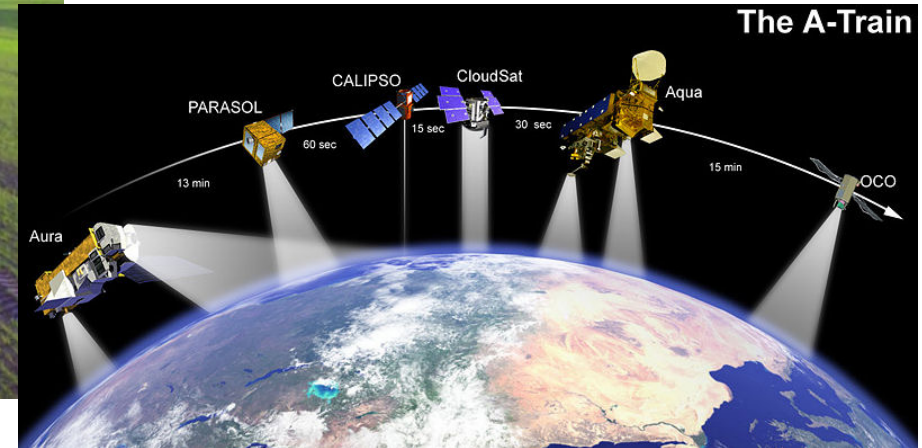


Évaluation des outils numériques en Agriculture

Antoine Cornuéjols

AgroParisTech – INRAE MIA Paris-Saclay

EKINOCS research group



Quelles sont les questions

- Production
 - Quantité
 - Qualité
 - Viabilité économique
 - Soutenabilité



Quelles sont les questions

- Production

- Quantité
- Qualité
- Viabilité économique
- Soutenabilité



- Environnement

- Impact sur
 - les **territoires**
 - Qualité des **sols**
 - Disponibilité de **l'eau**
 - le changement **climatique**
 - la **biodiversité**

- Des **acteurs** très divers
 - **Agriculteurs**
 - Distribution d'un **revenu** juste
 - Qualité de **vie**
 - **Autonomie**
 - **Indépendance** économique
 - **Société**
 - **Alimentation** : qualité et quantité
 - **Environnement**
 - **Autorités** publiques

Comment **aider** à **améliorer** les **pratiques agricoles**

Plan

1. Outils numériques dans l'agriculture : types de tâches
2. Des critères d'évaluation ... pas si évidents
3. Des critères d'évaluation ... à partager
4. Et l'IA générative ?
5. Autres critères

1. Perception

2. Détection

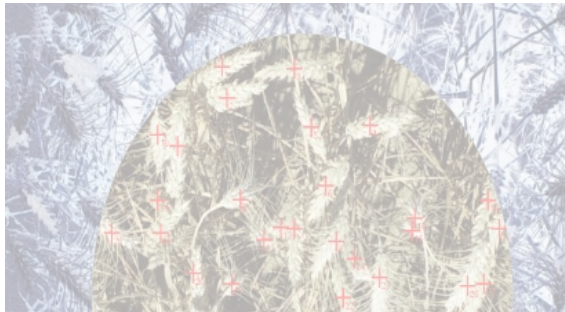
3. Alerte

4. Prédiction

5. Aide à la décision

1. Perception

- Comptage
- État du sol



2. Détection

- De **maladies**
- De présence d'**insectes** ravageurs



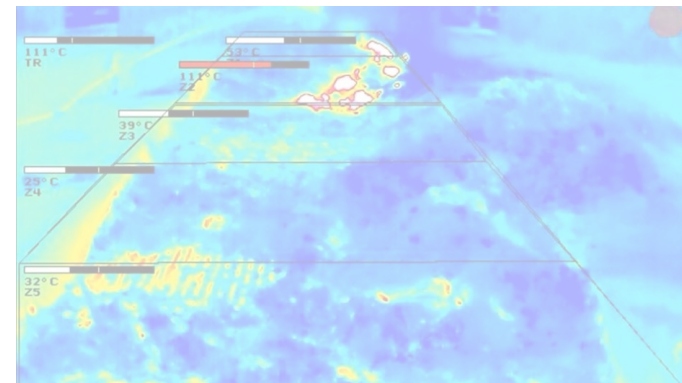
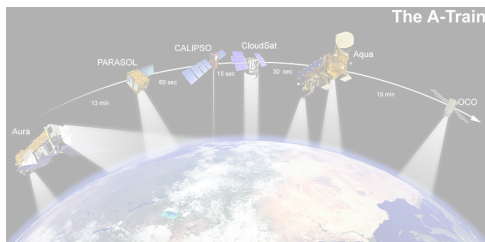
Apparition des
symptômes





3. Alerte

- Boiterie
- Niveau d'évapotranspiration





4. Prédiction

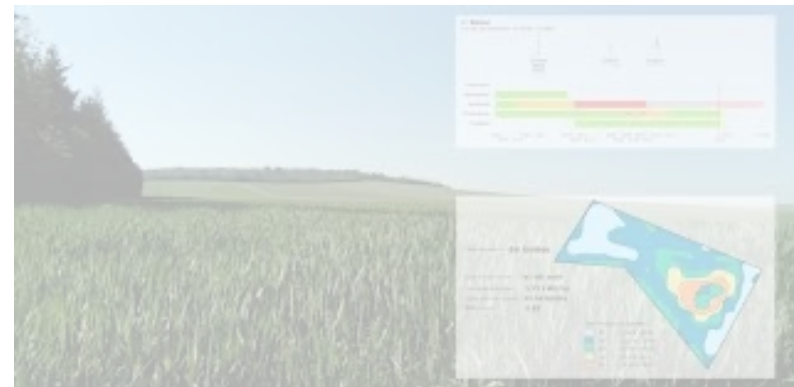
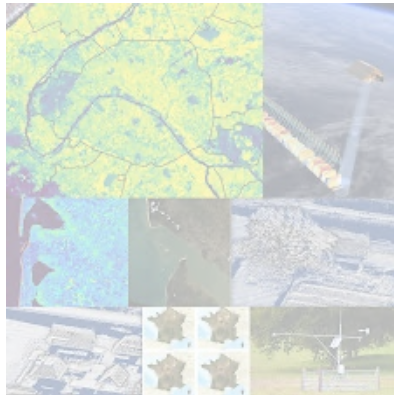
- De **gel** tardif
- D'apparition de **bio-agresseurs**
- Des besoins en **eau**
- Des besoins en **pollinisateurs**





5. Aide à la décision

- **Choix de culture**
- **Modulation** intra-parcellaire
- **Choix date** de semis
- **Gestion d'élevage**



5. Aide à la décision

- **Choix** de culture
- **Modulation** intra-parcellaire
- **Choix date** de semis
- **Gestion** d'élevage

Importance des liens de **causalité**

Plan

1. Outils numériques dans l'agriculture : types de tâches
2. Des critères d'évaluation ... pas si évidents
3. Des critères d'évaluation ... à partager
4. Et l'IA générative ?
5. Autres critères

Classification, régression : point de vue académique

- **Détection** de boiterie
 - Précision / rappel / spécificité
 - Mais **classes** bien définies ?

<i>Réel</i> <i>Estimé</i>	+	-
+	<i>VP</i>	<i>FP</i>
-	<i>FN</i>	<i>VN</i>

Classification, régression : point de vue académique

- **Détection de boiterie**

- Précision / rappel / spécificité
- Mais **classes** bien définies ?

<i>Réel</i> <i>Estimé</i>	+	-
+	<i>VP</i>	<i>FP</i>
-	<i>FN</i>	<i>VN</i>

- **Comptage de plantes**

- Régression

- R²
- Mean Absolute Error (MAE)
- Mean Square Error (MSE)
- Root Mean Square Error (RMSE)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

Classification, régression : la **vraie vie**

- **Détection** de boiterie
- **Comptage** de plantes

Classification, régression : la **vraie vie**

- **Détection** de boiterie

- Quels **capteurs** ?

- Accéléromètres
 - Vidéo

- **Facilité** de mise en œuvre
- **Coût**
- **Fiabilité**

- **Comptage** de plantes

- Quels **capteurs** ?

- Drone
 - Capteur en bout de perche

Qu'est-ce qu'une **estimation satisfaisante** ?

Des critères standards ... pas si évidents

— Évènements **rares**

- **Gel** très tardif
- **Inondation** exceptionnelle
- **Zoonose**
- Accident **géopolitique**

➤ **Données** représentatives

➤ Mesure de **performance**

Des critères standards ... pas si évidents

— Évènements **rares**

- **Gel** très tardif
- **Inondation** exceptionnelle
- **Zoonose**
- Accident **géopolitique**

➤ **Données** représentatives

➤ Mesure de **performance**

— Détection **précoce** d'anomalie

- Prédiction de **boiterie**
- Émergence de **bioagresseurs**

➤ **Compromis** précision vs. précocité

Des critères d'évaluation ... pas si évidents

— Évènements **rares**

- **Gel** très tardif
- **Inondation** exceptionnelle
- **Zoonose**
- Accident **géopolitique**

➤ **Données** représentatives

➤ Mesure de **performance**

— Détection **précoce** d'anomalie

- Prédiction de **boiterie**
- Émergence de **bioagresseurs**

➤ **Compromis** précision vs. précocité

— Environnement **non stationnaire**

- Changement **climatique**
- Changement de **culture**
- Perte de **biodiversité**

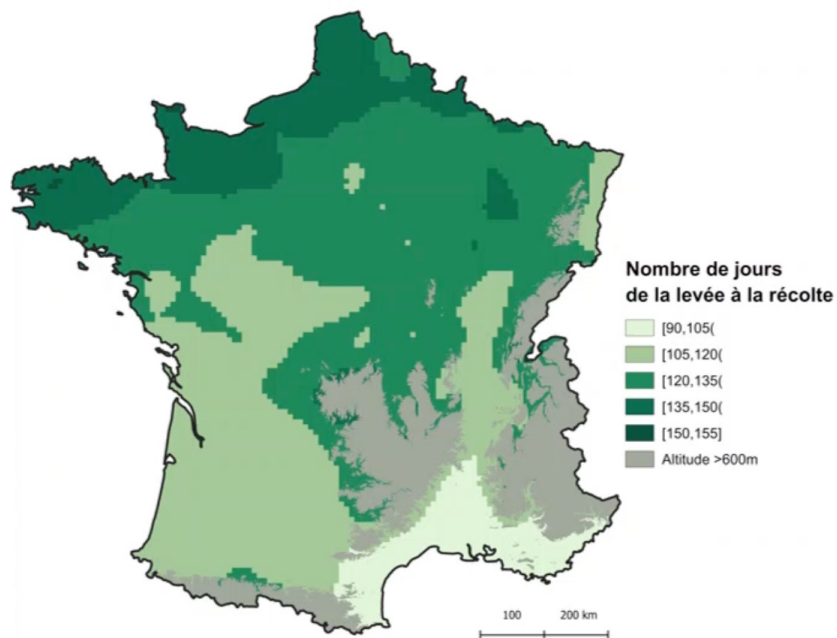
➤ Mesure de **robustesse**

Cas de la robustesse des prédictions



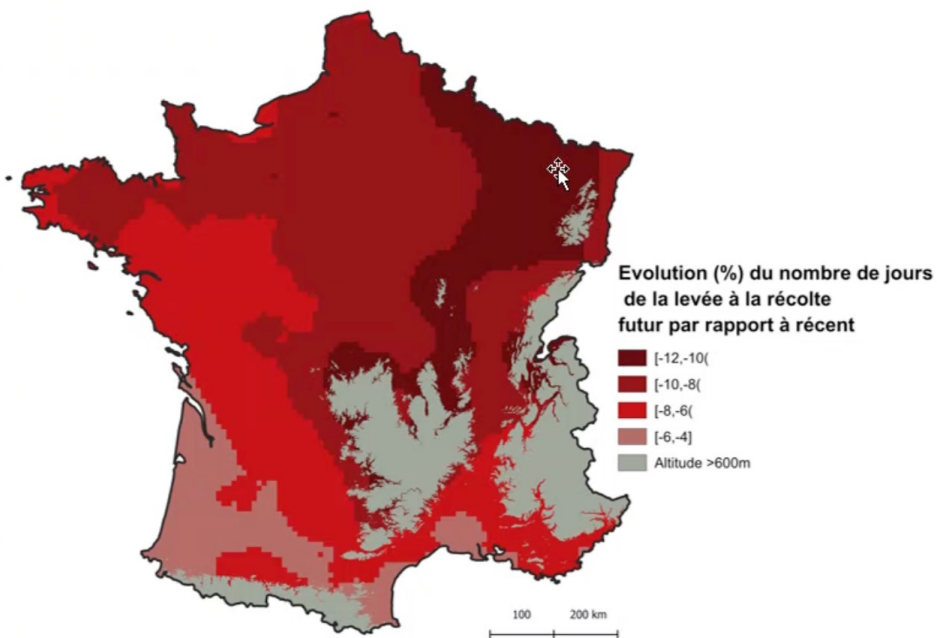
Culture du tournesol ... en 2040, 2050

Durée du cycle (levée-récolte)
Période récente (2006-2025) - Simulations SUNFLO
Variété mi-précoce - Semis 15 avril - RU 60mm



2006 - 2025

Evolution de la durée du cycle (levée-récolte) entre périodes future et récente
Simulations SUNFLO
Variété mi-précoce - Semis 15 avril - RU 60mm



2040 - 2059

Cas de la **robustesse** des prédictions



Culture du **tournesol** ... en 2040, 2050

- Modèles
 - **Mécanistes**
 - **Heuristiques** : réseaux de neurones

Appris sur des
données du **passé**

Comment se comportent-ils **en dehors**
de la distribution des données d'entraînement ?

Plan

1. Outils numériques dans l'agriculture : types de tâches
2. Des critères d'évaluation ... pas si évidents
3. Des critères d'évaluation ... à partager
4. Et l'IA générative ?
5. Autres critères

Des critères standards ... pas si partagés

- Manque de **bancs de tests** reconnus et partagés
 - **Boiterie** des animaux
 - Comptage de **plantes**
 - Détection d'**adventices**

Obstacle aux **comparaisons** rigoureuses et au **progrès**

Boiterie des animaux

- Des données ouvertes
 - 5 fermes
 - ~ 200 vaches
 - > 90 000 vidéo clips de 3 à 15 secondes annotés en 11 comportements (~280 h)



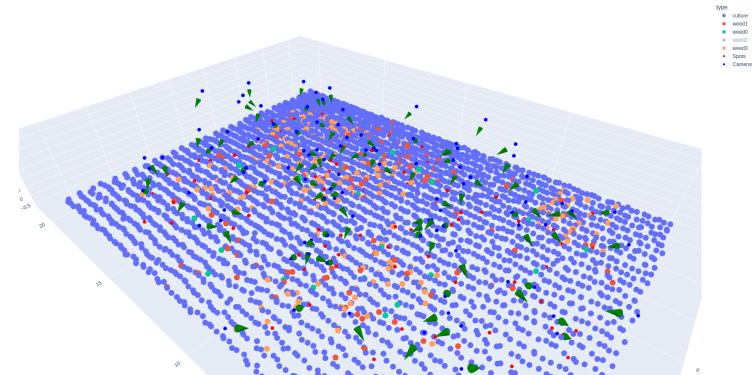
Tests standardisés pour la **détection d'adventices** en temps réel

- Enjeu
 - Pouvoir **tester** et **comparer** les solutions proposées de désherbage ciblé
 - Générer des flux d'images « **réalistes** »
 - ... **annotées**
 - contrôlables**
 - Prises comme **sources** pour les **capteurs** des appareils testés
 - Et **classées** par ces appareils :
 - mesure** de **performance**



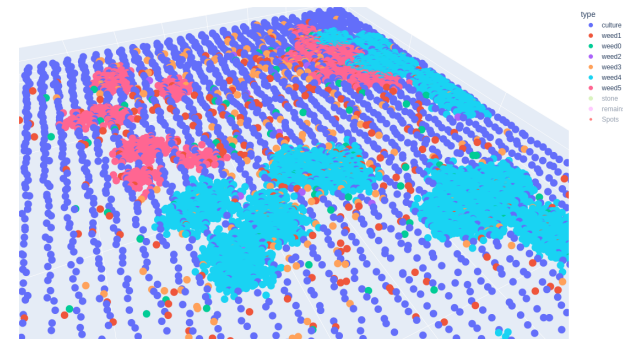
Contrôlables

- Type de **culture**



- **Adventices**

- Types
- Concentration
- Formes
- Taille / stades de développement



Réalistes ?

Réalistes ?

Les performances seraient les **mêmes** sur de vrais champs
quel que soit le système testé

- **Masques de plantes**
- **Positionnement et auto-annotations**



...

- Défi : réduire l'écart entre ce qui viendrait du **réel** et les **images synthétiques**

Outil de rendu : **Blender**



La qualité des données

- **Précision**
- **Fiabilité** ; incertitude
- Valeurs **manquantes**
- **Fréquence** de mesures
- **Pérennité** / mise à jour

- Données
 - **Multi-sources**
 - **Multi-échelles**
spatiales et temporelles

Plan

1. Outils numériques dans l'agriculture : types de tâches
2. Des critères d'évaluation ... pas si évidents
3. Des critères d'évaluation ... à partager
4. Et l'IA générative ?
5. Autres critères

La place de l'IA générative dans l'agriculture

1. Un **système d'exploitation** universel

- User friendly
- Multi modal
- Multi format

2. Un **conseiller**

- **Diagnostic**



J'ai l'impression que ma vache a un problème.
Peux-tu poser un diagnostic et me dire ce qu'il faut faire ?

Emprunté à Clément ALLAIN de l'IDELE

- **Diagnostic**



D'après la photo que vous nous avez envoyé, il s'agit d'un ulcère de la sole (?). (...) C'est vraiment l'un des problèmes de pied les plus fréquents et, franchement, les plus douloureux chez les bovins. C'est une lésion qui est tellement profonde, qu'elle expose les tissus vifs du pied. Ça provoque une boiterie vraiment sévère. Voyons ensemble les causes, le traitement et, surtout, comment l'éviter. Premièrement, les causes. Le coupable numéro 1, c'est une pression excessive (...) Ensuite, comment on soigne ça. L'étape cruciale, c'est le curage curatif, (...). Et enfin le plus important, la prévention (...).

Pour résumer, un bon traitement va soulager la douleur immédiatement, mais la vraie clé pour que le problème ne revienne jamais, c'est une prévention axée sur le confort et un bon suivi.

Qu'est-ce qui change avec les LLMs ?

Vers de véritables **assistants**

Comme avoir un **vétérinaire** ou un **technicien** ou un **expert forestier** ... tout le temps avec soi

- Recherche d'informations techniques
- Aide au **diagnostic**
- **Conseils** personnalisés
- Simplification **administrative** : remplissage de formulaires, comptabilité, ...

- Comment **évaluer** un assistant ?

Un changement de **paradigme**

Avant	Après
• Une tâche	
• Entrées – sorties identifiées	
• Apprendre un estimateur entre les deux	
• Critère de performance clair • Intervalles de confiance	

...

Un changement de **paradigme**

Avant	Après
• Une tâche	• Multi-tâches ; transfert
• Entrées – sorties identifiées	
• Apprendre un estimateur entre les deux	
• Critère de performance clair • Intervalles de confiance	

Un changement de **paradigme**

Avant	Après
• Une tâche	• Multi-tâches ; transfert
• Entrées – sorties identifiées	• Multi-modal ; multi-source ; itératif
• Apprendre un estimateur entre les deux	
• Critère de performance clair • Intervalles de confiance	

Un changement de **paradigme**

Avant	Après
• Une tâche	• Multi-tâches ; transfert
• Entrées – sorties identifiées	• Multi-modal ; multi-source ; itératif
• Apprendre un estimateur entre les deux	• Modèle génératif
• Critère de performance clair • Intervalles de confiance	

Un changement de **paradigme**

Avant	Après
• Une tâche	• Multi-tâches ; transfert
• Entrées – sorties identifiées	• Multi-modal ; multi-source ; itératif
• Apprendre un estimateur entre les deux	• Modèle génératif
• Critère de performance clair • Intervalles de confiance	• Critères multiples : explicabilité, fiabilité

Whatever the cost

Frugalité

- IA classique
 - Chaque **problème** : **un entraînement** spécifique
 - **Une** question ---> **une** réponse (quasi déterministe)
 - Des outils d'**évaluation** reconnus
- IA générative
 1. **Pré-entraînement** massif **indépendant** du problème :
« modèles de **fondation** »
 2. **Adaptation** (*fine-tuning*) au domaine d'application

- IA **génération**

1. **Pré-entraînement** massif **indépendant** du problème :

« modèles de **fondation** »

2. **Adaptation** (*fine-tuning*) au domaine d'application

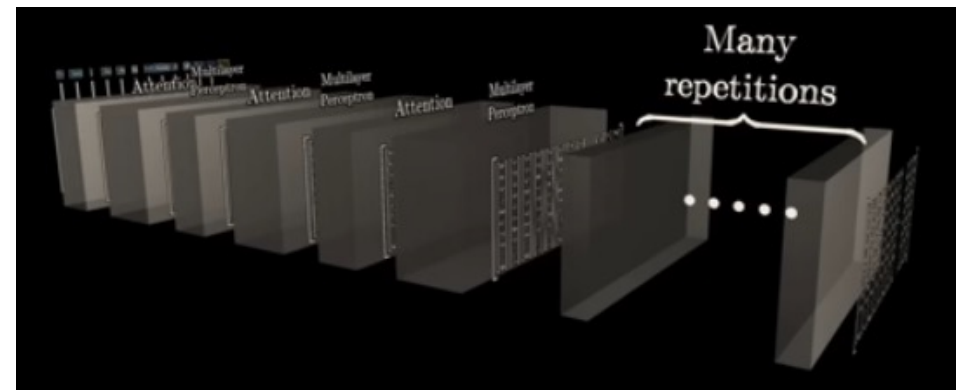
- **Interactions** multi-modales et en **continu**

- **PAS** d'outils d'**évaluation** rigoureuse

- Apprennent à **prédire le token** suivant

the → ???
 the fluffy → ???
 the fluffy blue → ???
 the fluffy blue creature → ???
 the fluffy blue creature roamed → ???
 the fluffy blue creature roamed the → ???
 the fluffy blue creature roamed the verdant → ???
 the fluffy blue creature roamed the verdant forest → ???

Gigantesque modèle



Données massives

Biais

Données

Acteurs

- IAg et **fiabilité** des réponses

- **Savent** beaucoup de choses
- Font toujours **comme s'ils** savaient
- Très bons en général, mais **quand ils se trompent**, ils se trompent **beaucoup** !
- Peuvent être **illogiques**
- **Manquent** de **bon sens**

PAS de notion de **vérité**

- IAg et **fiabilité** des réponses

- **Savent** beaucoup de choses
- Font toujours **comme s'ils** savaient
- Très bons en général, mais **quand ils se trompent**, ils se trompent **beaucoup** !
- Peuvent être **illogiques**
- **Manquent** de **bon sens**

PAS de notion de **vérité**

En train de changer

- Retrieval Augmented Generation (**RAG**)
- Recherche de preuve (en mathématique)
- **LWM** (Large World Models) :
apprennent à prédire le monde physique

Dans d'autres domaines

- Mathématique
 - Olympiades
 - Jeux de tests partagés
 - Notion de **preuve**
- Recherche d'information
 - Jeux de données de **référence** : GLUE et Super GLUE
 - Tâche de traitement du langage naturel : réponse à des questions, analyse de sentiments, implication textuelle

En agriculture ?

En agriculture

- Quelles tâches ?
- Quels scénarios ?
- Un jury
 - Mais quelle **composition** ?
 - Quelle **pérennité**

Plan

1. Outils numériques dans l'agriculture : types de tâches
2. Des critères d'évaluation ... pas si évidents
3. Des critères d'évaluation ... à partager
4. Et l'IA générative ?
5. Autres critères

Performance **environnementale**

- Consommation d'**eau**
 - Borne supérieure : $\frac{1}{2}$ litre d'eau pour **20 à 50 requêtes**
 - **10 fois** plus d'eau pour **une heure d'écoute** Spotify
 - **1000 fois** plus pour regarder un **épisode d'une série**

LI, Pengfei, YANG, Jianyi, ISLAM, Mohammad A., *et al.* Making ai less' thirsty'. *Communications of the ACM*, 2025, vol. 68, no 7, p. 54-61.

Performance **environnementale**

- Consommation d'**électricité**
 - ~0.3 Wh / requête
[Institut Epoch AI]
 - = une à deux secondes de **douche**
 - = consommation d'une **ampoule** à haute efficacité en qqs minutes
 - Un **foyer** français moyen consomme ~ 12 000 Wh / jour
 - La génération d'**images** et de flux **vidéo** représente ~98% de la consommation totale de l'IA générative !
 - La consommation annuelle de ChatGPT représenterait plus de 109 GWh d'électricité, soit ~ 10 400 foyers américains, ... pour **100 millions d'utilisateurs**
(Production française en 2020 : 500 TWh : 5000 fois plus)

Performance financière

- Cf. table ronde

Quel coût pour les **personnes** et les **institutions**

- Une **dépendance** à l'IA et aux IAg ?
 - **Compétences**
 - Enrichissement ou perte ?
 - **Souveraineté**
 - Dépendance aux très grands **acteurs** de l'IA ?
 - À de grands **groupes alimentaires** ?
 - À de **super-coopératives** ? (jusqu'à l'échelle supra nationale)

Quel biais en termes d'orientation ?

- **Investissements** importants
 - Qui pour les **supporter** ?
- **Expertise** nécessaire élevée ?
 - Pour les **utiliser**
 - Pour les **développer**
 - Pour créer et **maintenir un éco-système** bénéfique pour le plus grand nombre
- Outils neutres ?
- Favorisent une agriculture intensive ?

Expérimenter, Analyser, Partager

- Living Labs
 - Tiers-lieu d'expérimentation et d'échanges
 - Multi-acteurs
 - Multi-approches
 - En environnement réel

H@rvest

- Infrastructures
 - Scientifiques
 - D'enseignement

Annexes

Le domaine du **vivant**

1. Des systèmes **naturels**

- Les **modèles** sous-jacents, les liens de **causalité** sont **inconnus**

2. Très **complexes**

- très **multi-échelles** spatiales et temporelles

3. Très **multi-factoriels**

4. **Adaptatifs** donc difficiles à prévoir

- E.g. émergence de bio-résistance

Importance des
liens de **causalité**

- Être à la fois **ambitieux** et **humiles**

- Inventer
- Imaginer
- Essayer
- Expérimenter
- Être attentifs
 - aux **faits**
 - aux **autres**

Intelligence **A**ugmentée
et *sensible*

Ce qu'il faut d'**IA**

L'IA peut aider

1. Comprendre

- Le fonctionnement des **éco-systèmes**
 - Capteurs partout
- Les choix des **consommateurs**
 - Défi : découvrir les liens causaux

2. Anticiper

- Classification **précoce**
- Défi : **combiner** les incertitudes
- En temps réel
- Sources **multiples**

3. Contrôler

— Aide à la **décision**

- Agriculture de précision
- Décisions stratégiques

— Défis

- Multi factoriel et multi objectif
- E.g. la viabilité

4. Favoriser la **collaboration humain - machine**

- Prendre en compte des **connaissances expertes**
- **Expliquer** les résultats

Conditions de « succès »

- Bases de **données**

- De **qualité**
- Représentatives (attention aux biais : genre, niveau social, ...)
- Partagées (mais attention)

- **Algorithmes**

- **Intégrés** dans un système complet
 - Interopérabilité
 - Capacité de temps réel
- **Au niveau** des experts humains
- Transparence et **explicabilité** des suggestions
- « Conscients » de leurs **limites**
- **Adaptatifs**

Zones géographiques peu numérisées

- Peu de ressources
 - En expertise
 - En données
 - En calcul

AfricaNLP workshop at ICLR2023

ADAPTING TO THE LOW-RESOURCE DOUBLE-BIND: INVESTIGATING LOW-COMPUTE METHODS ON LOW- RESOURCE AFRICAN LANGUAGES

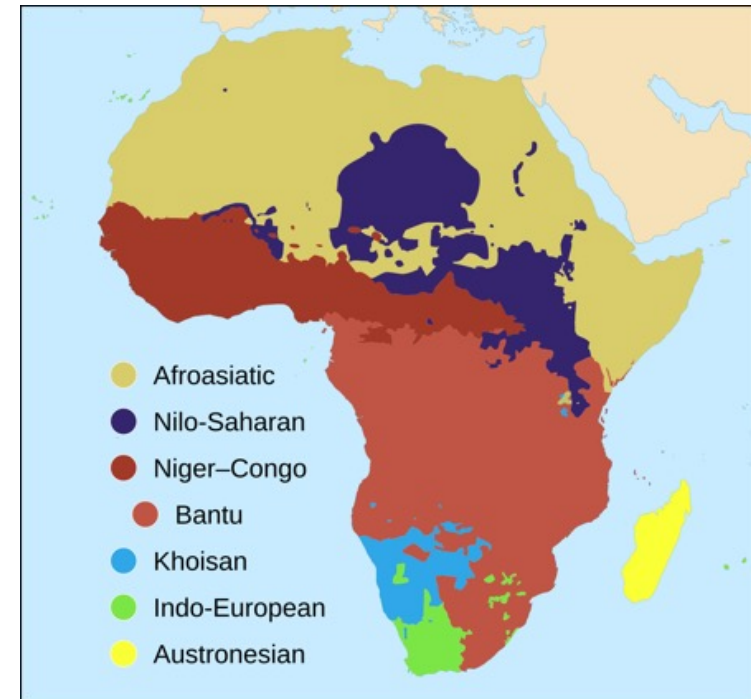
∀*, Colin Leong¹, Herumb Shandilya*, Bonaventure F. P. Dossou^{2,3,4,14}, Atnafu Lambebo Tonja⁵,
Joel Mathew⁶, Abdul-Hakeem Omotayo⁷, Oreen Yousuf*, Zainab Akinjobi⁸,
Chris Chinenye Emezue^{9,14}, Shamsudeen Muhammad¹⁰, Steven Kolawole¹¹,
Younwoo Choi¹², Tosin Adewumi¹³

*Masakhane NLP, ¹University of Dayton, ²Center for Intelligent Machines, McGill University, ³Mila Quebec AI Institute,

⁴Lelapa AI, ⁵Instituto Politécnico Nacional, ⁶USC Information Sciences Institute, ⁷University of California, Davis

⁸New Mexico State University, ⁹Technical University of Munich, ¹⁰University of Porto, ¹¹ML Collective,

¹²University of Toronto, ¹³ML Group, Luleå University of Technology, ¹⁴Lanfrica.



Les défis

1. Mieux **comprendre**

2. Mieux **anticiper**

3. Mieux **contrôler**

4. Mieux **collaborer**

Dans une **démarche**
multi-objectif

Avec des **acteurs**
multiples et variés

Questions pour l'IA : traitement des données

- **Qualité** des données
 - **Précision**
 - **Fiabilité** ; incertitude
 - Valeurs **manquantes**
 - **Fréquence** de mesures
 - **Pérennité** / mise à jour

Questions pour l'IA : traitement des données

- **Qualité** des données
 - **Précision**
 - **Fiabilité** ; incertitude
 - Valeurs **manquantes**
 - **Fréquence** de mesures
 - **Pérennité** / mise à jour
- **Fusion / intégration**
 - Données **multi-sources** (synchronisation)
 - Données **multi-échelles** spatiales et temporelles

Références

- **Agriculture et numérique : Tirer le meilleur du numérique pour contribuer à la transition vers des agricultures et des systèmes alimentaires durables.** Livre blanc N°06, INRIA / INRAE (2022)
- Science et Vie HS
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Théorie_de_la_viabilité
- ACHENCHABE, Youssef, BONDU, Alexis, CORNUÉJOLS, Antoine, *et al.* **Early classification of time series: Cost-based optimization criterion and algorithms.** *Machine Learning*, 2021, vol. 110, no 6, p. 1481-1504.
- HU, Guoqing et YOU, Fengqi. **An AI framework integrating physics-informed neural network with predictive control for energy-efficient food production in the built environment.** *Applied Energy*, 2023, vol. 348, p. 121450.
- JACOPIN, Eliott, BERDA, Naomie, COURTEILLE, Léa, *et al.* **Using agents and unsupervised learning for counting objects in images with spatial organization.** In : *13th International Conference on Agents and Artificial Intelligence*. SCITEPRESS-Science and Technology Publications, 2021. p. 688-697.
- VANDEPUTTE, Jules, HEROLD, Pierrick, KUSLII, Mykyt, *et al.* **Principles and validations of an artificial intelligence-based recommender system suggesting acceptable food changes.** *The Journal of Nutrition*, 2023, vol. 153, no 2, p. 598-604.
- VANDEPUTTE, Jules, CORNUÉJOLS, Antoine, DARCEL, Nicolas N., *et al.* **Coaching agent: Making recommendations for behavior change. a case study on improving eating habits.** In : *21st International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS)*. 2022. p. 1292-1300.
- Alliance H@rvest : <https://alliance-harvest.com/>
- Chaire AgroTIC : <https://www.agrotic.org/>

Suppléments

Big data : qui contrôle ?

- Du **big** data

Environnement, agriculture numérique

Questions :

- Qui possède les **données** ?
- Qui possède et maîtrise les **algorithmes** et services ?

Big data : qui contrôle ?

- Du **big** data

Environnement, agriculture numérique

Questions :

- Qui possède les **données** ?
 - Qui possède et maîtrise les **algorithmes** et services ?
-
- Les constructeurs de **machines agricoles** (e.g. John Deere)
 - Les **concentrateurs de données** (e.g. Google)
 - Les coopératives

Big data : qui contrôle ?

- Du **big** data

Environnement, agriculture numérique

Questions :

- Qui possède les **données** ?
 - Qui possède et maîtrise les **algorithmes** et services ?
-
- Un enjeu crucial pour les **exploitants** agricoles
 - Mais aussi pour les **états**

Questions

- Une **multitude de données** en jeu
 - Télédétection
 - Drones ; capteurs
 - Coopératives
 - Cours de la bourse
 - Prévision météo
- **Où** sont les **données** ? **Qui** les **contrôle** ?
 - Confidentialité des données
 - Souveraineté sur les données
- **Qui** **possède les outils** de recommandation, d'aide à la décision ?

-
- Des choix d'abord **politiques**
 - **Souveraineté** sur les données
 - Des assistants intelligents **agréés** par des organismes de **confiance**
 - En quoi la **technique** peut nous aider ?
 - Des systèmes fournissant des **explications** !?

L'apprentissage automatique en agriculture

1. Gestion des **cultures**

- Prédiction de **rendement**
- Détection de **maladies**
- Détection d'**insectes ravageurs**
- Identification de facteurs liés à la **qualité des cultures**
- Reconnaissance automatique d'**espèces de plantes**

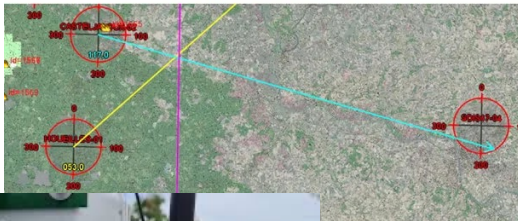
2. Gestion de l'**élevage**

- Suivi du **bien-être** des animaux
- Prédiction du **rendement**

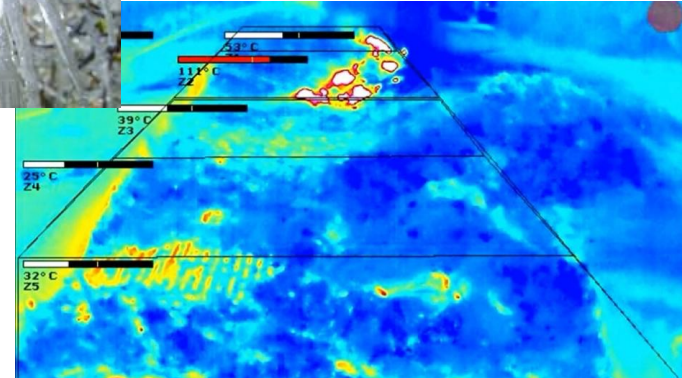
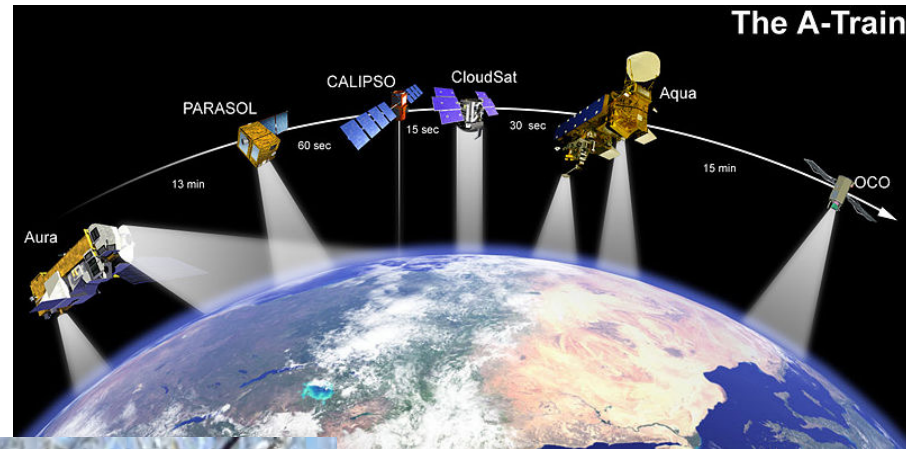
3. Gestion de l'**eau** : prédiction de l'évapotranspiration

4. Gestion des **sols** : température, humidité, richesse en micro-organismes





1. Perception
2. Détection
3. Alerte



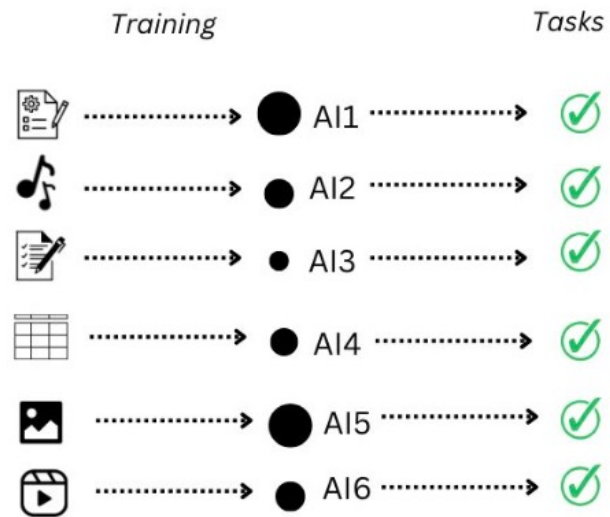
- Détection précoce des boiteries

- Comp



Foundation models

Traditional ML



Foundation Models

