

# Modélisation spatiale prédictive à base d'IA appliquée au domaine de l'archéologie

Dr. Emmanuel Clivaz

AnalyticBase Sàrl, Savièse VS

emmanuel.clivaz@analyticbase.org

www.archeobase.org

Reto Blumer

Service archéologique de l'État de Fribourg

reto.blumer@fr.ch



ETAT DE FRIBOURG  
STAAT FREIBURG

Service archéologique SAEF  
Amt für Archäologie AAFR

ArcheoBase

# présentation

- RB Missions de l'archéologie cantonale
- RB Paradigmes de la gestion des biens culturels archéologiques
- RB Stratégie: économicité, efficacité, durabilité
- EC Statistique classique vs intelligence artificielle
- EC Continuum de modélisation adaptative
- EC Mesures de performance
- EC Modèles spatio-temporels
- EC Conversion automatisée des données en prédictions spatiales avancées

# Missions de l'archéologie cantonale

**ARCHEOLOGIE  
IDEALE**

**TEMPS**

**PERSONNEL**

**ARGENT**

**BASES LEGALES**

**RESULTATS**

**PLANIFICATION**

**COORDINATION**



# Missions de l'archéologie cantonale

**ARCHEOLOGIE  
RÉELLE**

**TEMPS**

**PERSONNEL**

**ARGENT**

**BASES LEGALES**

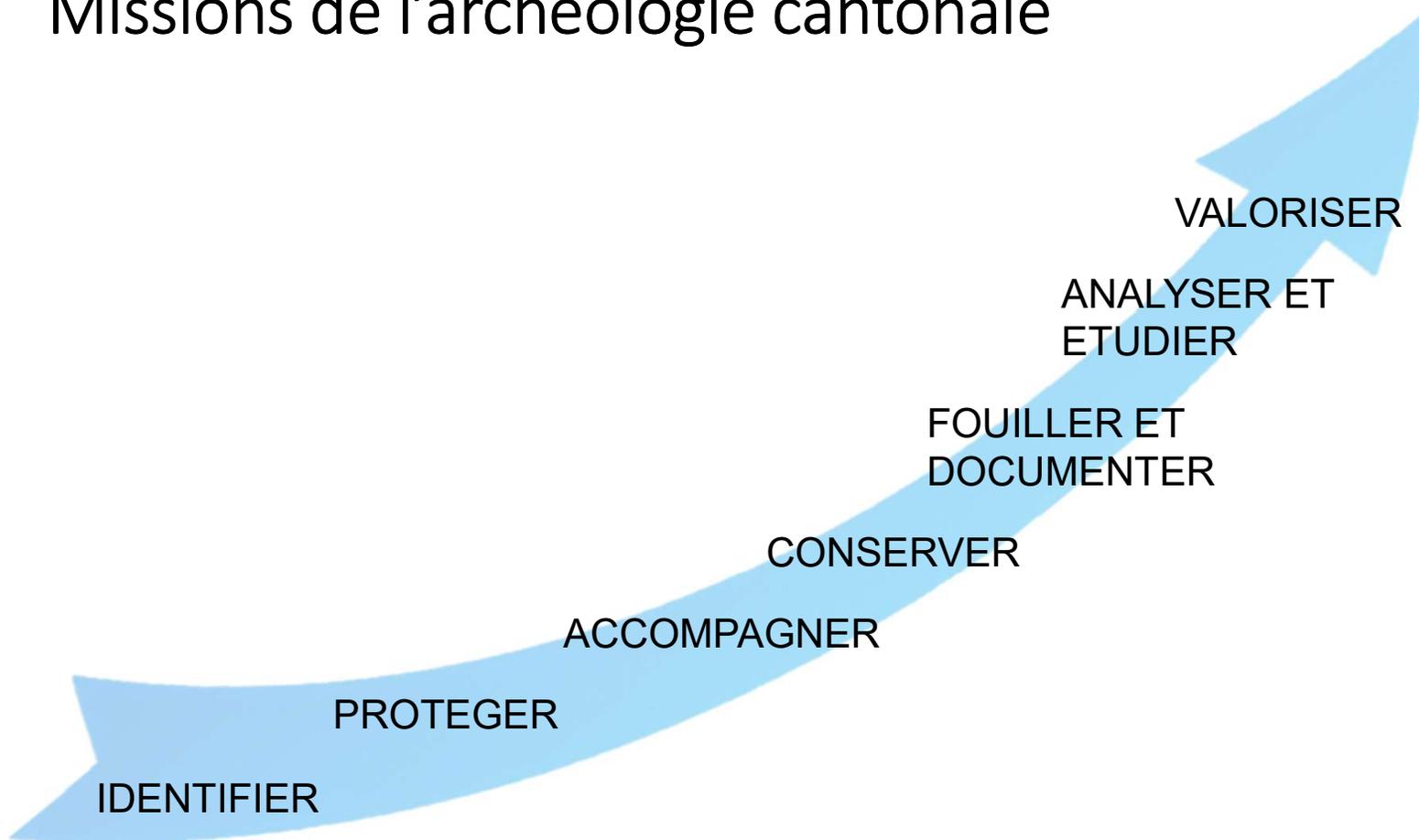
**RESULTATS**

**PLANIFICATION**

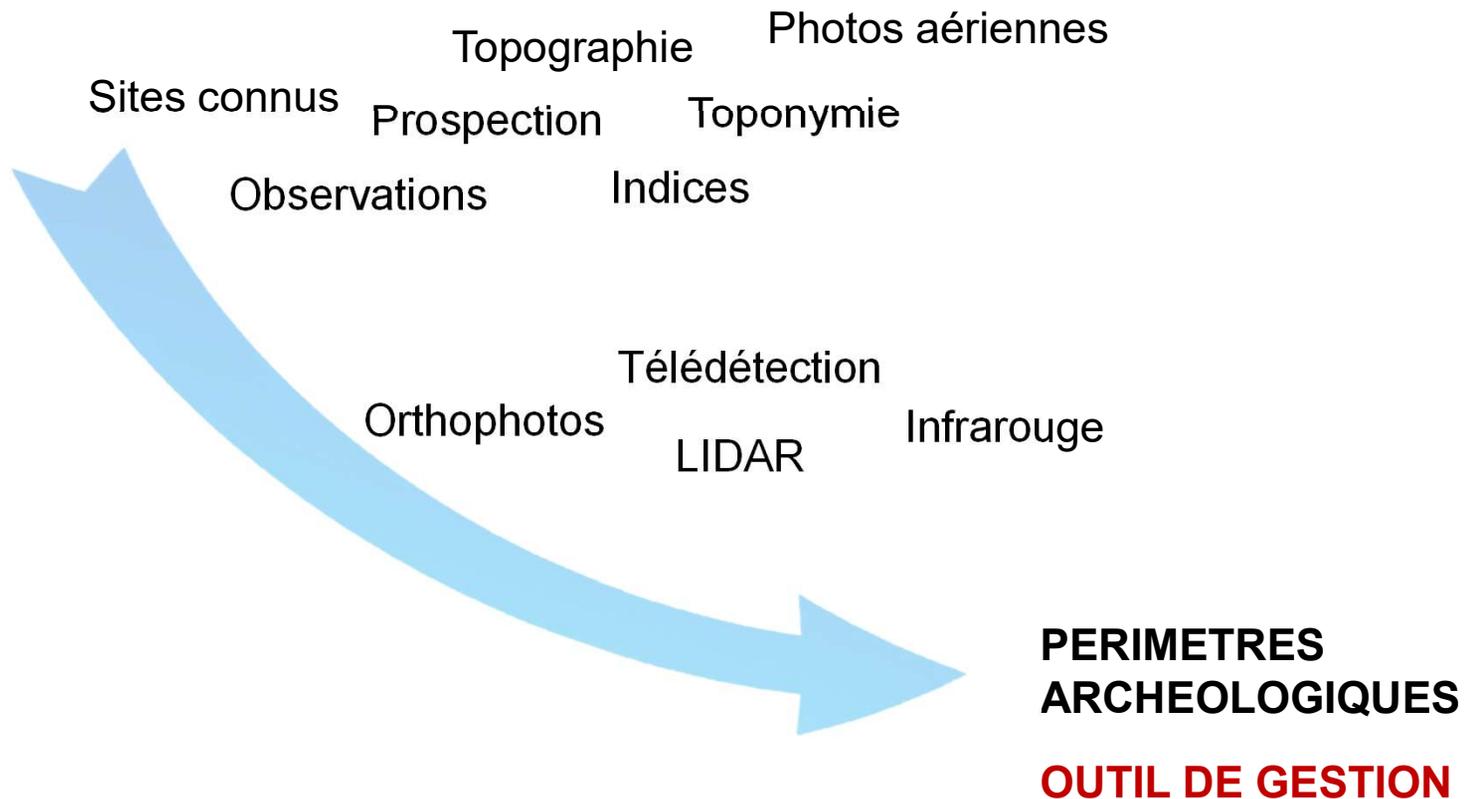
**COORDINATION**



# Missions de l'archéologie cantonale



# Paradigmes de gestion des biens culturels archéologiques



# Paradigmes de la gestion des biens culturels archéologiques

Portail cartographique du canton de Fribourg

ETAT DE FRIBOURG  
STAAT FREIBURG

Carte ▾ Outils ▾ Options ▾ Recherche

Contenu Légende

Catalogue

Thème: Patrimoine ▾

- Bornes historiques
- Chroniques archéologiques
- Périmètres archéologiques

Le Service archéologique de l'Etat de Fribourg (SAEF) gère le patrimoine archéologique cantonal enfoui et bâti  
Le domaine « Périmètres archéologiques » du thème « Patrimoine » représente, sous forme de surfaces polygonales, les périmètres archéologiques de protection et les périmètres archéologiques recensés sur le territoire du canton de Fribourg.  
Les périmètres de protection contiennent des vestiges attestés dont l'importance archéologique justifie une mise sous protection. Les périmètres recensés sont délimités sur la base de vestiges archéologiques observés ou d'indices de présence de vestiges.  
Au fur et à mesure des révisions des plans d'aménagement locaux (PAL) des communes, les périmètres archéologiques de protection et recensés sont mis à jour et reportés sur les plans d'affectation des zones (PAZ). La mise à jour dynamique sur ce portail cartographique est quant à elle quotidienne.  
Pour toute nouvelle construction ou modification de bâtiments existants, ainsi que pour toute modification de l'état actuel du terrain, dans un périmètre de protection ou dans un périmètre archéologique recensé, le requérant doit prendre contact préalablement avec le SAEF. Le SAEF réalise alors une analyse d'impact donnant lieu à un préavis.  
Les principales bases légales du SAEF sont :  
- Loi du 7 novembre 1991 sur la protection des biens culturels (LPBC)  
- Règlement du 17 août 1993 d'exécution de la loi sur la protection des biens culturels (REL PBC)  
- Loi du 2 décembre 2008 sur l'aménagement du territoire et les constructions (LATeC)  
- Règlement du 1er décembre 2009 d'exécution de la loi sur l'aménagement du territoire et les constructions (REL ATeC)  
Les collaboratrices et collaborateurs du SAEF se tiennent à disposition du public pour toute question concernant l'archéologie du canton de Fribourg.

**3041 périmètres**

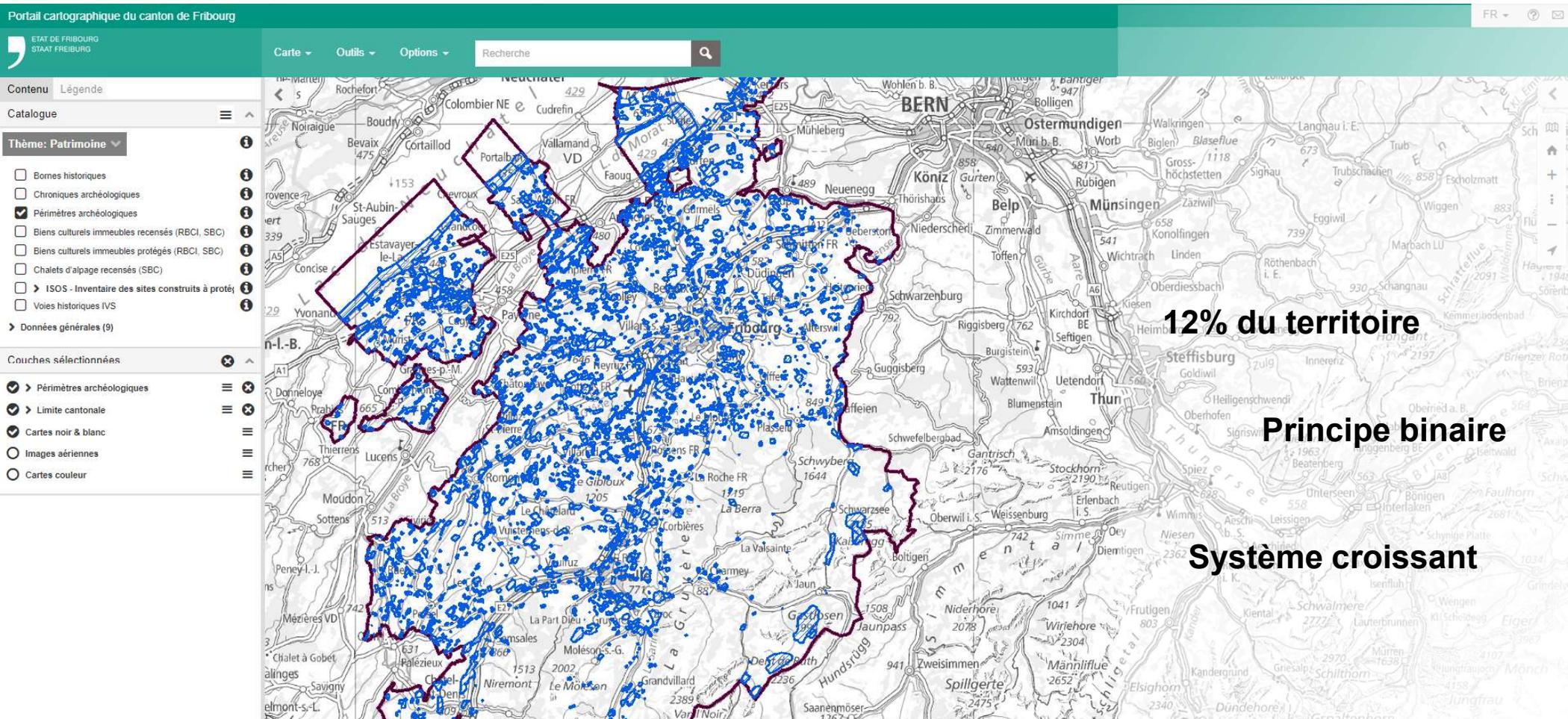
**55% vestiges attestés**

**45% vestiges potentiels**

**2 zones d'affectation**

**24 périmètres de protection**

# Paradigmes de la gestion des biens culturels archéologiques



# Paradigmes de la gestion des biens culturels archéologiques

**Demande de permis  
de construire**



**Périmètre  
archéologique**

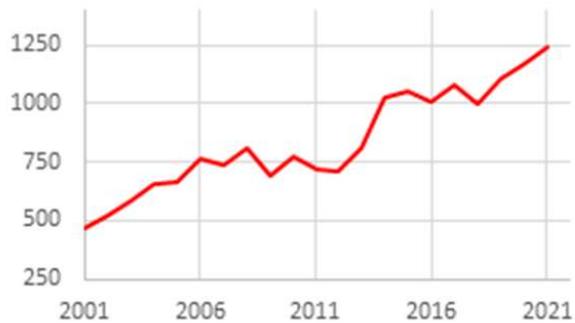


**Analyse  
d'impact**

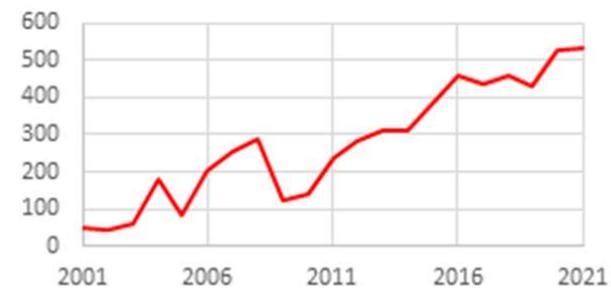


**Préavis**

Nombre de préavis produits

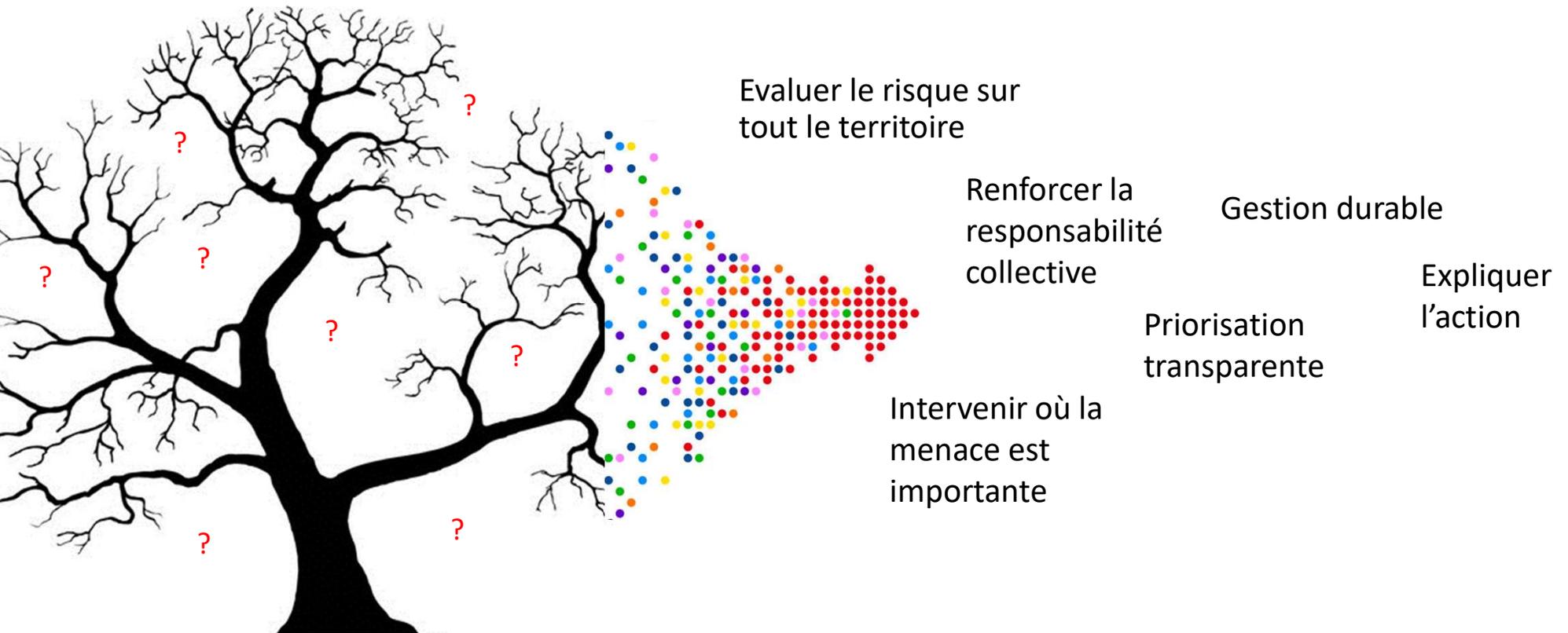


Nombre d'interventions  
réalisées



# Paradigmes de la gestion des biens culturels archéologiques

Dépendance aux zones à bâtir  
Grand potentiel hors périmètre



# Stratégie: économicité, efficacité, durabilité

**Géodonnées archéologiques (observations positives et négatives)**

**Géodonnées contextuelles**

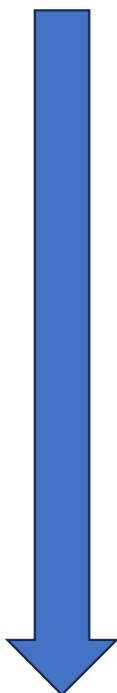
**Algorithmes IA**

**Cartes de risque**

**Tests et contrôles**

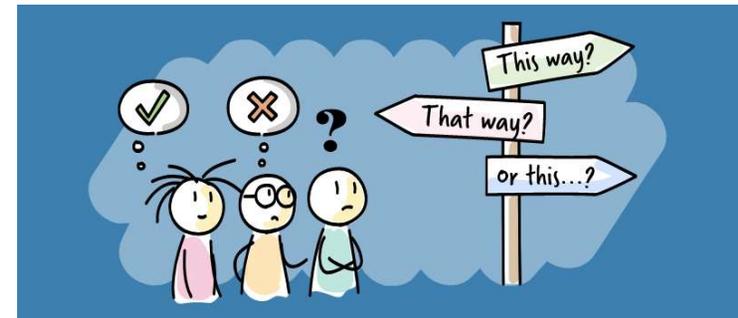
**Automatisation et historisation**

**Tableaux de bord de risque (publics et spécialisés)**



# Stratégie: économicité, efficacité, durabilité

- **Gestion plus durable de la ressource non renouvelable**  
**« biens culturels archéologiques enfouis »**
- **Modèles basés sur des variables explicatives - surfaces déjà détruites**
- **OUTILS D'AIDE A LA DECISION, pour optimiser l'allocation des ressources**
- **MAIS AUSSI : adaptation des bases légales pour remplacer les périmètres archéologiques par des cartes de risque**



# Statistique classique vs intelligence artificielle



## Philosophie

**SC:** Compréhension et inférences sur base d'échantillon

**IA:** Focalisation sur prédiction et généralisation



## Interprétation du modèle

**SC:** Compréhension fine de la relation entre variables

**IA:** Certains modèles sont interprétables (tree based) vs boîte noire (DL)



## Complexité du modèle

**SC:** Privilège des modèles plus simples, croissance selon compréhension du domaine et des données

**IA:** Complexité de simple à extrême, dépendante des tâches à effectuer et de la nature des données



## Volume des données

**SC:** Développée à l'ère du manque de données, inférer sur la base de petits jeux de données

**IA:** Excelle dans le traitement de grandes quantités de données (big data, etc.)



## Validation

**SC:** Hypothèses de base (assumptions) sur la distribution des données et propriétés théoriques

**IA:** Validation empirique, données d'entraînement (validations croisées) vs données de test



## Variation

**SC:** débute avec un jeu de variables données et la connaissance du domaine guide l'intégration ou la modification des variables

**IA:** Grands nombres de variables, sélection automatique, modification des variables possible

# Continuum de modélisation adaptative

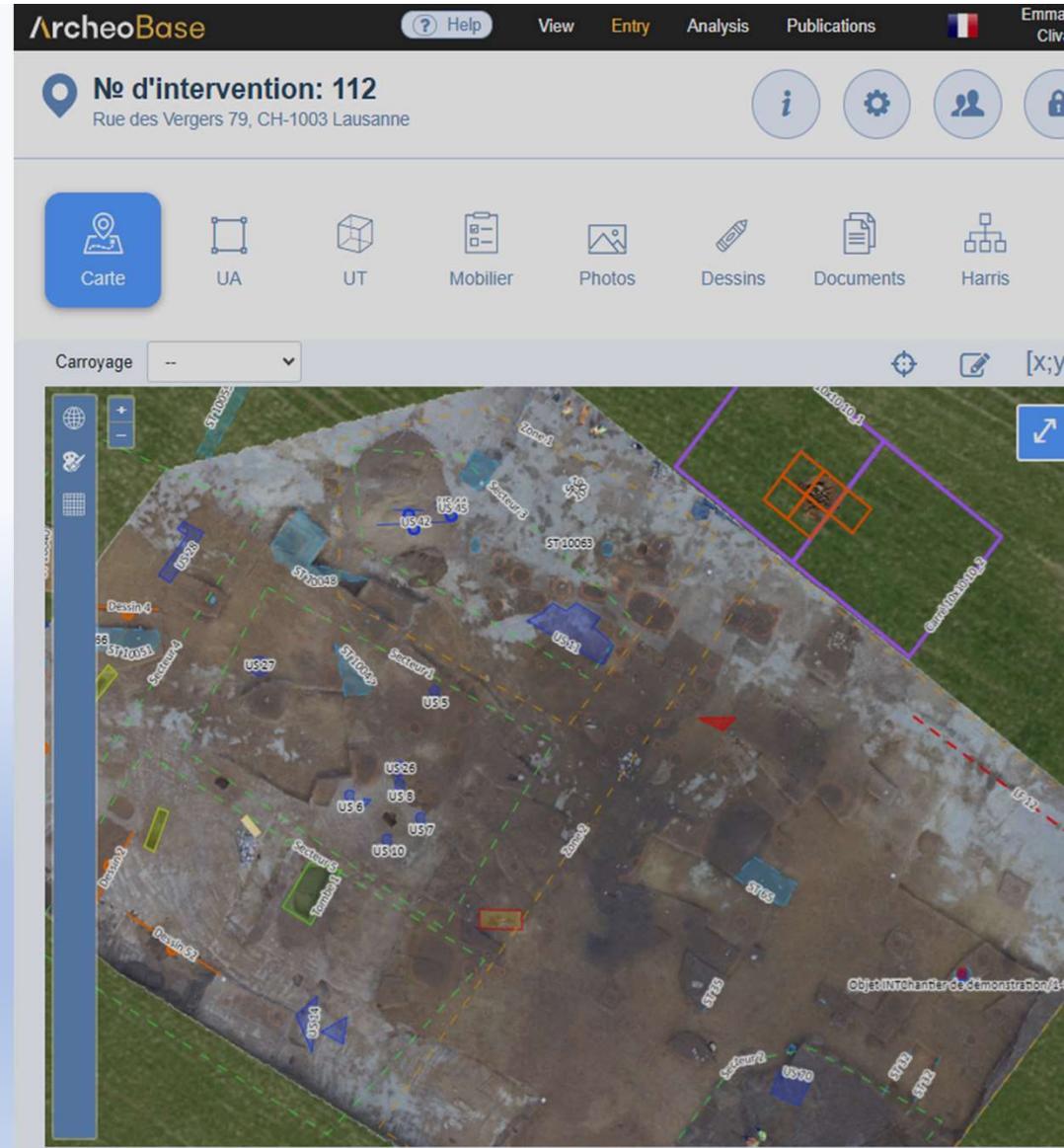
Modèle avec optimisation bayésienne

## Modèle de base

- **Base** (altitude, pente, orientation, distance à l'eau, etc.)
  - **Lithologie** (dolomies, gneiss, etc.)
  - **Géomorphologie** (cône de déjection, éboulement, etc.)
  - **Aptitude aux cultures** (fourragères, gros bétail, etc.)
- 61 variables**

Modèle spatio-temporel

Modèle spatial



# Metrics

**Accuracy**  $(TP+TN)/(TP+TN+FP+FN)$

Fréquence correcte du modèle dans son ensemble ?

**Precision**  $TP/(TP+FP)$

Fréquence des prédictions de présences correctes ?

Conséquences FP -> **ressources, excavations inutiles,...**

**Recall**  $TP/(TP+FN)$

Est-ce que le modèle peut trouver toutes les présences ?

Conséquences FN -> **objets archéologiques non-découverts**

# Mesures de performance

**AUC**  $(TP+TN)/(TP+TN+FP+FN)$

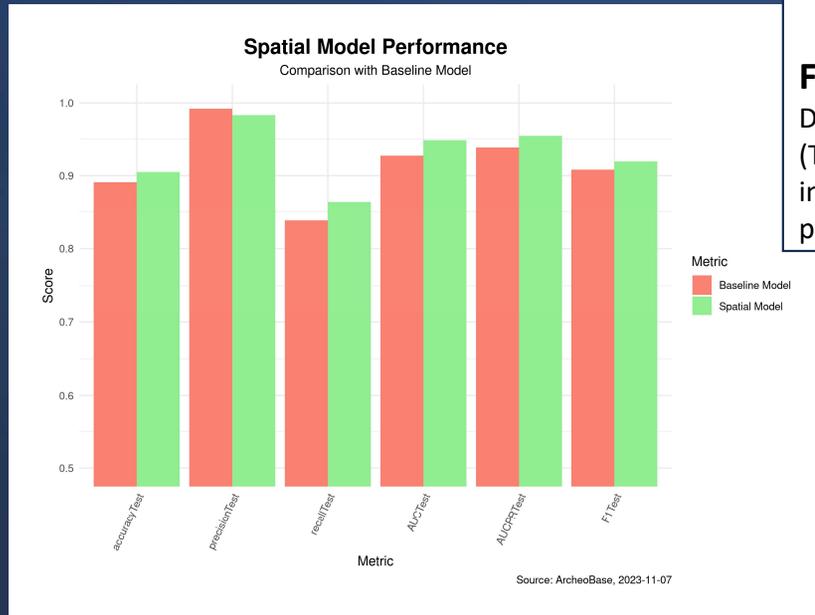
Comment est-ce que le modèle différencie les lieux avec et sans présence archéologique (TP vs FP), sur l'ensemble de la gamme des probabilités prédites ?

**AUCPR**  $TP/(TP+FP)$

Efficacité du modèle pour prédire les découvertes archéologiques rares (TP) tout en minimisant les fausses alertes (FP) et les sites réels manquants (FN), sur l'ensemble de la gamme des probabilités prédites ?

**F1**  $TP/(TP+FN)$

Dans quelle mesure le modèle identifie-t-il les sites archéologiques réels (TP) tout en parvenant à un **équilibre** entre la minimisation des fouilles inutiles sur des sites qui ne le sont pas (FP) et l'assurance qu'aucun site potentiel n'est négligé (FN), à un seuil choisi.



# Modèle de base

## Hyperparamètres-meta

- Sélection des variables
- Ratio présence vs absence
- Ratio pseudo-absences
- Gestion du déséquilibre nPrésence vs nAbsences
- etc.

## Hyperparamètres du modèle

- Taux d'apprentissage
- Profondeur maximale
- Fraction de colonnes
- etc.

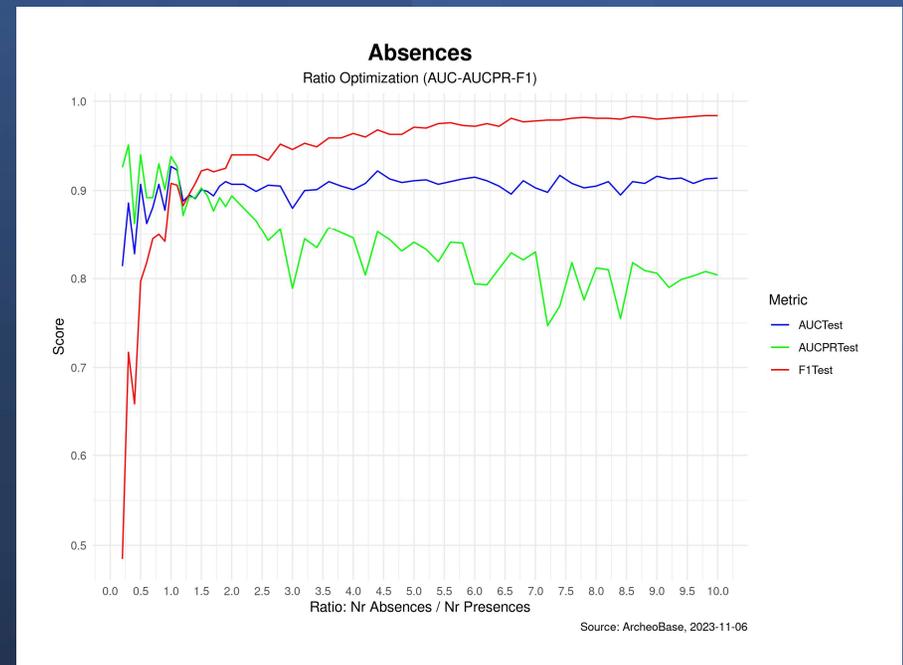
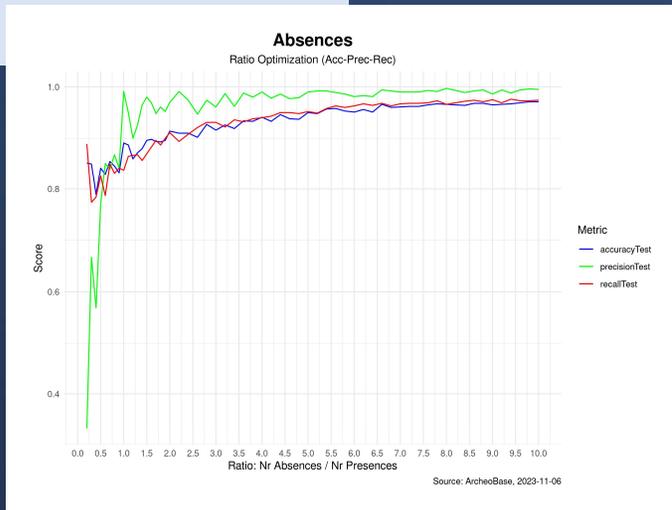
# Prédictions

## Résolution 20mx20m

- 9'955'582 cellules (FR)
- 204'165'000 cellules (CH)

## Résolution 10mx10m

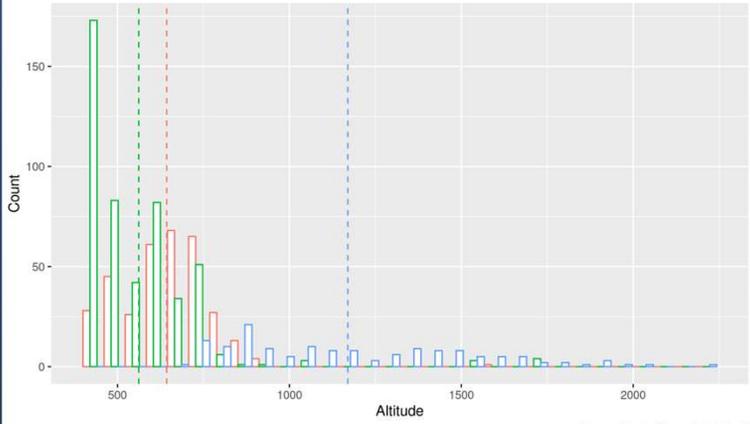
- 37'823'604 cellules (FR)
- 816'660'000 cellules (CH)



### Altitude distribution for period: all to all

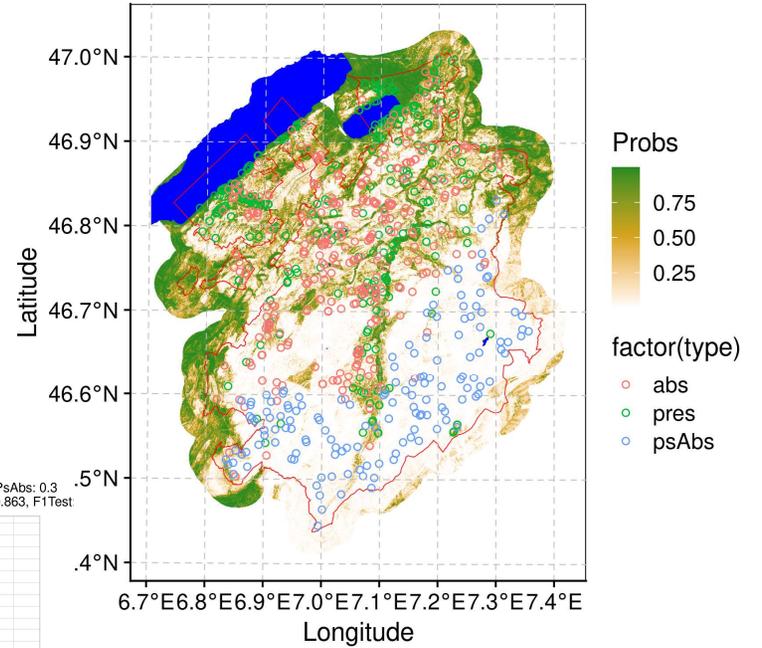
XGB: BMBaseline, nPres: 483, nTotalAbs: 483 (nAbs: 338, nPsAbs: 145), ratioAbs: 1, ratioPsAbs: 0.3  
 AUCTrainCv: 0.874, AUCTest: 0.927, AUCPRTrainCv: 0.899, AUCPRTest: 0.938, F1TrainCv: 0.826, F1Test: 0.908

absence presence pseudoAbsence



### Prediction overlaid with origin points (pres, abs, psAbs): all to all

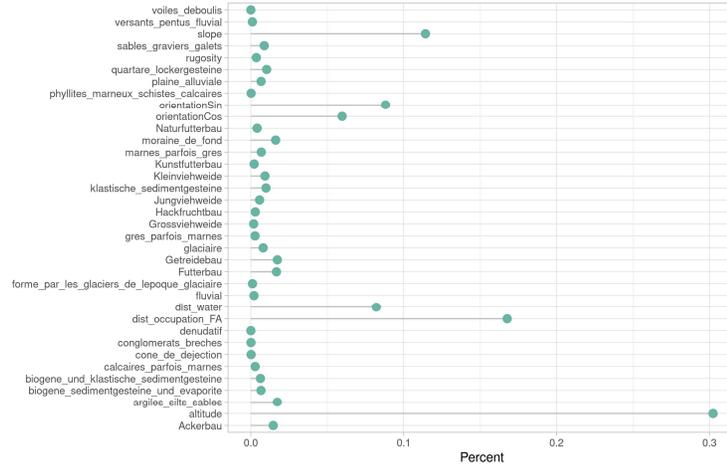
XGB: BOM, nPres: 483, nTotalAbs: 483 (nAbs: 338, nPsAbs: 145), ratioAbs: 1, ratioPsAbs: 0.3  
 AUCTrainCv: 0.918, AUCTest: 0.947, AUCPRTrainCv: 0.925, AUCPRTest: 0.954, F1TrainCv: 0.863, F1Test: 0.926



Source: ArcheoBase, 2023-11-11

### Variable importance for period: all to all

XGB: BOM, nPres: 483, nTotalAbs: 483 (nAbs: 338, nPsAbs: 145), ratioAbs: 1, ratioPsAbs: 0.3  
 AUCTrainCv: 0.918, AUCTest: 0.947, AUCPRTrainCv: 0.925, AUCPRTest: 0.954, F1TrainCv: 0.863, F1Test: 0.926



Source: ArcheoBase, 2023-11-09

# Modèles spatio-temporels

Période du bronze

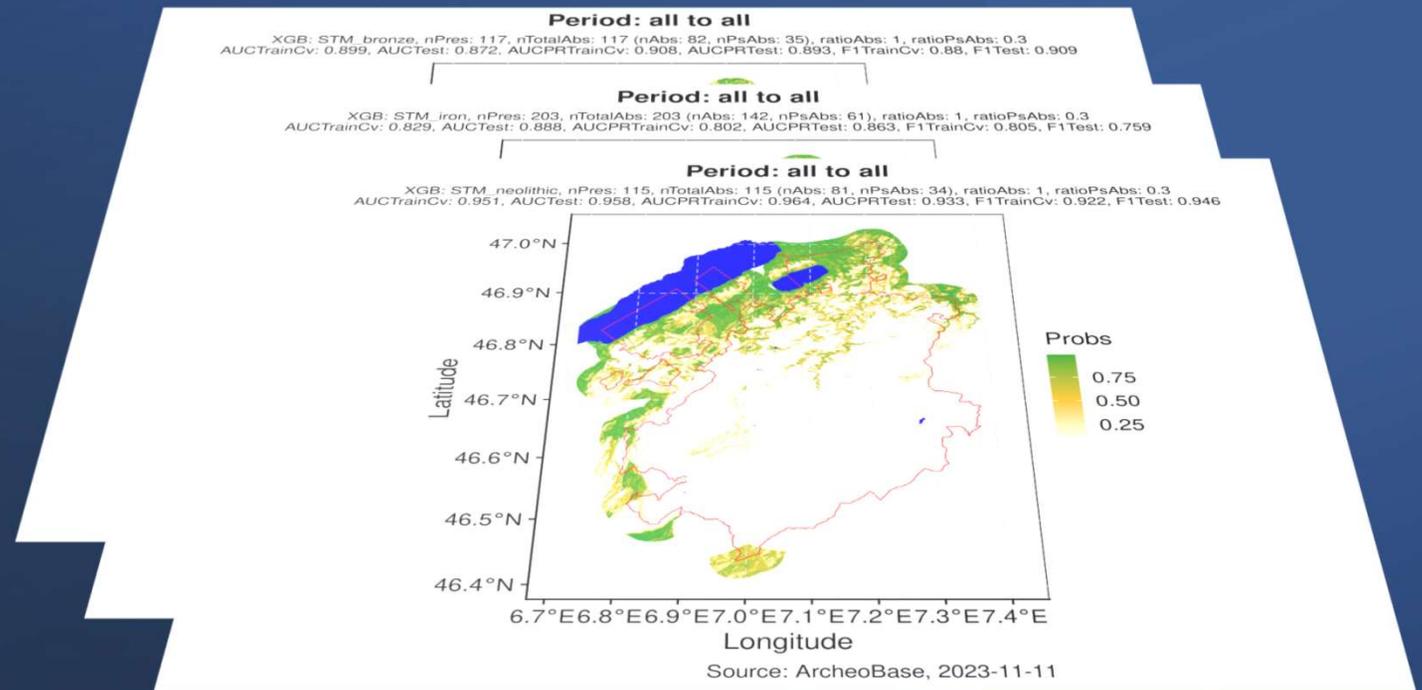
...

Période du fer

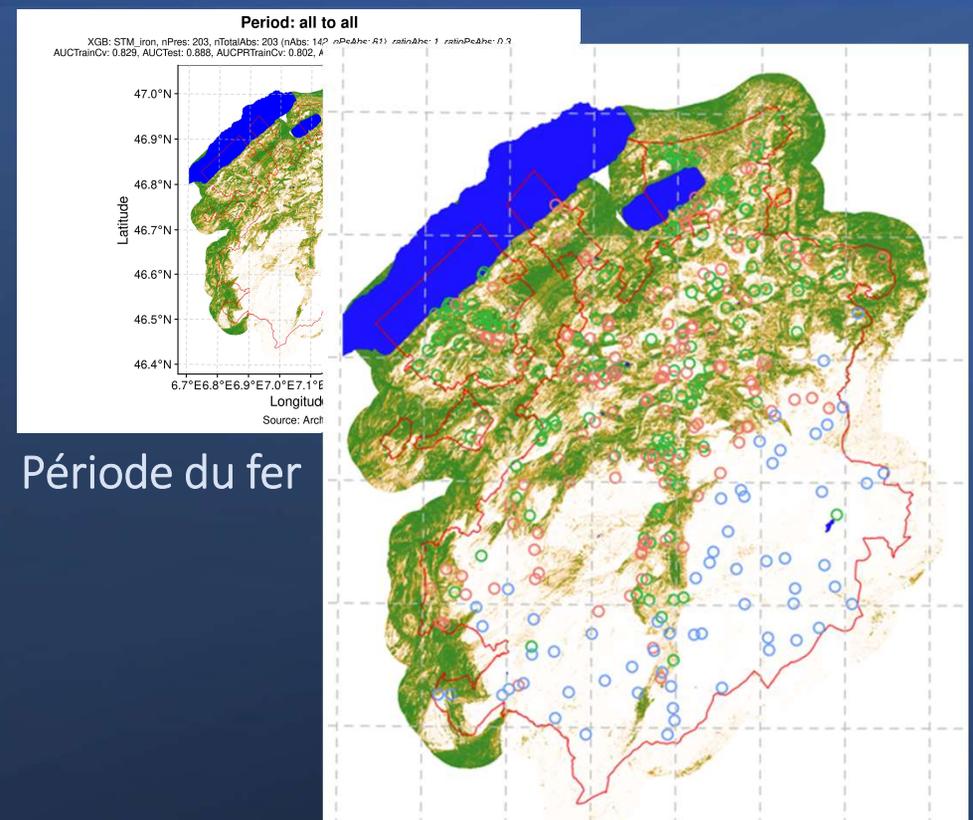
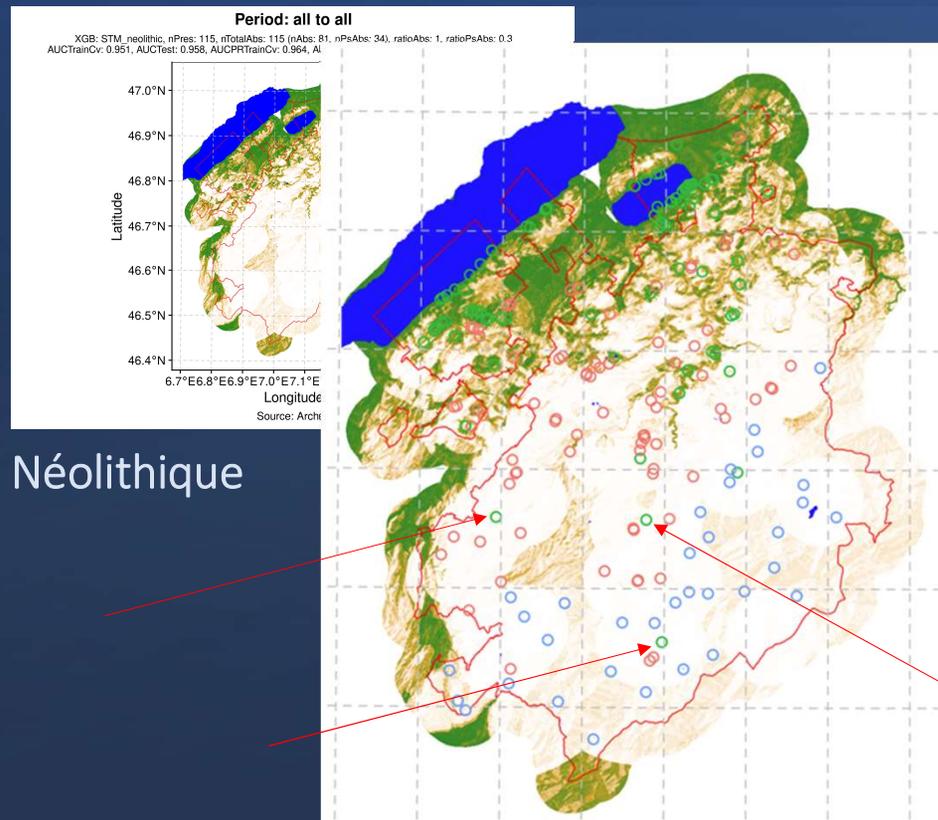
...

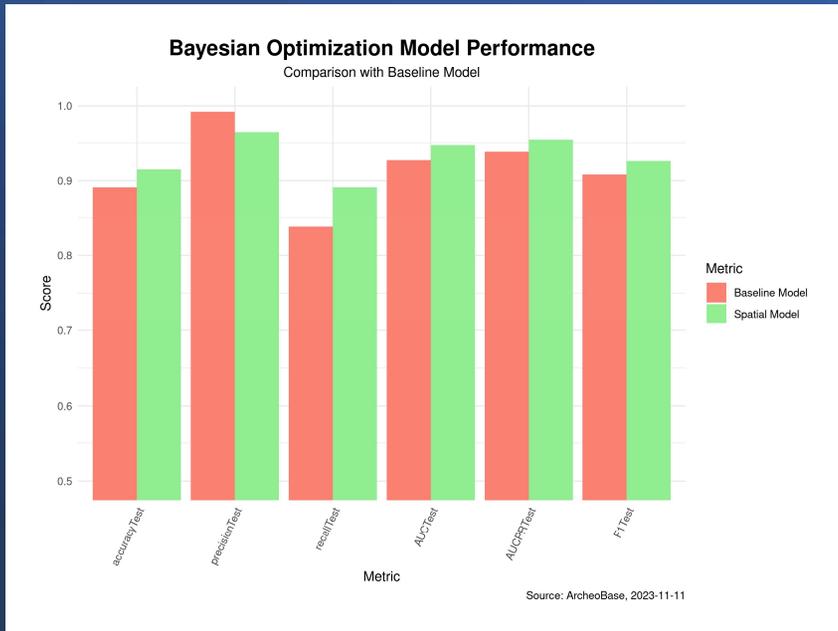
Néolithique

...



Les cartes prédictives doivent évoluer ; les données d'aujourd'hui façonnent la carte actuelle, mais les nouvelles données de demain pourraient redessiner le «paysage connu», ce qui nécessite un réentraînement régulier du modèle afin de garantir sa pertinence et sa fiabilité.





## AUC:

### Echelle d'évaluation selon littérature

(source: Mandkrekar 2010, Hosmer 2000)

- 0.5 : no discrimination
- 0.7 to 0.8 : acceptable
- 0.8 to 0.9: excellent
- **> 0.9 : outstanding**

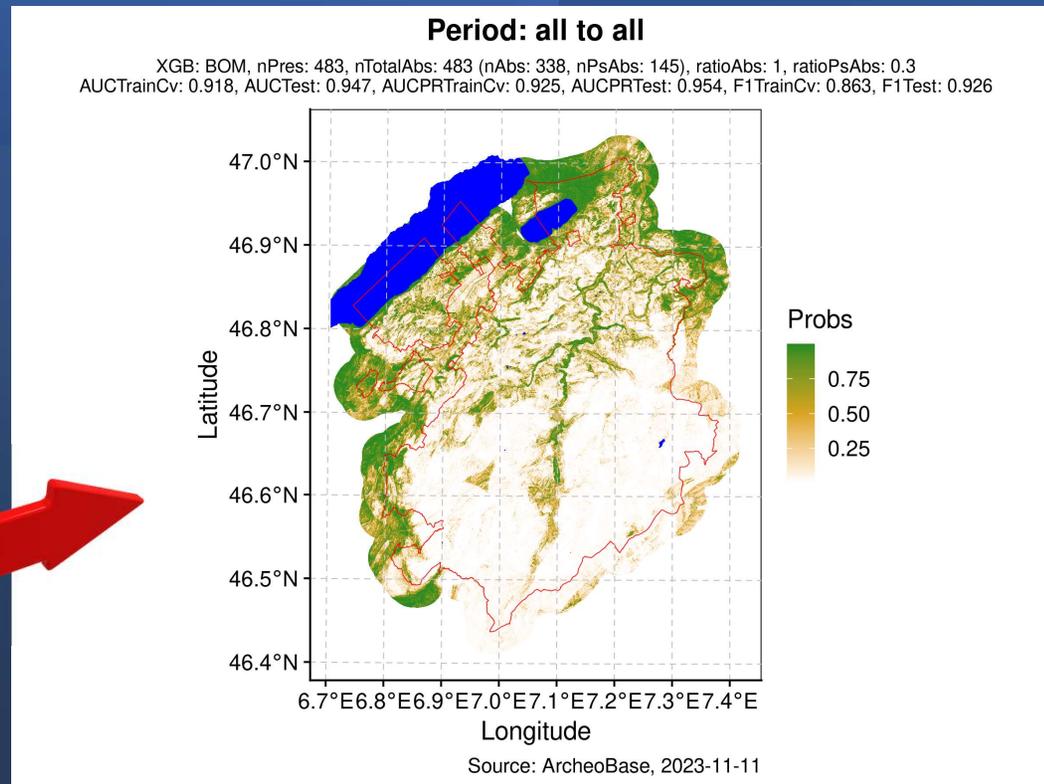
AUC: Le modèle distingue les lieux avec et sans présence archéologique avec un taux de succès de 95%. -> score exceptionnel selon la littérature

Modèle	Accuracy	Precision	Recall	AUC	AUCPR	F1
Base	0,891	0,991	0,838	0,927	0,938	0,918
Bayes Optim.	0,915	0,964	0,891	<b>0,947</b>	0,954	0,926

# Conversion automatisée des données en prédictions spatiales avancées

The screenshot shows a web-based data entry interface for a site named 'US 1'. It includes a header with the site name and a menu icon. Below the header, there are tabs for 'Informations', 'INV', and other options. The main content area contains several sections: 'Relations stratigraphiques (3)', 'Associé à (13)', and a 'Date' field set to '2022-01-04'. There are also dropdown menus for 'Datation' (set to 'Contemporain') and 'État de la fouille'. At the bottom, there are input fields for 'Stratiflog', 'Phase', 'Interprétation' (set to 'Remblai'), and 'Altitude' (with 'Alt. sup. max.' and 'Alt. sup. min.' fields). There are also checkboxes for 'Documentation' and 'Type' (set to 'Négative').

Formulaire de saisie sur le terrain



Prédictions spatiales dynamiques

Base analytique applicable à d'autres domaines que l'archéologie; contacter AnalyticBase (Dr. Emmanuel Clivaz) pour plus d'informations



Merci de votre attention !



Reto Blumer  
[reto.blumer@fr.ch](mailto:reto.blumer@fr.ch)

ArcheoBase

Dr. Emmanuel Clivaz  
[emmanuel.clivaz@analyticbase.org](mailto:emmanuel.clivaz@analyticbase.org)  
[www.archeobase.org](http://www.archeobase.org)