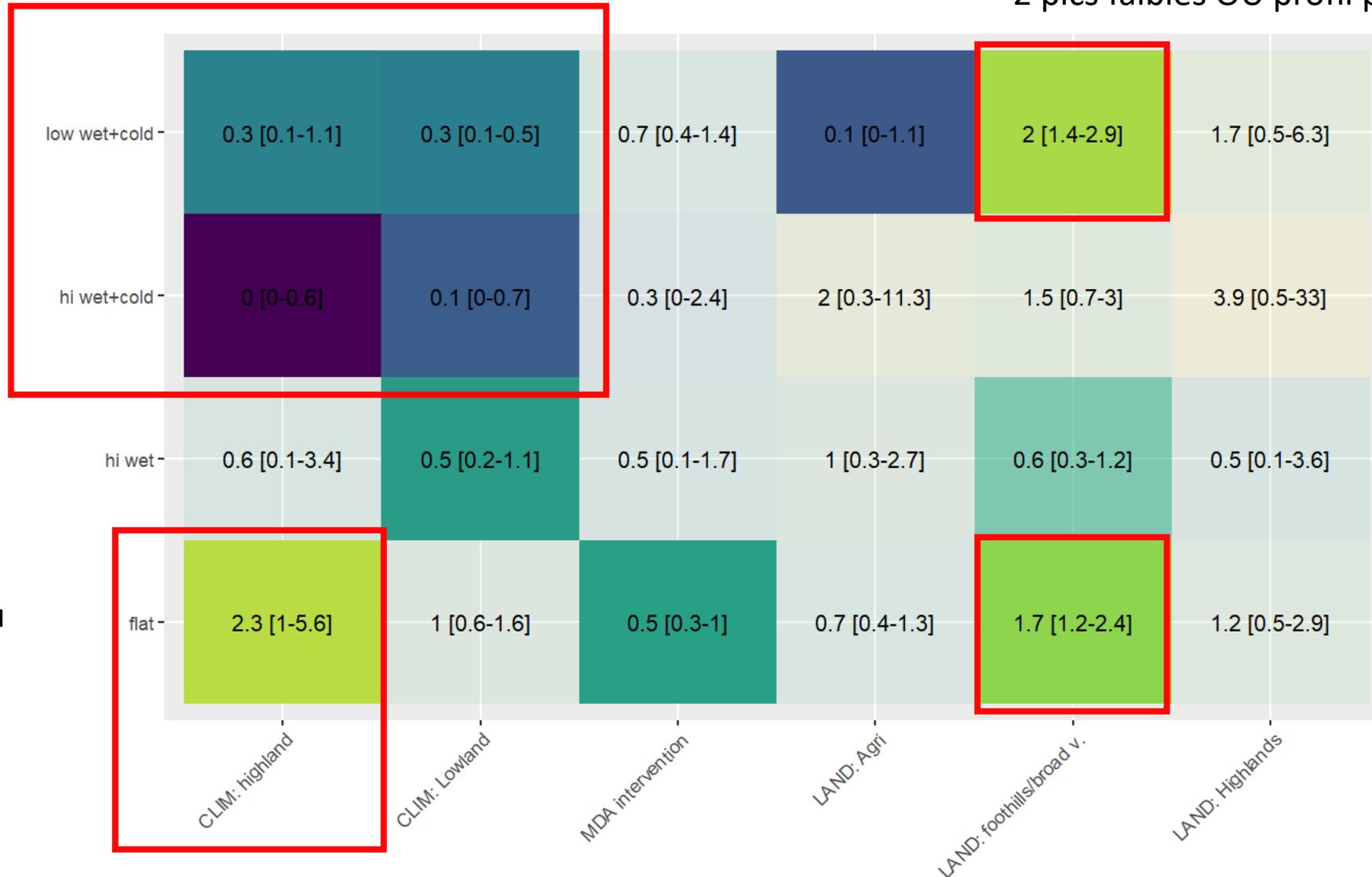
Environnement et profil d'incidence *P. vivax*



Environnement et profil PV

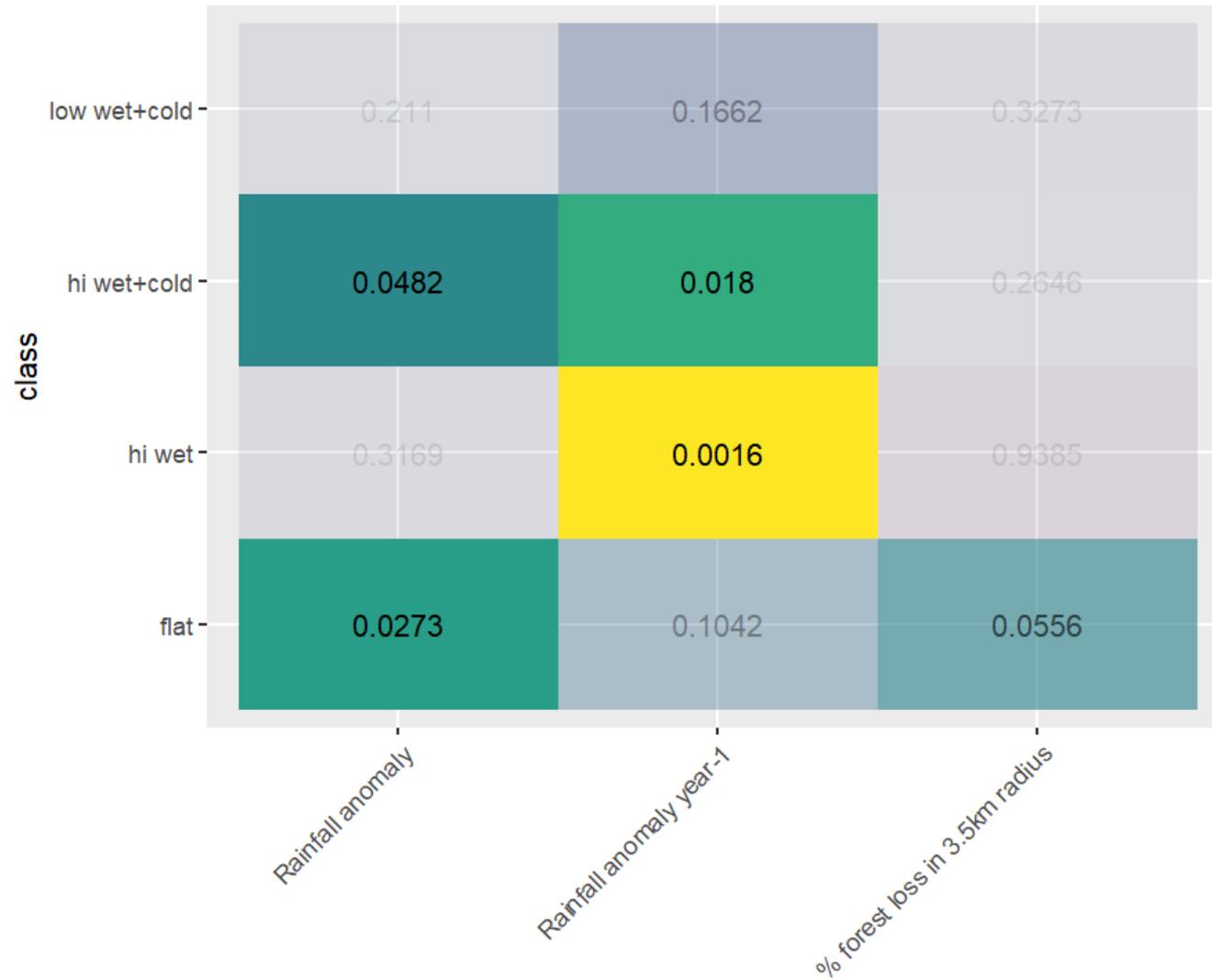
Paysage piémont/vallée large
2 pics faibles OU profil plat

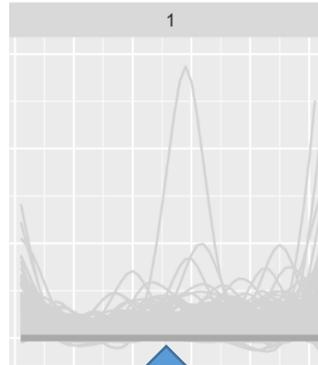
2 pics:
négativement
associés aux
climats chaud
et froid
→ Climat
intermédiaire



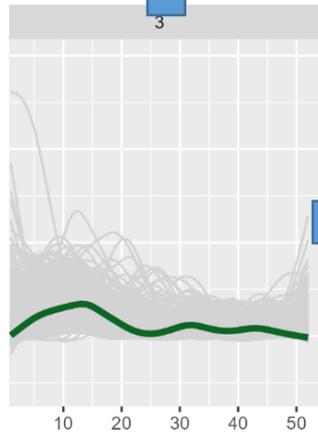
Flat associé au
climat froid

Environnement et profil PV



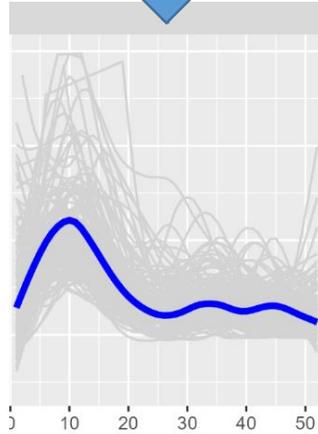


Climat froid
 % déforestation >4%
 Paysage piémont/vallée > vallée montagne
 Année à pluie « normale » (Anomalie <10%)



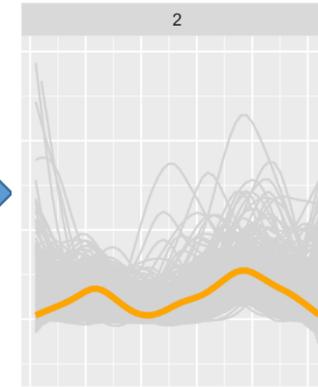
Catégorie de référence :
faible pic en saison des pluies

Paysage réf: vallée montagne
Climat réf: int

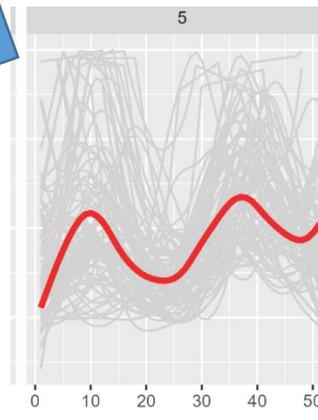


Odds <1 climat chaud

Anomalie pluie (n-1)
 < -10% ou >15%



Paysage piémont/vallée
Odds <1 hors climat intermédiaire



Odds <1 hors climat intermédiaire

Anomalie pluie >15%
 Anomalie pluie (n-1) >20%

Discussion

Contribution du paysage et du climat à la dynamique locale du paludisme : conditions favorables aux vecteurs ?

→ Diversité / abondance saisonnière ?

→ 1 pic vs 2 pics : plus difficile à identifier qu'entre persistance/absence (~climat ; vallées larges vs montagne)

Contribution de la météo :

- Excès de pluie sur l'année -> favorise une augmentation de l'incidence (profils élevés)

- Excès de pluie sur l'année précédente -> favorise un profil élevé en saison des pluies ?

→ *Découpage en milieu de saison chaude ?*

Approche statistique à améliorer : modéliser les transitions d'une classe à l'autre (plutôt que multinomial) ?

Choix des variables environnementales : guidé par une approche de synthèse de l'information sur la base d'expertise et des résultats précédents => objectif d'explication & interprétation

→ Intégrer des méthodes type « random forest » pour identifier les variables importantes ? Et en aval ?

→ Choix d'une approche centrée sur le village ou basée sur la distance à des paysages définis indépendamment ?

Conclusion

Travail en cours:

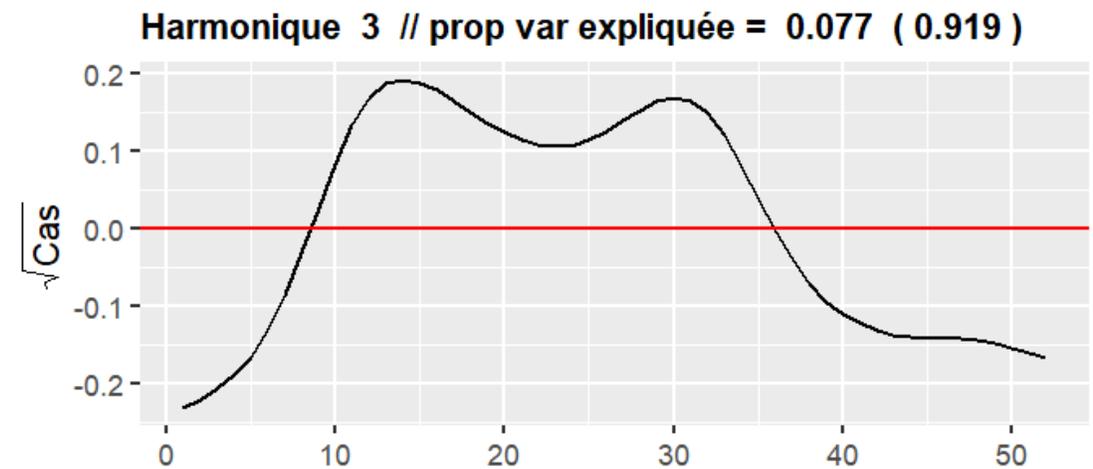
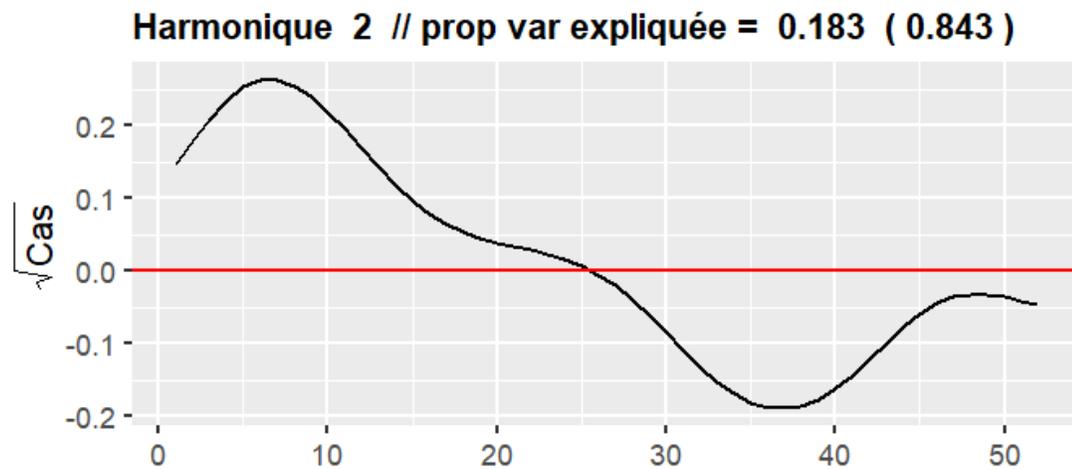
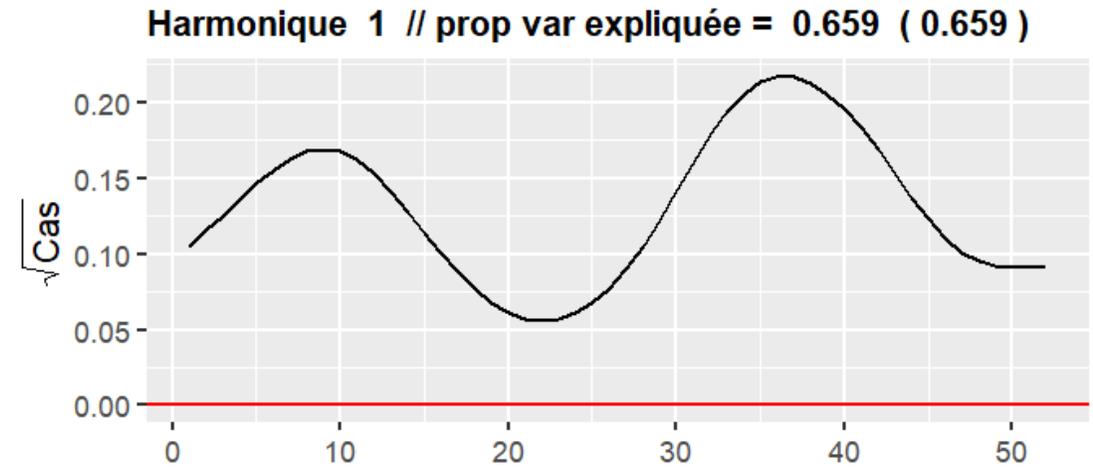
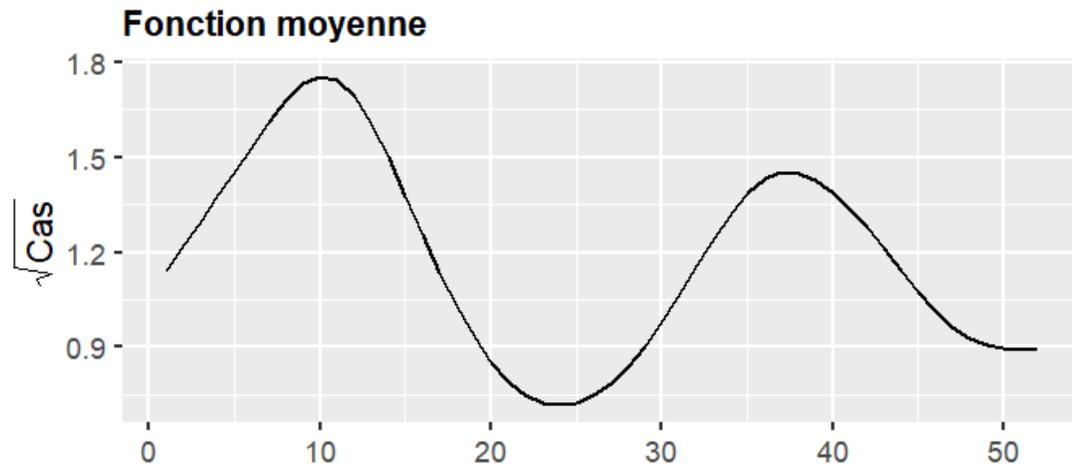
Outil d'approche classification de séries temporelles : réduire la complexité des données de surveillance de routine en groupes pertinents *utilisables par les acteurs de santé publique*

- en cours avec d'autres données : Mali par district pour contribuer à la stratification, Sénégal par village et groupes d'âge
- ACP fonctionnelle pour aider l'interprétation (harmoniques 1 et 2 >80% variance expliquée)

Environnement : enjeu critique de choix des indicateurs et des méthodes pour relier les données

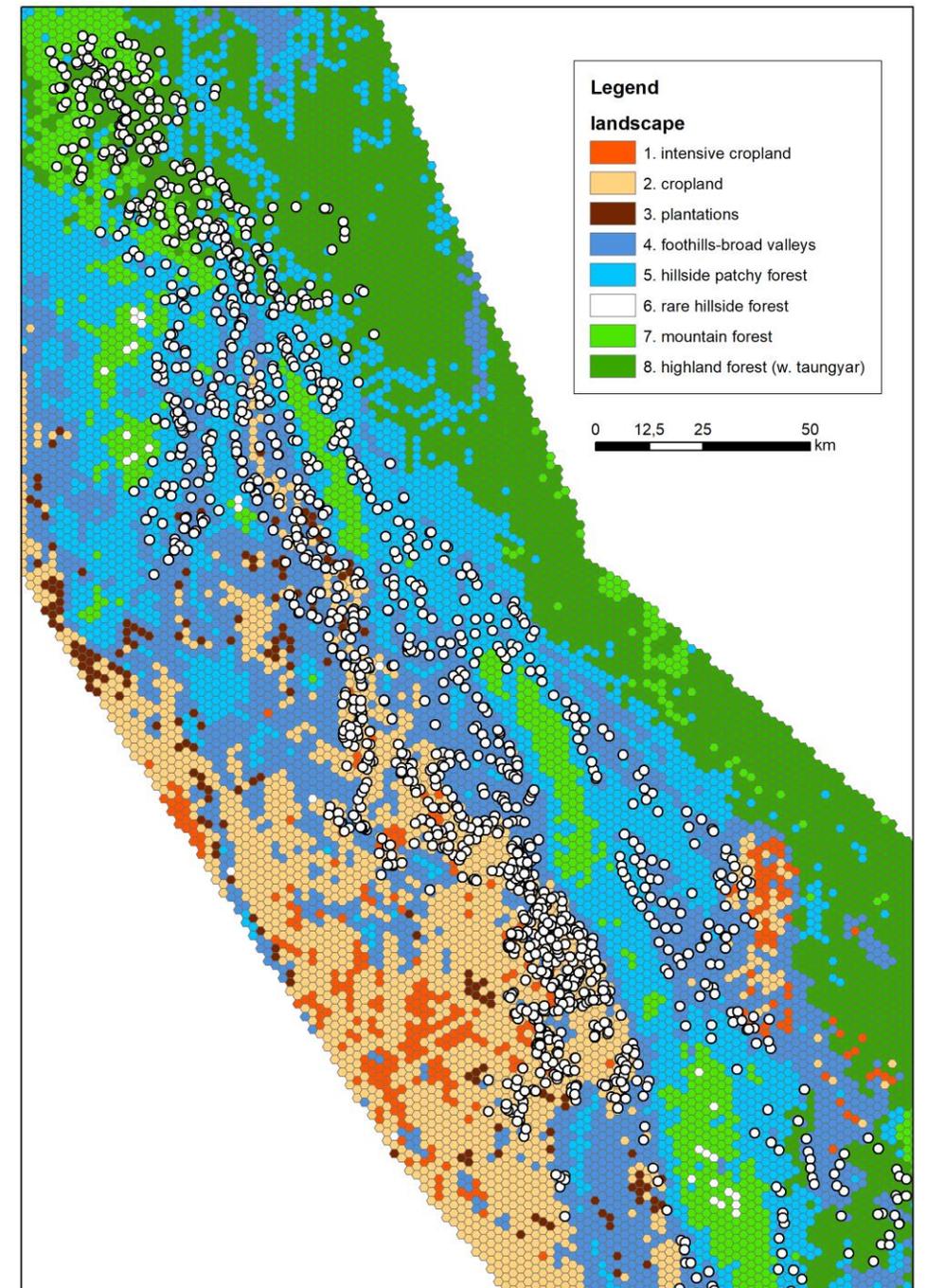
Merci de votre attention

ACP fonctionnelle : incidence annuelle – *P. vivax*

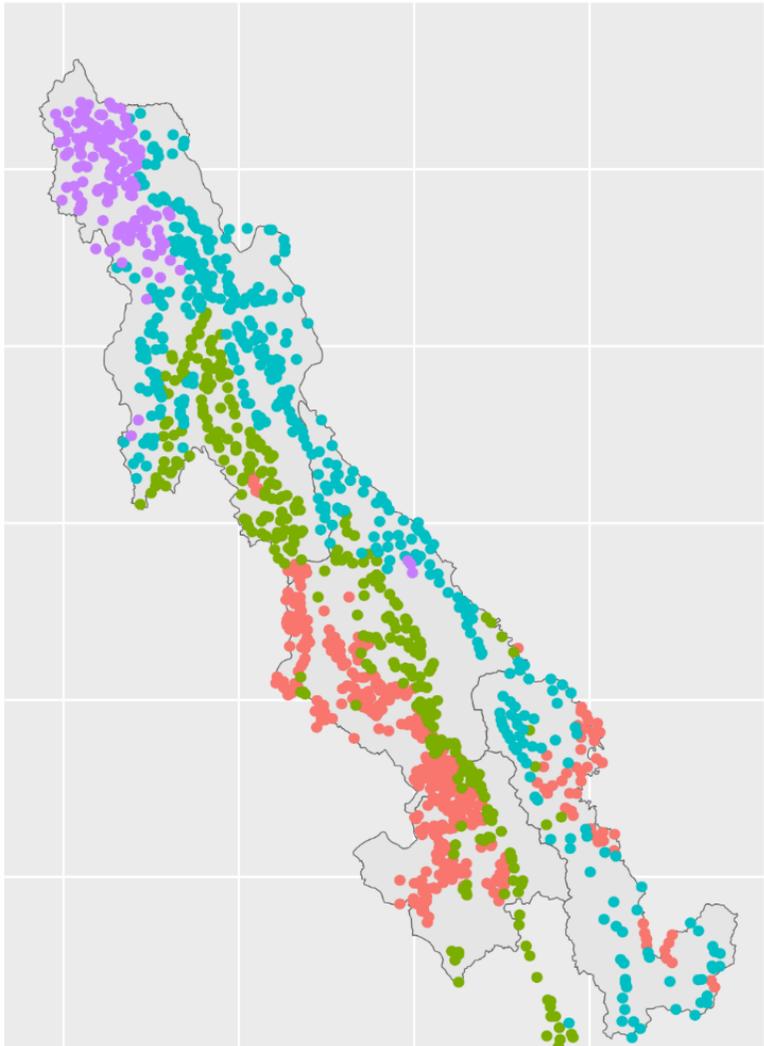


Environnement

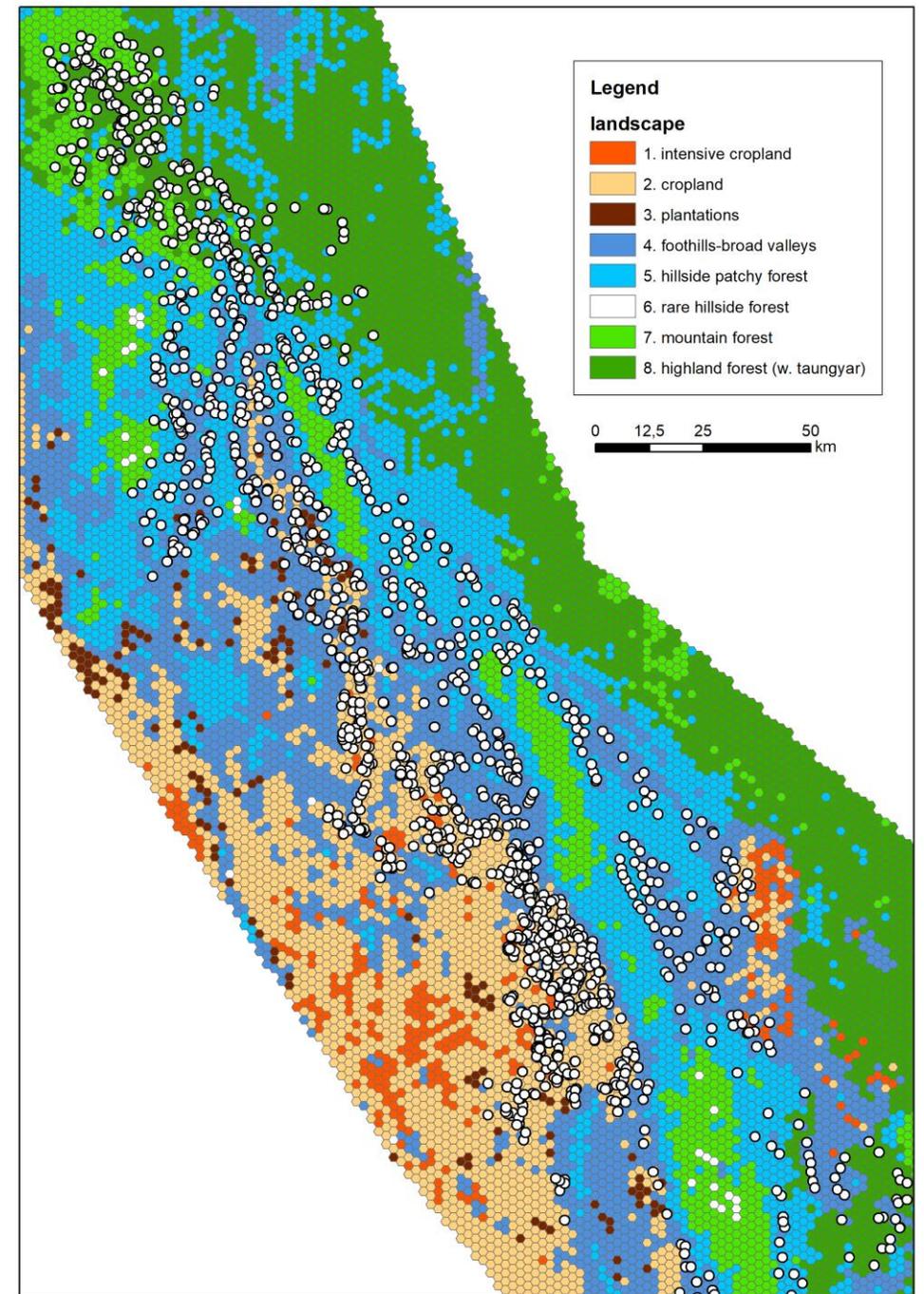
Caractérisation exhaustive du paysage et extraction de distances



Comparaison buffers-distances

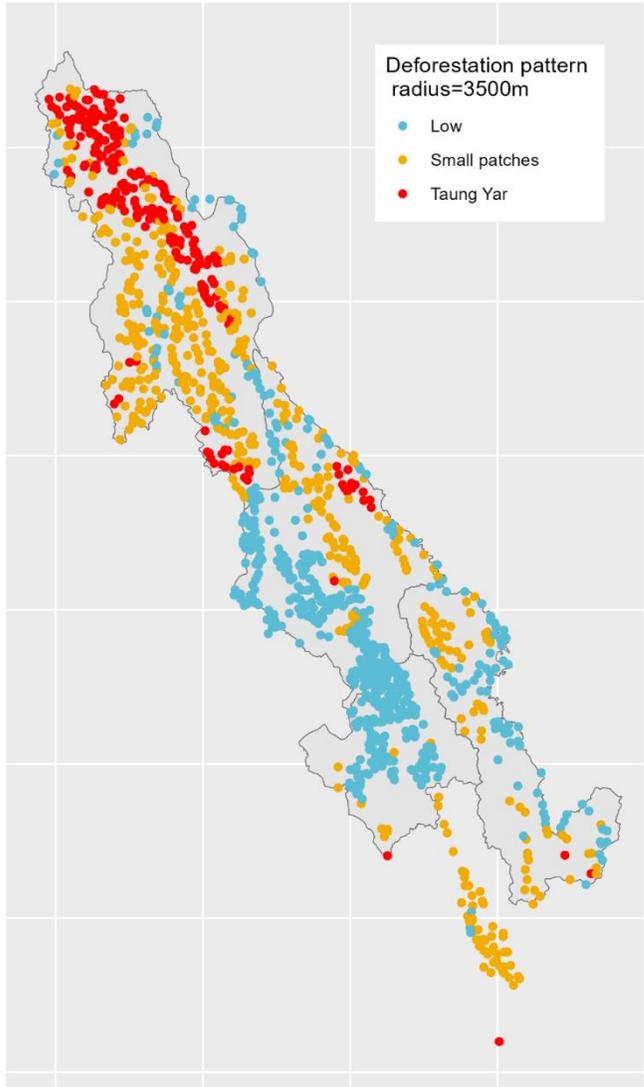


landscape_mkg



Environnement

Extraction centrée sur le village > perte de forêt



3 profils de déforestation :

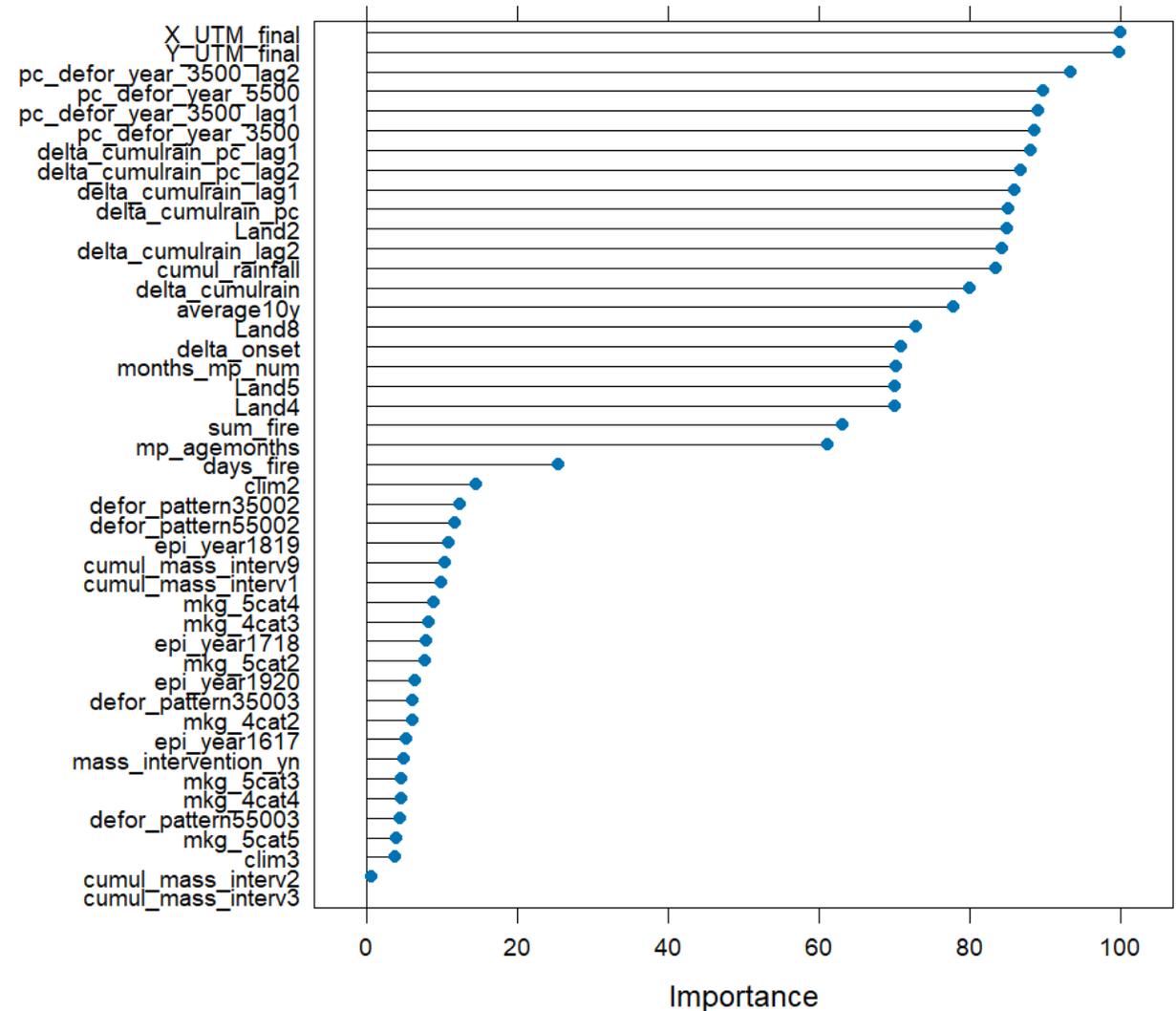
Faible (déforestation 'terminée')

Perte de forêt par petites parcelles

Rotation de cultures sur 10 ans (système traditionnel)

Environnement et profil PV: variables importantes

Variable Importance for JV_gp



Évaluées dans CIT et modèle : % anomalie de pluie année n et année n-1, % déforesté année n, n-1, n-2 ; distance au paysage agricole et au paysage forêt de montagne ; climat ; paysage ;