



**HAL**  
open science

# Actes de la 3e conférence nationale sur les Applications Pratiques de l'Intelligence Artificielle

Sandra Bringay

► **To cite this version:**

Sandra Bringay. Actes de la 3e conférence nationale sur les Applications Pratiques de l'Intelligence Artificielle : APIA 2017. Plate-Forme Intelligence Artificielle, Association Française pour l'Intelligence Artificielle, 2017. hal-04593281

**HAL Id: hal-04593281**

**<https://ut3-toulouseinp.hal.science/hal-04593281>**

Submitted on 29 May 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0  
International License

**PFIA 2017** APIA IAF IC JFPDA JFSMA RJCIA

**Actes de  
APIA 2017**

**Conférence Nationale sur les  
Applications Pratiques de l'Intelligence  
Artificielle**

**Dans le cadre de la plateforme Intelligence Artificielle  
PFIA 2017**

3-4 Juillet 2017, Caen, France



# Comité de programme

- Carole Adam, LIG CNRS UMR 5217 - Université Joseph Fourier
- Julian Alvarez, Play Research Lab - Université de Lille et CCI Grand Hainaut
- Florence Amardeilh, Mondeca / MoDyCo (Paris X)
- Alain Berger, Ardans
- Matthieu Boussard, Craft AI
- Bertrand Braunschweig, Inria Saclay
- Sandra Bringay, Université Paul Valéry Montpellier - LIRMM, France (**Présidente du comité de programme**)
- Nathalie Chaignaud, LITIS EA 4108 - INSA Rouen
- François Cheriaux, EDF R&D
- Caroline Chopinaud, MASA Group
- Jan Ciger, Reviatech SAS
- Philippe David, SNCF
- Jean-Marc David, Renault
- Etienne de Sevin, SANPSY - University of Bordeaux
- Yves Demazeau, CNRS - LIG
- Sylvie Despres, LIM&BIO, Université Paris 13
- Sébastien Destercke, CNRS, UMR Heudiasyc
- Jean-Yves Donnart, THALES
- Béatrice Fuchs, LIRIS, IAE - Université Lyon 3
- Catherine Garbay, CNRS - LIG
- Abdelkader Gouaïch, LIRMM - Université de Montpellier
- Christophe Guettier, Safran Electronique et Défense
- Hudelot Céline, Ecole Centrale Paris
- Christine Largouët, Irisa /Agrocampus Ouest
- Dominique Lenne, Heudiasyc - Université de Technologie de Compiègne
- Domitile Lourdeaux, Heudiasyc UMR7253 - Université de Technologie de Compiègne
- Sylvain Mahe, EDF Recherche et Développement
- Jean-Charles Marty, LIRIS - equipe SICAL
- Philippe Mathieu, University of Lille 1
- Nada Matta, University of Technology of Troyes
- Eunika Mercier-Laurent, IAE - Université Jean Moulin Lyon 3
- Philippe Morignot, INRIA Rocquencourt
- Pascal Négros, Université Paris I Sorbonne
- Selmin Nurcan, Université Paris 1 Panthéon - Sorbonne
- Jean-Marc Ogier, L3i - University of La Rochelle

- Francois Pachet, CSL Sony Paris
- Romarie Redon, AIRBUS
- Benoit Ricard, EDF R&D
- Jean Rohmer, ESILV
- Dominique Romary, ODΣFI
- Catherine Tessier, Onera-DCSD
- Erwan Tranvouez, LSIS - Polytech'Marseille - Université d'Aix-Marseille
- Brigitte Trousse, INRIA
- Amel Yessad, LIP 6 - Université Pierre et Marie Curie

# Avant-propos

La sélection d'articles publiés dans ce recueil constitue les actes de la 3ème Conférence Nationale sur les Applications Pratiques de l'Intelligence Artificielle (APIA 2017). Cette conférence s'est déroulée du 3 au 4 juillet 2017 à Caen, dans le cadre de la plateforme PFIA 2017.

Les recherches en IA menées ces dernières années ont abouti à des résultats prometteurs. L'IA se trouve au cœur de nombreuses applications, très performantes, qui révolutionnent notre vie quotidienne et d'autres très prometteuses sont en passe de le devenir. L'objectif de la conférence a été de faire un tour d'horizon des applications concrètes qui couronnent de succès l'opérationnalisation de l'IA.

Quelles sont les applications qui s'appuient sur de l'IA ou qui nécessitent de l'IA ? Du système de surveillance militaire au système d'aide au diagnostic médical, du climatiseur à l'assistant personnel, du système d'aide à la conduite à l'analyse de données massives, etc., les applications sont nombreuses. Qu'elles soient industrielles, sociétales, économiques, politiques, environnementales, artistiques ou autres, la conférence est l'occasion de présenter des applications concrètes et des travaux dont l'objet d'étude n'est pas uniquement des cas de laboratoire. Nous attendons des contributions dans des domaines très divers : automobile, robotique, militaire, logistique, télécommunication, domotique, agronomie, réseaux sociaux, risque, big data, médical, aide à la personne, jeux vidéo, réalité virtuelle/mixte, musées, EIAH, serious games, récit interactif et bien d'autres encore. . .

L'objectif est également de voir comment ces applications concrètes font remonter des verrous scientifiques que l'IA doit résoudre pour démocratiser encore plus son utilisation. Par exemple, comment la prise en compte des réalités concrètes vues dans leur globalité amènent la prise en compte par l'IA de problèmes complexes décuplés qu'il n'est pas possible de rendre compte dans des approches réductionnistes de problèmes de laboratoire ? L'IA est-elle suffisamment expressive et intelligible pour être utilisée ? Est-elle fiable et robuste ? Est-elle capable de passer à l'échelle ? Quels sont les problèmes éthiques liés à son utilisation ? Nous nous demanderons comment les applications concrètes apportent des problématiques fondamentales ou encore comment des recherches fondamentales apportent des solutions à des problèmes complexes difficiles à résoudre sans IA ?

La conférence favorise l'échange entre chercheurs académiques, industriels et autres pour qu'ils puissent partager leurs expériences, débattre des différents verrous qu'ils rencontrent, des méthodes qu'ils mettent en œuvre pour enrichir le potentiel applicatif des modèles et des outils de l'IA et les besoins naissants, en mettant en valeur l'IA de ces applications.

Parmi 17 articles soumis, 9 articles ont été retenus (52,9% d'acceptation). Parmi 7 démonstrations soumises, 4 ont été retenues (57,1% d'acceptation). Les 4 démonstrations ont été présentées dans une session commune de la plateforme PFIA (APIA/IAF/JFSMA). Elles ont été incluses dans les actes et ont donné lieu à une présentation en session plénière dans le cadre de la conférence APIA. Une démonstration, commune avec IAF n'est pas présente dans ces actes mais dans ceux de IAF. De même, une démonstration, commune avec IC n'est pas présente dans ces actes mais dans ceux de IC.

Dans cette édition, les thèmes abordés par les auteurs couvrent différents aspects de l'IA. Ainsi, les approches décrites s'intéressent à des thèmes variés comme l'ingénierie de la connaissance, les méthodes d'apprentissage, la modélisation statistique, la théorie des jeux, les systèmes expert, le web des données et les données liées. Les domaines d'application sont également très diversifiés : la formation, la géologie, l'e-commerce, l'épidémiologie animale, la détection de fumée, l'eye tracking, les environnements virtuels, la reconnaissance gestuelle, la vision par ordinateur ou encore les systèmes assistants.

Je remercie vivement les auteurs pour leurs contributions, le comité de programme et les relecteurs additionnels pour la qualité de leurs recommandations ainsi que les organisateurs de la plateforme pour leur investissement.

Sandra Bringay *Présidente du comité de programme*



# Sommaire

<b>Index des auteurs</b>	<b>7</b>
<b>Sessions plenières</b>	<b>9</b>
François Meunier, Christophe Marsala, Laurent Castanié. <i>3DRESC-TF : Apprentissage par transfert pour la réutilisation de connaissances en classification d'objets 3D</i>	11
Emmanuelle Claeys, Pierre Gançarski, Myriam Maumy-Bertrand. <i>Approche paramétrique de bandits pour l'A/B test</i>	19
Amine Kacete, Renaud Séguier, Michel Collobert, Jérôme Royan. <i>Can Synthetic Data Handle Unconstrained Gaze Estimation ?</i>	27
Aline Belloni, Alain Berger, Jean-Pierre Cotton. <i>Cibler une action de gestion des connaissances appropriée dans un cadre industriel : retour d'expérience d'Ardans.</i>	35
Sébastien Frizzi, Rabeb Kaabi, Moez Bouchouicha, Jean-Marc Ginoux, Farhat Fnaiech, Eric Moreau. <i>Détection de la fumée et du feu par réseau de neurones convolutifs</i>	45
Anne-France Viet, Catherine Belloc, Régis Sabbadin. <i>Formalisation et résolution d'un problème en Santé Animale avec le cadre Leader-Follower MDP</i>	53
Domitile Lourdeaux, Azzeddine Benabbou, Lauriane Hugué, Rémi Lacaze-Labadie. <i>HUMANS : suite logicielle pour la scénarisation d'environnements virtuels pour la formation à des situations socio-techniques complexes</i>	61
Thomas Raimbault, Sonia Djebali. <i>Interroger intuitivement le Web des Données avec SimplePARQL</i>	69
Matthieu Boussard, Clodéric Mars, Rémi Dês, Caroline Chopinaud. <i>Periodic split method : learning more readable decision trees for human activities</i>	73
<b>Démonstrations et Posters</b>	<b>79</b>
Jean-Baptiste Guignard, Ophir Paz, Kim Savaroche, Laurent Gaidon. <i>Clay VR : how smartphone VR is a game-changer for Weak AI and Touchless Technology</i>	81
Vincent Letard, Gabriel Illouz, Sophie Rosset. <i>NELIDA : assistant opérationnel générique apprenant incrémentalement par interaction</i>	85

# Index des auteurs

## - B -

Belloc, C., 53  
Belloni, A., 35  
Benabbou, S., 61  
Berger, A., 35  
Bouchouicha, M., 45  
Boussard, M., 73  
Marsala, C., 11

## - C -

Castanié, L., 11  
Chopinaud, C., 73  
Claeys, E., 19  
Collobert, M., 27  
Cotton, J.P., 35

## - D -

Dès, R., 73  
Djebali, S., 69

## - F -

Fnaiech, F., 45  
Frizzi, S., 45

## - G -

Gaidon, L., 81  
Gançarski, P., 19  
Ginoux, J.M., 45  
Guignard, J-B., 81

## - H -

Huguet, E.M., 61

## - I -

Illouz, G., 85

## - K -

Kaabi, R., 45  
Kacete, A., 27

## - L -

Lacaze-Labadie, E.M., 61  
Letard, V., 85  
Lourdeaux, M.N., 61

## - M -

Mars, C., 73  
Maumy-Bertrand, M., 19  
Meunier, F., 11  
Moreau, E., 45

## - P -

Paz, O., 81

## - R -

Raimbault, T., 69  
Rosset, S., 85  
Royan, J., 27

## - S -

Séguier, R., 27  
Sabbadin, R., 53  
Savaroche, K., 81

## - V -

Viet, A.F., 53

# **Sessions plénières**



# 3DRESC-TF : Apprentissage par transfert pour la réutilisation de connaissances en classification d'objets 3D

François Meunier<sup>1,2</sup>

Christophe Marsala<sup>1</sup>

Laurent Castanié<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Sorbonne Universités, UPMC Univ Paris 06, CNRS, LIP6 UMR 7606  
4 place Jussieu, 75005 Paris

<sup>2</sup> Total Exploration-Production, Tour Coupole, La Défense  
2 Place Jean Millier, 92800 Puteaux

Francois.Meunier@lip6.fr

## Résumé

*Dans cet article, nous proposons une amélioration basée sur du transfert de connaissances d'un algorithme de classification d'objets 3D existant, afin de pouvoir faire face aux manques de données, problème fréquent en apprentissage.*

*L'idée maitresse réside dans le fait de transférer directement les sous-parties constructrices d'attributs d'un domaine vers un autre, afin de conserver les avantages d'interprétabilité et de souplesse de la méthode d'origine.*

## Mots Clefs

Classification supervisée, objets 3D, apprentissage par transfert, sélection d'attributs.

## Abstract

*In this article, we propose an improvement of an algorithm dealing with classification of 3D objects, using transfer learning, in order to face the lack of data, a frequent problem in learning systems.*

*The main idea is to directly transfer some sub-parts which are attributes builder from one domain to another in order to keep the advantages of interpretability and flexibility of the original method.*

## Keywords

Supervised classification, 3D objects, transfer learning, feature selection.

## 1 Introduction

Pour l'entreprise pétrolière Total, lors de l'étude géologique d'un sous-sol potentiellement riche en hydrocarbures, il est nécessaire de bien comprendre sa structure. C'est un élément fondamental de la chaîne de traitement de l'information en géosciences, dont la qualité et l'efficacité d'exécution se répercuteront sur le reste de l'étude. C'est en effet au cours de cette étape que le géologue peut obtenir, pour les décideurs, les éléments dont ces derniers

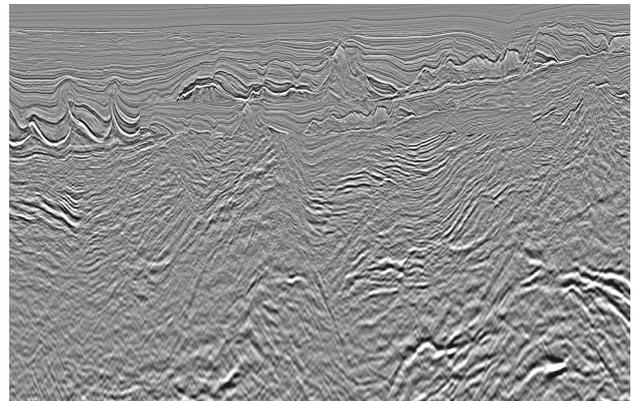


FIGURE 1 – Image sismique

ont besoin lors des choix de permis d'exploitation.

Pour cela, les géologues créent, à partir d'images sismiques reconstituées grâce à des ondes acoustiques envoyées dans le sol (Figure 1), un géo-modèle 3D censé représenter les principales couches et failles de la zone (Figure 2). Le géo-modèle, composé de surfaces 3D correspondant aux limites entre les couches sédimentaires, ne décrit que la structure géométrique du sous-sol.

Ce dernier est ensuite, en fonction des phénomènes que l'on y trouve, classé par le géologue selon les ensembles pertinents auxquels il se rattache. Les ensembles dont on parle correspondent à la présence ou à l'absence d'un certain phénomène géologique, comme par exemple des failles (normales, inverses, ...) ou des phénomènes d'interaction entre différentes couches (subduction, ...). Il s'agit donc, pour un géologue, de déterminer l'absence ou la présence de phénomènes géologiques locaux.

Jusqu'à maintenant, cette classification, comme le reste de l'étude, est réalisée manuellement par un géologue d'expérience qui connaît la zone. Cela représente une charge

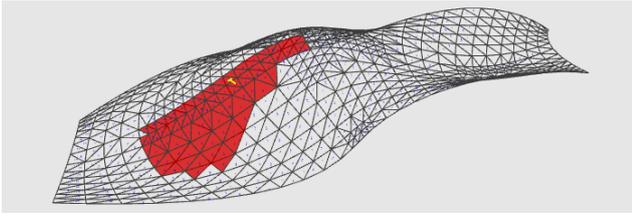


FIGURE 2 – Maillage triangulaire 3D récupéré pour chaque couche géologique

de travail conséquente, qu'une automatisation peut grandement faciliter. De plus, certains géologues disposent de moins d'expérience, tant dans le métier en lui-même que dans les personnes les plus utiles à contacter, entraînant une mauvaise évaluation des données en présence.

Néanmoins, afin de permettre une adoption par des professionnels de méthodes changeant leur manière de travailler, il est nécessaire, en plus de les convaincre par les performances des modèles présentés, de leur fournir un moyen d'appréhender de façon interprétable la méthode et/ou les résultats de cette dernière.

L'algorithme de classification supervisé de formes 3D de [Meunier et al., 2017] est une première approche du problème issue de la notion de shapelets de [Refregier, 2001], en utilisant des sous-parties discriminantes de la structure étudiée. Basé sur un système de classification supervisé traditionnelle, les résultats sont convaincants. Pourtant, il nous est apparu comme essentiel de chercher à rendre ce système moins dépendant des données spécifiques disponibles comme base d'apprentissage de la classification souhaitée. Pouvoir réutiliser d'autres classifications, dont les probabilités de distribution des données et des classes ne seraient pas trop éloignées de celle visée, est un bon moyen d'y parvenir. A cette fin, il est proposé une adaptation de cette méthode afin de pouvoir améliorer la performance du classifieur en se reposant sur de l'expérience accumulée dans d'autres contextes, ce par transfert de connaissances.

Dans cet article, après une présentation de la méthode d'origine en Section 2, un état de l'art sur le transfert de connaissances est présenté en Section 3, puis en Section 4 la méthode proposée, avant que la Section 5 ne donne les perspectives de cette dernière.

## 2 Approche existante

En classification supervisée, certaines structures de données nécessitent un traitement particulier, impossible à réaliser par les méthodes classiques. Dans le cas des objets 3D, les méthodes actuelles ne permettent pas, sans connaissance préalable, de comprendre quelles sous-parties d'un objet peuvent être discriminantes dans le cadre de la présence du phénomène étudié, et pourquoi elles le sont. En effet, ces méthodes font le plus souvent appel à des descripteurs [Alexandre, 2012], qui extraient des particularités de l'objet, ce qui tend à caler l'objet sur

un modèle global, et donc peut ne pas tenir compte de sous-parties discriminantes.

Un certain nombre de conditions pour une nouvelle méthode se posent alors, avec notamment, pour ne citer que les plus importantes :

- comment représenter les phénomènes locaux que l'on souhaite détecter ?
- comment classifier les objets 3D ?
- comment tenir compte des sous-parties comme attributs essentiels ?
- comment permettre à l'utilisateur de comprendre le choix du classifieur ?

L'avantage évident de la méthode des shapelets appliquée aux séries temporelles est qu'il est possible de comparer des éléments de tailles très variées sans connaissance *a priori* sur ces derniers. Ce ne sont plus les éléments dans leur globalité qui peuvent être utiles, mais la juxtaposition de quelques-unes des sous-parties de ce dernier, sous-parties pertinentes possédant des caractéristiques différentes, qui, ensemble, permettent de déduire les classes d'appartenance.

L'idée maîtresse est de chercher à adopter une méthode, efficace pour les séries temporelles, à un autre type de données que sont les objets 3D constitués de maillages triangulaires de points. En utilisant des descripteur locaux [Alexandre, 2012] [Dang, 2014] et des mesures de distances de répartition [Kullback and Leibler, 1951] [Matusita, 1955], les résultats s'avèrent supérieurs à l'état de l'art, et permettent en plus une visualisation des extraits les plus pertinents utilisés lors de cette classification.

Le but est de classifier les formes selon la présence ou non d'angles, le processus est représenté sur la Figure 3, et se décompose comme suit :

1. on extrait aléatoirement des sous-parties ;
2. on les trie par pertinence ;
3. on utilise les plus discriminantes pour classer de nouveaux objets.

De la méthode de [Ye and Keogh, 2009], on adapte la technique des shapelets appliquée aux séries temporelles combinée à l'approche de [Renard et al., 2015] dans laquelle la sélection aléatoire de sous-parties potentiellement discriminantes est effectuée (sélectionner, pour ces tests, l'ensemble des candidats possibles devient bien trop long en termes de temps de calcul).

Dans l'algorithme 1, nommé 3DRESC pour *3D Random Extraction of Sub-parts for Classification*, on a :

- *Extraction(objet, tailles, nombres)* qui extrait d'un objet 3D un certain nombre de sous-parties de tailles prédéfinies ;
- *CalculDescripteur(sous – surface)* qui calcule le descripteur pour chaque point de la sous-surface ;

---

**Algorithme 1 : 3DRESC [Meunier et al., 2017]**

---

```
1 Entrées :  
2 Objets : objets 3D; Classes : classes correspondantes;  
   k : nombre d'attributs souhaité; tailles : tailles des  
   extraits; nombres : nombre d'extraits pour chaque taille  
   ;  
3 Sorties :  
4 SousParties : Liste de sous-parties discriminantes  
   d'objets 3D ;  
5 Début  
6  $i \leftarrow 0$ ;  
7 pour Objet dans Objets faire  
8    $i \leftarrow i + 1$ ;  
9    $j \leftarrow 0$ ;  
10  candidats  $\leftarrow$   
    Extraction(Objet, tailles, nombres);  
11  pour candidat dans candidats faire  
12     $j \leftarrow j + 1$ ;  
13    DescObjet3D[ $i$ ][ $j$ ]  $\leftarrow$   
    CalculDescripteur(candidat);  
14  fin  
15 fin  
16  $obj1 \leftarrow 0$ ;  
17 pour Objet1 dans Objets faire  
18    $obj1 \leftarrow obj1 + 1$ ;  
19    $obj2 \leftarrow 0$ ;  
20   pour Objet2 dans Objets faire  
21      $obj2 \leftarrow obj2 + 1$ ;  
22     si Objet1 différent de Objet2 alors  
23       Distances  $\leftarrow$   $\min(\text{CalculDistances}(\text{DescObjet3D}[obj1], \text{DescObjet3D}[obj2]))$ ;  
24       Gains  $\leftarrow$   
        CalculGains(Distances, Classes);  
25       ListeGain[ $i$ ]  $\leftarrow$   $\max(\text{Gains})$ ;  
26     fin  
27 fin  
28 ListeGain  $\leftarrow$  Ordonner(ListeGain);  
29 SousParties  $\leftarrow$  ListeGain[1, ...,  $k$ ];  
30 Fin
```

---

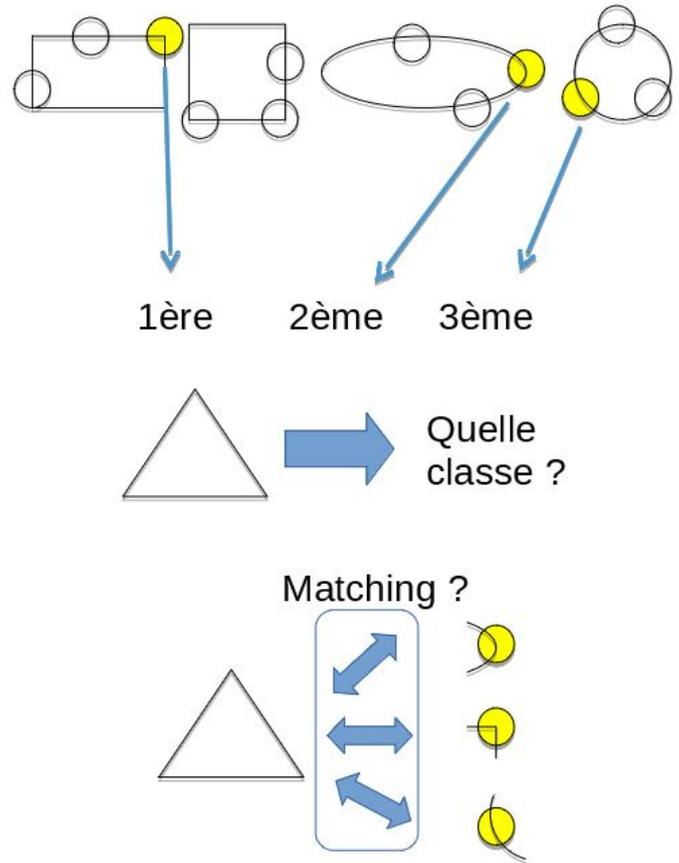


FIGURE 3 – Classification des formes

- *CalculDistances(Desc1, Desc2)* qui calcule, à partir de deux descripteurs de 2 objets, la similitude de leurs histogrammes de répartition de valeurs.
- *CalculGains(distances, classes)* qui calcule par la formule *f-stat* le gain d'information de l'attribut (créé par une sous-surface particulière) correspondant pour la classification souhaitée.

En présence de données en quantité suffisante, cette méthode s'est avérée utile aux géologues, que ce soit pour la classification en elle-même que pour la compréhension des zones choisies car pertinentes. Les performances des techniques de l'état de l'art ont bien été surpassées, et l'interprétabilité par la visualisation de données pertinentes a permis de plus facilement intégrer la méthode à la chaîne de traitement existante en géosciences.

### 3 L'apprentissage par transfert

Une hypothèse des méthodes traditionnelles d'apprentissage automatique est que les données d'apprentissage et les données de test sont issues du même domaine, de sorte que l'espace des attributs en entrée et la distribution des données sont les mêmes. Cependant, dans beaucoup de scénarios d'apprentissage supervisé, cette hypothèse ne

tient pas.

Il est donc nécessaire de créer des méthodes d'apprentissage performantes formées à partir de données plus facilement récupérables, voir simplement les seules disponibles. Ce concept est appelé apprentissage par transfert, ou *transfer learning* [Dai et al., 2007] [Lu et al., 2015], et est illustré par la Figure 4.

Pour un domaine d'apprentissage particulier, si l'on considère les notations de [Pan and Yang, 2010], alors :

- $D = \{\chi, P(X)\}$ , avec  $\chi$  l'espace d'attributs et  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \in \chi$ ;
- $T = \{\Upsilon, f(\cdot)\}$  avec  $\Upsilon$  un espace de *labels*, et  $f(\cdot)$  une fonction de prédiction.

Nous pouvons par ailleurs décomposer l'apprentissage par transfert en deux ensembles, que sont, selon [Weiss et al., 2016] :

1. Si  $X_S = X_T$  alors il est défini comme un apprentissage par transfert homogène. La majorité des solutions d'apprentissage par transfert homogène utilisent l'une des trois principales stratégies qui consistent à corriger, entre les données source et cible, la différence de distribution marginale, la différence de distribution conditionnelle, ou à la fois les différences de distribution marginale et conditionnelle.
2. Sinon, on parle d'apprentissage par transfert hétérogène. La majorité des solutions d'apprentissage par transfert hétérogènes sont axées sur l'alignement des espaces d'entrée des domaines source et cible, avec comme hypothèse que les distributions de domaines restent les mêmes.

Dans notre domaine, et dans ces deux cas, la principale façon de procéder reste l'extraction d'un modèle de cartographie des éléments ou des distributions d'un ou plusieurs domaines (appelé(s) domaine(s) source(s)) vers un autre (appelé domaine cible). Ce faisant, nous perdons notre capacité initiale qui consistait à pouvoir visualiser les raisons qui ont amené notre algorithme à donner un résultat particulier.

## 4 L'adaptation de la méthode initiale à un contexte de transfert de connaissances

### 4.1 Description de l'approche

Supposons que l'on dispose d'un domaine source unique avec beaucoup d'exemples d'apprentissage (en fait une tâche de classification réalisée sur des données particulières), et un domaine cible avec seulement quelques données déjà annotées (dans notre cas, environ 25% du nombre total des objets dans le domaine cible). Ce cas d'étude est illustré sur la Figure 4.1. En utilisant la méthode

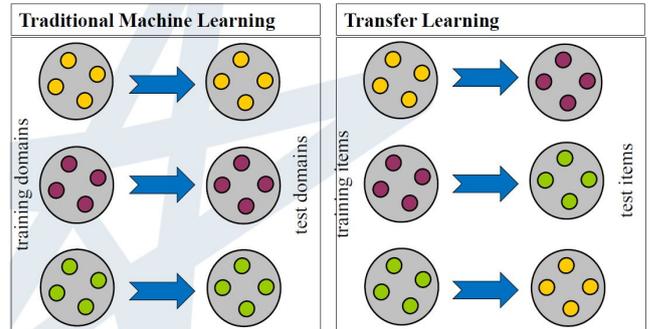


FIGURE 4 – Une définition intuitive du transfer learning - [Pan and Yang, 2010]

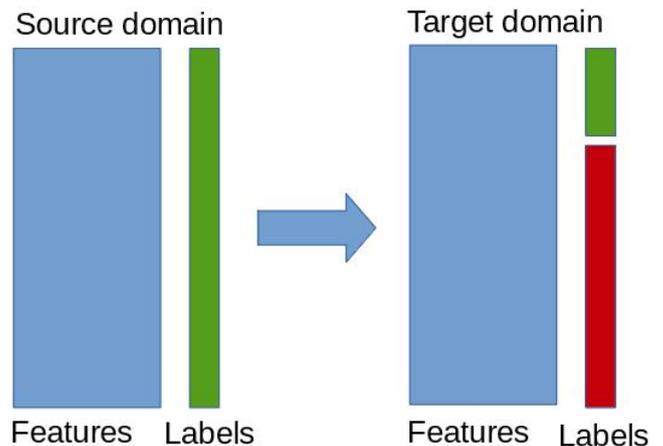


FIGURE 5 – Notre problème d'apprentissage par transfert : en vert, les éléments labellisés, et en rouge ceux qui ne le sont pas

précédemment proposée par [Meunier et al., 2017], nous n'apprenons que sur les quelques exemples disponibles du domaine cible et prédisons le reste. Cependant, avec le transfert de connaissances, le domaine source devient précieux, car il permettrait de sélectionner également les sous-parties qui peuvent rester pertinentes en passant du domaine source vers le domaine cible et de les ajouter aux sous-parties déjà sélectionnées grâce la méthode précédente (donc exclusivement issues du domaine cible). C'est la raison pour laquelle il est proposé de transférer simplement certaines des sous-parties les plus pertinentes extraites d'un domaine vers un autre, après avoir vérifié que la pertinence de cette sous-partie dans le domaine cible est bonne. Ces sous-parties transférées restent les constructeurs d'attributs sur lesquels l'apprentissage est réalisé.

Le processus se déroule comme suit :

1. tout d'abord, la méthode classique de sélection des sous-parties pertinentes dans le domaine cible est réalisée ;
2. parallèlement, la même chose est faite pour le domaine source ;
3. ensuite, les sous-parties pertinentes du domaine source sont testées au sein du domaine cible afin d'évaluer leur capacité à y être réutilisées ;
4. enfin, les sous-parties de l'extraction originale du domaine cible et les sous-parties choisies dans le domaine source sont toutes deux utilisées pour classer l'ensemble de données du le domaine cible.

Soient  $O_1, \dots, O_n$  l'ensemble des objets labellisés qui constituent notre base d'apprentissage :

- $\forall O_{i=1, \dots, n}$ , on extrait aléatoirement  $m$  sous-surfaces (pour chaque objet  $O_i$ ) que sont  $S_{i,1}, \dots, S_{i,m}$ .
- On considère un descripteur d'objet 3D particulier  $Desc$ , et une distance  $Dist$  (qui peut être une distance entre répartition de valeurs, pour le cas des descripteurs d'objets).  $\forall i \in (1, \dots, n)$  et  $\forall j \in (1, \dots, m)$ , on calcule le descripteur  $Desc(S_{i,j})$  de la sous-surface  $S_{i,j}$ .

Puis, pour chaque sous-surface  $S_{i,j}$  à évaluer :

- $\forall i' \in (1, \dots, n) \setminus i$  et  $\forall j' \in (1, \dots, m)$ , on calcule la proximité définie comme

$$Prox(S_{i,j}, S_{i',j'}) = Dist(Desc(S_{i,j}), Desc(S_{i',j'}))$$

- Les degrés correspondant à ses valeurs d'imbrication dans chacun des objets  $O_1, \dots, O_n$  valent :  $\forall i' \in (1, \dots, n)$ ,

$$Degré(s_{i,j}, O_{i'}) = \inf_{l=1, \dots, m} (Prox(S_{i,j}, S_{i',l}))$$

Ce degré de matchage ou d'appartenance d'une sous-surface à un objet permet d'établir une forme de proximité entre la sous-surface étudiée et chaque objet. C'est à partir de ces valeurs que le score de pertinence de chacune des sous-surfaces est évalué, afin de ne sélectionner que les plus discriminantes.

Ce score, proposé la première fois par [Lines et al., 2012], et dont la pertinence pour le domaine étudié a été confirmée par [Meunier et al., 2017], est la mesure de  $f-stat$  :

$$f-stat = \frac{\frac{1}{C-1} \sum_{i=1}^C (\bar{D}_i - \bar{D})^2}{\frac{1}{n-C} \sum_{i=1}^C \sum_{d_j \in D_i} (d_j - \bar{D}_i)^2} \quad (1)$$

avec  $C > 1$  le nombre de classes,  $n$  le nombre de sous-parties ( $n > C$ ),  $\bar{D}_i$  la moyenne des degrés entre les surfaces de classe  $i$  et la sous-partie concernée, et  $\bar{D}$  la moyenne des degrés entre la sous-partie et les objets 3D.

Par la suite, les  $k$  premiers candidats selon ce critère sont utilisés pour le calcul des attributs,  $k$  est défini expérimentalement en moyenne à environ 0.1% du nombre total d'extraits.

Dans notre cas, pour le domaine source, tous les extraits ne seront pas conservés tels quels pour la construction d'attributs, il est en effet d'abord nécessaire de les tester pour s'assurer de leur pertinence. La valeur  $f-stat$  calculée pour chaque sous-surface du domaine source au sein du domaine cible doit être au minimum du même ordre de grandeur que les extraits du domaine cible qui ont été sélectionnés.

Pour chaque extrait dont le test est positif, ce dernier est ajouté au domaine cible (avec ses propres extraits), et le transfert se base donc sur l'extrait constructeur d'attribut, et non pas l'attribut lui-même.

Soit  $O_S$  l'ensemble des sous-parties sélectionnées au sein du domaine source,  $O_C$  ceux du domaine cible, et  $Transfert_{Extrait}$  une fonction de seuil qui prend comme arguments une sous-surface extraite et un domaine possédant une classification. La fonction renvoie une réponse positive si l'extrait a une pertinence (fonction  $f-stat$ ) supérieure au seuil choisi, et est donc ajouté (transféré) aux extraits  $O_C$ , et sera ignoré sinon.

Avec, dans l'algorithme 2 :

- $CapacitSeparation$ , fonction qui calcule le score d'une sous-partie selon le test  $f-stat$  ;
- $Seuil_{TF}$ , le seuil défini empiriquement comme étant le minimum de pertinence de sous-parties sélectionnées de l'ensemble d'entraînement, et la capacité de séparation utilisée reste la même que dans l'algorithme d'origine, c'est-à-dire le  $f-stat$ .

---

**Algorithme 2** : Transfert d’extraits pertinents

---

```
1 Entrées :  
2  $Objets_{Source}$  : objets 3D du domaine source ;  
    $Objets_{Cible}$  : objets 3D du domaine cible ;  
    $SousParties$  : sous-parties issues du domaine source ;  
    $Classes$  : classes correspondantes pour chaque objet ;  
    $Seuil_{TF}$  : limite arbitraire de pertinence pour le transfert  
   des sous-parties du domaine source ;  
3 Output :  
4  $SousPartiesPertinentes$  : Liste de sous-parties  
   pertinentes d’objets 3D utilisable pour le transfert  
   learning, donc venant du domaine source ;  
5 Début  
6  $SousPartiesPertinentes_{Transferees} \leftarrow 0$ ;  
7 pour  $SousPartie \in SousParties$  faire  
8   |  $Pertinence \leftarrow$   
   |    $CapacitSeparation(SousPartie, Classes, Objets_{Cible})$ ;  
9   | si  $Pertinence \geq Seuil_{TF}$  alors  
10  | |  $SousPartiesPertinentes_{Transferees} \leftarrow$   
   | |  $SousPartiesPertinentes \cup SousPartie$ ;  
11 fin  
12 Fin
```

---

Les sous-parties finalement utilisées pour la construction des attributs sont l’union de celles issues du domaine cible et celles sélectionnées au sein du domaine source qui sont aussi pertinentes dans le domaine cible, à savoir :

$$SousParties_{Cible} \cup SousPartiesPertinentes_{Transferees}$$

De cette manière, nous obtenons des résultats qui comparent les approches en termes de performances. Ils ont été rassemblés à partir de tests multiples en utilisant la sélection aléatoire des objets, les seules contraintes étaient d’avoir deux classes dans chaque domaine.

L’algorithme global correspondant est *3DRESC-TF*, pour *3D Random Extraction of Sub-parts for Classification with Transfer Learning*.

## 4.2 Expérimentations

*3DRESC-TF* est testé avec des données libres du *Princeton Shape Benchmark*<sup>1</sup> (PSB), dont les données proviennent de multiples ensembles d’objets 3D déjà existants. Ces derniers sont ceux qui, en termes de formats et de types, se rapprochent le plus des géo-modèles 3D dont nous disposons en entreprise. Les classes les plus fines sont retenues (3 niveaux étant possibles), afin de rajouter encore davantage de contraintes et de difficultés à la prédiction lors des tests.

Le classifieur utilisé une fois les attributs récupérés est celui des forêts aléatoires du package Python *scikit-learn*. Les tests sont effectués sur un processeur *Intel Core i7 vPro* avec 16 Go de RAM.

1. <http://shape.cs.princeton.edu/benchmark/> consulté le 05/02/2017

Ainsi, nous réutilisons la connaissance de plusieurs domaines disponibles et pertinents dans le but d’améliorer notre prédiction. Dans le cas de domaines très différents, ce transfert d’apprentissage pourrait faire face à un léger apprentissage dit négatif (baisse de la performance en raison d’informations transmises mais non pertinentes, voir nuisibles), et donc devrait logiquement rester inutilisées, ce qui reviendrait à n’employer que l’algorithme d’origine.

Face au potentiel déséquilibre de classe au sein de ces nouvelles expériences, nous choisissons d’utiliser la *AUC* (aire sous la courbe ROC - *Receiver Operating Characteristic*) pour évaluer les performances du modèle.

La première chose à souligner, et qui s’avère intuitive, est le fait que plus le nombre d’éléments dans le domaine cible est faible, plus notre méthode d’apprentissage par transfert sera bénéfique vis-à-vis du processus d’apprentissage classique. En effet, moins d’exemples signifie un apprentissage plus difficile, et donc l’intérêt pour le transfert des connaissances venant d’autres domaines augmente fortement. Nous gardons néanmoins l’avantage de la méthode originale qui est d’être en mesure d’apprendre sur un jeu de données restreint.

Cependant, on peut mentionner le fait qu’en ajoutant simplement de nouvelles fonctionnalités du domaine source, on améliorerait statistiquement la performance si on utilise un bon algorithme de classification (forêts aléatoires, par exemple).

Pour supprimer ce possible biais dans nos résultats et pouvoir observer le seul impact de notre proposition d’apprentissage de transfert, nous avons tout simplement décidé de comparer notre méthode d’apprentissage mécanique classique en utilisant les 200 extraits par objet plus le nombre de sous-parties transférées possibles dans l’apprentissage par transfert, avec l’approche d’apprentissage par transfert elle-même. Ainsi, les résultats de la Table 1 confirment que cet algorithme d’apprentissage par transfert améliore clairement la manière classique de calculer notre méthode.

Ensuite, et toujours en essayant de donner à l’utilisateur une explication des résultats donnés, nous proposons de faire une visualisation d’une tâche d’apprentissage par transfert particulière.

A partir de deux classifications d’avions représentés sous forme de maillages 3D, la première étant le domaine source et la seconde le cible, nous donnons le nombre d’éléments utilisés comme apprentissage dans le domaine cible et montrons les sous-parties les plus pertinentes (transférées et du domaine cible).

La première classification, c’est-à-dire le domaine source, vise à séparer le biplan des avions commerciaux, tandis que la seconde différencie les chasseurs des planeurs.

En utilisant ces deux domaines pour la visualisation, nous obtenons finalement les sous-parties suivantes comme les plus pertinentes extraites du domaine source et réutilisées

TABLE 1 – Classification en fonction du nombre d’objets pour les domaines cible et source

Nombre d’objets du domaine source	Nombre d’objets du domaine cible	Sans apprentissage par transfert	Avec apprentissage par transfert
60	40	$0.616 \pm 0.037$	$0.642 \pm 0.034$
	30	$0.581 \pm 0.049$	$0.617 \pm 0.047$
	20	$0.545 \pm 0.055$	$0.583 \pm 0.065$
80	40	$0.611 \pm 0.035$	$0.666 \pm 0.036$
	30	$0.580 \pm 0.041$	$0.625 \pm 0.041$
	20	$0.548 \pm 0.054$	$0.601 \pm 0.060$
100	40	$0.616 \pm 0.032$	$0.640 \pm 0.034$
	30	$0.579 \pm 0.045$	$0.615 \pm 0.048$
	20	$0.544 \pm 0.058$	$0.581 \pm 0.069$

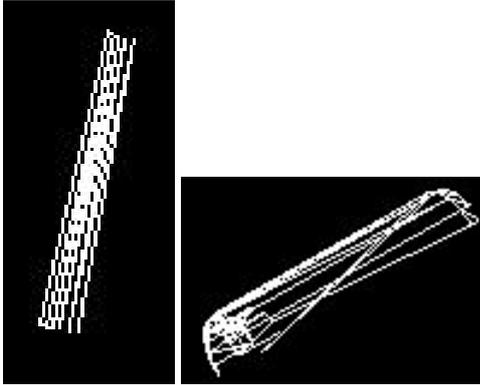


FIGURE 6 – A gauche, l’aile d’un planeur et à droite, le cockpit d’un biplan

au sein de la cible.

Dans un cas particulier, à partir des formes d’un planeur et d’un biplan, les sous-parties récupérées pour le transfert car pertinentes sont données dans la Figure 6.

Nous remarquons que la première sous-partie représente des ailes très minces, et il est logique de la transférer, car ces ailes très particulières sont caractéristiques d’un planeur (longues et minces), et si on les compare à un chasseur à réaction, permettent d’améliorer la classification en utilisant ce critère.

Le second est un peu plus centré sur le corps de l’avion. On peut aisément reconnaître un cockpit de biplan, qui apporte une connaissance sur les moyens utilisés par le classifieur pour reconnaître la classe d’appartenance.

Testée sur des données réelles de Total, la méthode a encore besoin, pour être validée, de voir son intérêt confirmé par le métier, que la mise en pré-production devrait permettre d’ici peu.

## 5 Conclusions et perspectives

Dans cet article, nous avons proposé un nouvel algorithme, appelé 3DRESC-TF, qui vient compléter de précédents tra-

vaux sur la classification d’objets 3D. Afin de faire face à un manque de données d’apprentissage, cette adaptation vise à transférer de la connaissance issue d’autres apprentissages, dans le but d’améliorer le taux de classification. Proposant des performances supérieures aux méthodes de l’état de l’art, nous valorisons de cette manière les apprentissages réalisés par le passé, afin, d’une part, d’améliorer la classification en cours, et d’autre part de pouvoir faire face à des données différentes de celles utilisées pour l’apprentissage.

Néanmoins, les sous-parties extraites et récupérées pour la visualisation ne sont à l’heure actuelle pas beaucoup plus interprétables avec cette méthode que celles obtenues par la méthode d’origine, et la pertinence d’une utilisation systématique de cette nouvelle fonctionnalité devra être, à l’avenir, étudiée pour le cas d’application concrète qui est le notre à Total.

## Références

- [Alexandre, 2012] Alexandre, L. A. (2012). 3D Descriptors for Object and Category Recognition : a Comparative Evaluation. In *Workshop on Color-Depth Camera Fusion in Robotics at the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Vilamoura, Portugal.
- [Dai et al., 2007] Dai, W., Yang, Q., Xue, G.-R., and Yu, Y. (2007). Boosting for transfer learning. In *Proceedings of the 24th International Conference on Machine Learning, ICML ’07*, pages 193–200, New York, NY, USA. ACM.
- [Dang, 2014] Dang, Q. V. (2014). *Similarités dans des modèles BRep paramétriques : detection et applications*. PhD thesis, Université de Toulouse.
- [Kullback and Leibler, 1951] Kullback, S. and Leibler, R. A. (1951). On information and sufficiency. *The Annals of Mathematical Statistics*, 22(1) :79–86.
- [Lines et al., 2012] Lines, J., Davis, L. M., Hills, J., and Bagnall, A. (2012). *A Shapelet Transform for Time Series Classification*. KDD ’12. ACM, New York, NY, USA.

- [Lu et al., 2015] Lu, J., Behbood, V., Hao, P., Zuo, H., Xue, S., and Zhang, G. (2015). Transfer learning using computational intelligence : A survey. *Knowledge-Based Systems*, 80 :14 – 23. 25th anniversary of Knowledge-Based Systems.
- [Matusita, 1955] Matusita, K. (1955). Decision rules, based on the distance, for problems of fit, two samples, and estimation. *Annals of Mathematical Statistics*, 26(4) :631–640.
- [Meunier et al., 2017] Meunier, F., Marsala, C., Castanié, L., and Conche, B. (2017). Classification d’objets 3d par extraction aléatoire de sous-parties discriminantes pour l’étude du sous-sol en prospection pétrolière. In *Extraction et Gestion des Connaissances*, pages 225–236.
- [Pan and Yang, 2010] Pan, S. J. and Yang, Q. (2010). A survey on transfer learning. *IEEE Trans. on Knowl. and Data Eng.*, 22(10) :1345–1359.
- [Refregier, 2001] Refregier, A. (2001). Shapelets : I. a method for image analysis. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 338 :35.
- [Renard et al., 2015] Renard, X., Rifqi, M., and Detyniecki, M. (2015). Random-shapelet : an algorithm for fast shapelet discovery. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Data Science and Advanced Analytics (DSAA’2015)*, pages 1–10.
- [Weiss et al., 2016] Weiss, K., Khoshgoftaar, T. M., and Wang, D. (2016). A survey of transfer learning. *Journal of Big Data*, 3(1) :9.
- [Ye and Keogh, 2009] Ye, L. and Keogh, E. (2009). Time Series Shapelets : A New Primitive for Data Mining. In *Proceedings of the 15th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, KDD ’09*, pages 947–956, New York, NY, USA. ACM.

# Approche paramétrique de bandits pour le test A/B

Emmanuelle Claeys<sup>1\*</sup> Pierre Gançarski<sup>1</sup> Myriam Maumy-Bertrand<sup>2</sup> Hubert Wassner<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ICube – Université de Strasbourg – 67412 Illkirch – France

<sup>2</sup> IRMA – Université de Strasbourg – 67084 Strasbourg – France

<sup>3</sup> Entreprise AB Tasty – 3 Impasse de la Planchette – 75003 Paris – France

## Résumé

*Cet article propose une méthode pour optimiser l'approche de bandits en utilisant un arbre décisionnel dans le contexte du test A/B. Il rappelle les problématiques que le test A/B rencontre et propose d'anticiper le comportement d'un profil de visiteurs, afin d'orienter la stratégie (proposer la meilleure variation au visiteur) du test selon ce comportement.*

## Mots clés

Méthodes de bandits, personnalisation, clustering temporel, test A/B, allocation dynamique.

## Abstract

*This paper proposes a new architectural model for A/B testing evaluation in multiple contexts. It exposes the global problematic of A/B testing when we want to manage several types of e-commerces. The goal of this paper is to provide a methode for optimize bandits approach using a decision tree.*

## Keywords

Bandit approach, personalization, time series clustering, A/B testing, exploration/exploitation dilemma.

## 1 Introduction

Pour un *e-commerçant*, c'est-à-dire un commerçant dont l'activité commerciale dépend du WEB, la qualité du site (ergonomie, iconographies, guide et parcours) est primordiale. Modifier celui-ci afin de le rendre plus efficace est donc tout aussi crucial. Néanmoins, toute modification n'est pas bonne à prendre car elle peut dégrader le site et donc impacter l'activité du *e-commerçant*. Il n'est donc pas envisageable pour le *e-commerçant* de mettre en ligne un changement sur son site sans en avoir au préalable tester la pertinence. Pour cela, de plus en plus d'entreprises utilisent des outils d'analyse pour le web marketing, comme, par exemple, les plate-forme de test A/B. Un test A/B (ou A/B testing<sup>1</sup>), consiste à créer plusieurs versions d'un

même objet, dans le but de vérifier une hypothèse marketing [1]. Par exemple, il s'agit de tester auprès d'un échantillon d'internautes, nommés *visiteurs*, durant une période donnée, différentes variations (généralement deux) d'une même page web (nommées variation A et variation B) proposée par un *e-commerçant*. Le but est d'identifier celle qui donne les meilleurs résultats par rapport à un objectif fixé en amont du test (comme par exemple l'augmentation du taux de *conversion*, le nombre de visites ou de clics sur une bannière ou encore la valeur moyenne du panier, etc.). Le test peut alors être évalué sur l'ensemble des visiteurs de la page ou uniquement sur un échantillon de visiteurs ayant une caractéristique spécifique (par exemple les visiteurs parisiens). À l'issue du test, le *e-commerçant* pourra soit conserver A, soit conserver B, soit, dans une optique de personnalisation, présenter la variation A ou B à des visiteurs en fonction de caractéristiques spécifiques, comme par exemple la géo-localisation.

Derrière cette problématique de marketing, se cachent des verrous scientifiques importants, à cause de la contrainte suivante : lors d'un test A/B, un visiteur est affecté à une variation (en général de façon équiprobable) à sa première venue sur la page, celle-ci lui est affectée jusqu'à la fin du test ainsi que pour toutes ses futures visites. De fait, une caractéristique importante des tests A/B est qu'un visiteur ne voit qu'une seule des deux variations et que de ce fait, l'ensemble des visiteurs qui ont vu la variation A est totalement disjoint de celui des visiteurs ayant vu la variation B. De par cette contrainte, il devient difficile résoudre la problématique par des algorithmes de recommandation classiques qui permettent de réitérer la proposition d'une variation à un visiteur [2].

Du fait de cette irrévocabilité de la décision d'affectation, la question sous-jacente est alors de savoir comment déterminer ce qu'aurait fait un visiteur sur une variation sachant ce qu'il a fait sur l'autre. Enfin, d'autres caractéristiques peuvent intervenir dans l'analyse du test : on ne peut pas, en général déterminer lorsqu'un visiteur ne fait pas de conversion, si cela est dû à la variation présentée ou simplement à l'absence de volonté a priori du visiteur de faire cette conversion (simple visite d'informations sur des offres du site par exemple) ; le nombre de conversions peut être très

\*claeys@unistra.fr

1. Le terme A/B étant un terme générique pour qualifier tout type de tests.

largement inférieur au nombre de non-conversions ; le délai entre la conversion et la visite de la page peut être plus ou moins long, etc.

Enfin, les tests statistiques existants [3] pour répondre à ces questions, se heurtent au problème de la *politique d'allocation dynamique*. En effet, l'identification de la meilleure variation et la caractérisation d'un ou plusieurs segments de visiteurs sont importantes pour le e-commerçant, mais sa priorité principale est avant tout de tirer des bénéfices de son site. Si l'une des variations a des conséquences désastreuses, il souhaitera limiter la phase d'*exploration* (c'est-à-dire de test) au profit de la phase d'*exploitation* de la meilleure variation courante : la politique d'allocation changera au fil de temps pour affecter prioritairement les nouveaux visiteurs sur la variation la plus rentable. C'est pour répondre à ce compromis d'exploration-exploitation que les méthodes dites « de bandits » sont très utilisées (cf. Section 2.2)

**Notre méthode.** Pour répondre à l'ensemble de ces problématiques, nous proposons une méthode combinant une *étape de pré-analyse* (hors-ligne) dans laquelle nous identifions des segments de visiteurs à partir de leurs profils temporels et de leurs centres d'intérêt liés à leurs comportements lors de leur(s) visite(s) suivie d'une *étape d'observation* (en-ligne) correspondant au test proprement dit, durant laquelle nous observons si des segments présentent des taux de conversions différents. Pour cela, pour chaque segment de visiteurs (identifié dans l'étape de pré-analyse), nous utilisons un algorithme de comparaison de variations (méthode de bandit, cf. Section 2.2) de façon totalement indépendante. Ainsi, nous proposons :

- d'identifier des segments des visiteurs en fonction de leur profils temporels et de leurs centres d'intérêts à l'aide de techniques de clustering temporel ;
- d'effectuer les comparaisons, lors de la phase d'analyse, par segment et non uniquement globalement ;
- de limiter les pertes d'exploitation dues à l'expérience en modifiant la politique d'allocation pour chacun de ces segments (donc localement et non plus globalement) en fonction de la convergence plus ou moins rapide du test vers la version optimale pour le segment (si elle existe).

## 2 Mise en œuvre de l'approche

### 2.1 Étape 1 : pré-analyse

Cette étape consiste à analyser les visiteurs pendant une période pré-définie (généralement une à deux fois la durée prévue pour le test lui-même) afin d'extraire et de caractériser des segments de visiteurs suivant leurs profils temporels et leurs centres d'intérêt.

**Profils temporels.** À l'issue de la phase de pré-analyse, à chaque visiteur est associé deux vecteurs, de taille égale à la durée de la pré-analyse. Le premier vecteur  $V_{presence}$  indique la visite ou non pour chaque intervalle de temps

(en général chaque jour) :  $V_{presence}[i] = 1$  si un visiteur a visité la page à la  $i$ -ème date, 0 sinon. Le second vecteur  $V_{pages}$  donne le nombre de pages consultées à chaque période par ce visiteur.

**Prise en compte des centres d'intérêt.** Afin de mieux caractériser les visiteurs, nous avons affecté à chacun d'eux un ensemble de centre d'intérêts en fonction des pages qu'il a traversées avant d'arriver à la page testée. Pour cela nous procédons en deux étapes : (1) recherche des différents mots clés présents pour les pages parcourues par l'ensemble des visiteurs et association à chaque page parcourue d'un ou plusieurs *sujets d'intérêt* (topics) construits à partir de ces mots clés et (2) affectation à chaque visiteur de l'ensemble des sujets associés aux pages qu'il a personnellement parcourues. À noter, qu'un topic peut être associé à plusieurs pages. Cette association a été réalisée grâce à une méthode de *topic modeling* via l'allocation de Dirichlet latente [6]. Le *topic modeling* est une méthode en traitement automatique du langage naturel permettant de modéliser des relations entre différents sujets. L'allocation de Dirichlet latente est basée sur une combinaison de modèles statistiques bayésiens, pour des données discrètes où les sujets ne sont pas corrélés. Le topic modeling est une extension du modèle allocation de Dirichlet latente (L.D.A) lorsque les mots des documents sont corrélés entre les sujets. Nous avons choisi cette méthode pour son utilisation populaire et la facilité de sa mise en œuvre. L.D.A. utilise un nombre de sujets fixé  $k$  et travaille itérativement sur chaque document  $w = (w_1, w_2, \dots, w_N)$  d'un corpus  $D$  contenant  $N$  mots d'un vocabulaire composé de  $V$  termes différents  $w_i \in 1, \dots, V$  pour  $i = 1, \dots, N$ .

**Construction des clusters de visiteurs.** Pour construire les clusters de visiteurs (qui seront utilisés pour définir nos segments) nous utilisons les deux vecteurs identifiés précédemment. Ces vecteurs peuvent-être vus comme des séries temporelles, allouées à chaque visiteur. De nombreuses méthodes existent pour réaliser des clusters de séries temporelles. L'approche que nous avons retenue est celle basée sur la métrique D.T.W. (Dynamic Time Warping) car celle-ci présente un certain nombre d'avantages [4] tels que :

- toutes les données sont utilisées ;
- l'alignement des séquences obtenu est optimal ;
- la possibilité d'extraire des comportements décalés ;
- supporte un échantillonnage irrégulier ;
- permet de comparer des séquences de longueurs différentes.

Par contre, elle s'avère assez sensible aux valeurs extrêmes et au bruit.

Nous avons donc choisi l'algorithme de partitionnement (clustering) K-means pour sa simplicité d'utilisation et son efficacité. Néanmoins, en plus d'une mesure de (dis)similarité, celui-ci nécessite un mécanisme de calcul des centres des clusters. Pour cela, nous utilisons la méthode D.B.A. (D.T.W. Barycenter Averaging) [4] sous le langage R [5], qui est une méthode itérative de calcul d'une

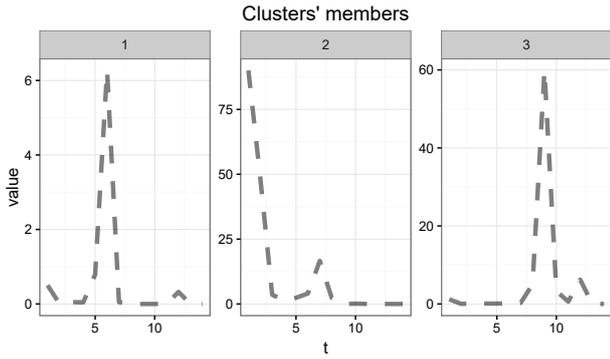


FIGURE 1 – Centres de trois clusters présentant trois évolutions du nombre de pages consultées.

moyenne. La figure 1 montre un exemple de centres pour trois clusters obtenus à partir de pages parcourues à chaque visite par les différents visiteurs et ce sur une période d’observation de 15 jours.

**Recherche de régularités dans les profils de visiteurs.** L’objectif de cette étape est de voir si certains (sous)segments de visiteurs répondent plus facilement à l’objectif de conversion.

Nous avons choisi d’utiliser un arbre de régression non paramétrique (algorithme CTREE) [8] consistant à étudier tous les profils avec une différence statistiquement significative dans le taux de conversions (test du khi-deux de Pearson, avec un niveau de seuil de confiance fixé à 95 %). Dans notre cas, cet arbre sera utilisé pour identifier les facteurs pronostiques, c’est-à-dire le lien entre les clusters et les topics construits précédemment et les différents taux de conversions.

Un tel arbre se construit de manière itérative en divisant, à chaque étape, la population en deux sous-ensembles. Pour diviser cette population, l’algorithme utilise des tests de permutation [9]. Des procédures d’essais multiples sont appliquées pour déterminer l’association significative entre les variables, via une approche récursive [7].

Pour identifier des variables explicatives discriminantes, l’arbre utilise des procédures de test spéciales comme le test de Spearman, le test de Wilcoxon-Mann-Whitney ou le test de Kruskal-Wallis ainsi que des tests de permutation basés sur des statistiques d’ANOVA ou des coefficients de corrélation. Dans notre expérimentation, pour choisir le test approprié pour vérifier le rapport de différence, nous utilisons une méthode multiple de correction de Bonferroni associée à une méthode de Monte Carlo et à un test de Kruskal-Wallis.

Ceci conclut une pré-analyse, la figure 2 présente un exemple d’arbre obtenu sur un jeu de tests *train\_set*.

## 2.2 Étape 2 : Observation

Remarque : Pour affecter un nouveau visiteur lors de l’étape d’observation (donc du test), nous considérons son

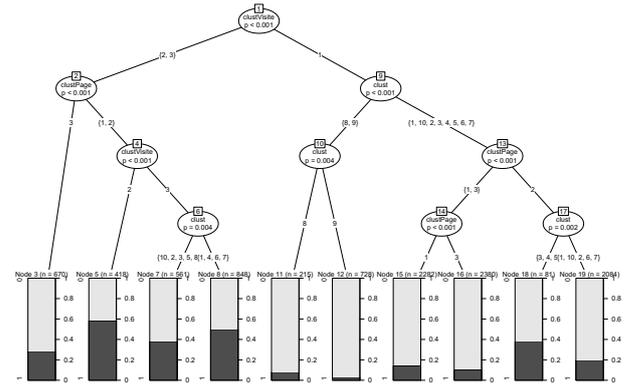


FIGURE 2 – Arbre de régression de *train\_set*

parcours depuis sa première arrivée sur le site (sachant qu’il n’a pas encore vu la page test) et nous l’affectons au cluster le plus proche (nous procédons simplement par comparaison du parcours du visiteur aux centres des clusters en utilisant D.T.W.).

Dans la littérature, il existe de nombreuses méthodes pour comparer un test sur deux échantillons, mais elles supposent que les échantillons soient choisis aléatoirement à partir d’une population homogène [3]. Ces méthodes sont capables de gérer de larges volumes de données, avec une distribution paramétrique ou non. Néanmoins, dans le cas du marketing, l’observation d’une variable (par exemple l’achat d’un produit), peut varier selon les différentes populations, cela pouvant être dû aux fluctuations de l’échantillonnage ou au contraire cela révèle des comportements différents selon les catégories. De fait, ces méthodes sont difficiles à utiliser dans le cas des tests *A/B* :

- elles n’expliquent pas pour quel profil la variation *A* ou *B* est la plus optimale.
- les faibles différences peuvent être difficiles à interpréter (convergence trop rapide vers l’exploitation).

De plus, dans le e-commerce, le taux de conversions est particulièrement bas (de l’ordre de 2 à 3 %) et dépend de la position de la page testée dans le parcours de conversion. Enfin, un enjeu important du test *A/B* est de limiter les pertes dues à l’expérience. Par exemple, si le e-commerçant veut réaliser un test hasardeux comme par exemple changer la photo du produit ou ajouter une fenêtre promotionnelle (pop-up), il veut limiter les pertes qu’engendrait la variation, dès lors qu’il est convaincu que celle-ci est mauvaise pour tous les profils. Cette approche peut être vue comme une minimisation du regret. Dans de nombreux tests *A/B*, l’échantillonnage est basé sur une proportion égale du trafic (50% du trafic a été alloué à *A* et 50% à *B*). Dans cette situation, une variation optimale devra attendre la fin du test pour être choisie.

Il est cependant possible de changer l’allocation au cours du temps via de nombreuses méthodes : les méthodes dites de *bandits* utilisent un échantillonnage adaptatif lorsque la meilleure variation est identifiée. Cette approche vue

comme un compromis exploration-exploitation, est aussi vue comme une méthode d'apprentissage par renforcement.

Un *méthode de bandit* consiste à choisir une solution, de façon itérative, parmi  $N$  solutions, chacune donnant une récompense moyenne inconnue a priori, la solution permettant de maximiser le gain [12]. Les algorithmes mis en œuvre peuvent éventuellement être paramétrés par le type ou la forme de la distribution, le seuil de confiance et la perte maximale acceptable. Une variante classique dite de *bandits multi-bras* consiste à identifier la meilleure variation parmi plusieurs variations possibles. Enfin, les *bandits contextuels* sont particulièrement populaires car ils utilisent le contexte rattaché à un visiteur pour prendre la meilleure décision. La méthode utilise pour cela un vecteur de contexte à  $d$  dimensions. Le processus d'apprentissage utilise ces vecteurs de contexte ainsi que la récompense de la variation alors affichée. Le lecteur intéressé trouvera dans la littérature un grand nombre de telles méthodes. On pourra citer par exemple :

- L'algorithme `LinUCB` : présume une dépendance linéaire (à identifier) entre le gain attendu et le vecteur de contexte [10].
- L'algorithme `UCBogram` : présume une dépendance non linéaire (à identifier) entre le gain attendu et le vecteur de contexte.
- L'algorithme `NeuralBandit` : approche neuronale où un réseau apprend le contexte et le gain associé.
- L'algorithme `KernelUCB` : version non linéaire de **LinUCB** en utilisant une matrice à noyaux. Utilisée pour le on-line learning.
- L'algorithme `Bandit Forest` : Utilise des forêts aléatoires de bandits basées sur une distribution commune des gains et du contexte. Utile lorsque l'expérience est reproductible.

En pratique ces méthodes sont efficaces mais présentent quelques lacunes ou inconvénients. Par exemple, on considère le non-achat du visiteur comme un échec dès qu'il quitte la page testée. Cependant, un visiteur peut répondre à l'objectif de conversion après plusieurs visites. Si nous considérons le nombre de visites comme un contexte, nous pouvons alors limiter la pénalisation pour le bandit.

Enfin, s'ajoute une contrainte fondamentale pour l'intégration de l'algorithme décisionnel en industrie : le temps alloué à la prise de décision. Il est inenvisageable pour le e-commerçant que le système prenne trop de temps pour décider quelle variation attribuer au visiteur : Quand un visiteur arrive sur un site web, le système doit répondre en moins de 100ms pour éviter d'impacter la visite du visiteur sur le site. Le e-marchand ignore également les informations à utiliser pour définir le contexte, encore plus lorsque les données collectées contiennent des variables potentiellement non pertinentes. Enfin, le trafic et les achats fluctuent au cours du temps, ce qui perturbe parfois l'identification de la variation la mieux adaptée.

Pour notre approche, nous mettons en œuvre une méthode de bandit binomiale [11] pour pour chaque segment de visiteurs identifiés dans notre arbre de pré-analyse. Il s'agit donc d'associer un bandit par segment. Pour chaque nouveau visiteur appartenant au segment considéré, le bandit lui alloue une des variations disponibles (ici deux :  $A$  et  $B$ ), selon la probabilité bayésienne postérieure (estimée de façon itérative) que chaque variation, dite aussi bras, soit optimale. Dans notre cas, le gain est une valeur binaire (1 : conversion ou 0 : non conversion), la fonction de gain suit une distribution de Bernoulli dont les paramètres sont estimés au cours du temps.

## 3 Expérimentation

### 3.1 Données et pré-analyse

Le jeu de données de validation est issu d'un test  $A/B$

- où la variation  $B$  consistait à changer le lien d'un bouton "retour",
- sans allocation dynamique (60% du trafic a été alloué à  $A$  et 40% à  $B$ ),
- réalisé du 11/07/16 au 25/07/16 pour un e-commerce de vêtements.

Le site de l'e-commerçant reçoit environ 150 000 visiteurs par mois, les données récoltées ici portent essentiellement sur la navigation et le comportement : nous utilisons pour chaque visiteur, l'historique de ses visites, de pages vues, de transactions éventuelles et les dates associées à ces événements. Pour simuler l'étape de pré-analyse (resp. d'observation), nous sélectionnons les visiteurs arrivés avant le 15/07/16 inclus (resp. arrivés après le 16/07/16 inclus).

**Étape de pré-analyse** Nous construisons un arbre de classification exclusivement sur les visiteurs de *train\_set* qui ont vu la version originale  $A$ . Nous cherchons à identifier les caractéristiques des populations ayant un taux de conversions différent (l'objectif ici est "Achat", "Pas d'achat"). Trois caractéristiques sont associées pour chaque visiteur.

1. Le cluster de visites basé sur la série temporelle de visites (présence ou non présence du visiteur sur le site, pour chaque jour du test).
2. Le cluster de pages basé sur la série temporelle de pages consultées (nombre de pages consultées sur le site, pour chaque jour du test).
3. Le topic associé aux pages qu'il a consulté lors de ces visites passées<sup>2</sup>.

Pour simplifier le test, nous considérerons que dans nos expériences tous les visiteurs sont parfaitement associés à leurs clusters.

La figure 2 présente l'arbre de classification issu du jeu de données de pré-analyse *train\_set* pour la variation  $A$ . Cet arbre identifie 10 profils (clusters) distincts. Il a été

<sup>2</sup> pour des raisons techniques, nous utiliserons ici uniquement la dernière page consultée avant qu'il n'arrive sur la page test.

TABLE 1 – Comparaison des méthodes

Bras	Notre méthode	Bandit Bayésien	LinUCB
Gagnant	X	B	B
Gain	1457	1252	1300
Visiteurs	11168	11168	11168
Proba	X	0.69	X

construit par l’algorithme CTREE de façon à ce que la différence entre les taux de conversions des différents profils soit significative avec un indice de confiance de 95% et en évaluant l’association entre le taux de conversions et toutes les variables explicatives via une statistique de corrélation quadratique. Selon les variables impliquées (numériques ou catégorielles), différents types de scores sont utilisés dans ces tests de corrélation. Par défaut, les  $p$ -valeurs résultantes sont corrigées par une correction de Bonferroni [13] pour des tests multiples à travers le nombre de variables utilisées pour la régression.

### 3.2 Analyse des résultats d’observation

Afin de valider notre méthode, nous la comparons avec la même méthode de bandit, mais sans contexte (un seul bandit, pas de segment particulier), ainsi qu’avec l’algorithme LinUCB très utilisé actuellement pour ce genre de test. Nous appliquons ces trois méthodes sur le même jeu de données *exp\_set*. Ainsi pour simuler la phase d’observation, nous prenons les visiteurs un à un dans le jeu de test et nous le soumettons à chacune des trois méthodes.

Pour simuler notre méthode, nous avons utilisé 10 bandits chargés d’allouer la proportion du trafic vers  $A$  ou  $B$  pour des visiteurs aux caractéristiques spécifiques (ces caractéristiques étant identifiés par les feuilles de l’arbre de pré-analyse). Ainsi, par exemple, le bandit *node3* (Figure 2) travaille sur les visiteurs associés à la fois au cluster de pages n°3 ( $ClustPage \in \{3\}$ ) et aux clusters de visites n°2 ou 3 ( $ClustVisite \in \{2, 3\}$ ). Il est à noter qu’un visiteur ne peut pas être associé à plusieurs bandits car l’arbre détermine des populations disjointes.

La méthode du bandit LinUCB identifie le meilleur bras selon différentes variables explicatives (ici les informations liées aux contextes sont les mêmes informations que nous utilisons pour réaliser notre arbre de pré-analyse). Lorsque LinUCB affecte ce «nouveau» visiteur  $NV$  à une variation différente de celle qui avait été appliquée dans la réalité, nous cherchons un visiteur  $NA$  aux mêmes caractéristiques, affecté à l’autre variation et qui n’a pas encore été proposé à l’algorithme. Nous inversons alors ce deux visiteurs  $NV$  et  $NA$ . Dans le cas (rare) où il n’existe plus de visiteurs  $NA$  dans le jeu de données, nous réalisons un tirage aléatoire parmi tous les visiteurs de même profil dans le jeu de données. Cette méthode comporte donc une part d’aléatoire. Néanmoins, les expériences ont montré que lorsque cette problématique se produit (pour les derniers visiteurs), LinUCB a en général déjà convergé vers la variation optimale.

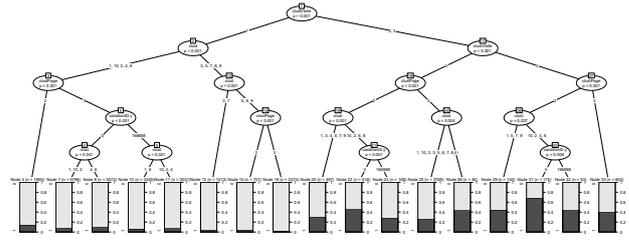


FIGURE 3 – Arbre de régression issu des données *exp\_set*

Le tableau 1 compare les trois approches suivant deux critères :

1. Le nombre de conversions (gain) obtenues.
2. La probabilité d’être le meilleur bras.

Le tableau 2 reprend les résultats de notre méthode suivant les différents segments.

Notre méthode aboutit à 6 variations optimales avec une probabilité de plus de 70%. Le gain total réalisé est de 1457 conversions. Aucun nouveau visiteur n’a été alloué au bandit 5. Certains bandits convergent rapidement.

Pour la méthode du bandit binomial sans contexte prédéfini, la probabilité d’avoir identifié le meilleur bras ne dépasse les 70% qu’à partir de 4000 visiteurs. Cette méthode réalise un gain total inférieur à 14% à notre méthode. La méthode du bandit LinUCB réalise un gain moyen de l’ordre de 1300 conversions : à aucun moment, LinUCB n’a dépassé le gain obtenu par notre méthode.

Nous avons également cherché à savoir si notre méthode retrouvait les résultats réels du jeu de données initial.

La figure 4 reprend la figure 3, soit les variables discriminantes sur l’ensemble de la population testée via l’allocation aléatoire, et présente également quels ont été les profils affectés à chaque bandit. Comme l’arbre de construction des bandits a été réalisé sur une population différente (visiteur arrivé entre le 11/07/16 et 14/07/16 contre les visiteurs du 15/07/16 au 25/07/16 pour la phase de test), cet arbre est plus précis que celui de la phase d’apprentissage. Il comprend également les variations  $A$  et  $B$  qui permettent d’observer si une population a été impactée par le test (Dans notre jeu de donnée, la variation  $A$  est appelée 0 et la variation  $B$  : 166888). La variable *Clust* est le "topic" associé à un visiteur. La variable *clustPage* est le cluster construit à partir des pages parcourues, enfin *clustVisite* est le cluster construit à partir des visites réalisées.

Dans tous les cas, la variation  $A$  a été meilleure que la variation  $B$ . D’après l’arbre de la figure 4, on distingue 3 profils impactés par le test :

- Les visiteurs à la variable  $clust \in \{1, 10, 2, 4, 6\}$ ,  $clustPage \in \{3\}$  et  $clustVisite \in \{1\}$ . Ces visiteurs ont été traités par le bandit 16. La meilleure variation était la variation  $A$ .
- Les visiteurs à la variable  $clust \in \{10, 2, 6, 8\}$ ,  $clustPage \in \{2\}$  et  $clustVisite \in \{3\}$ . Ces vi-

TABLE 2 – Notre méthode

Bras	3	5	7	8	11	12	15	16	18	19	TOTAL
Gagnant	A	B	A	B	A	A	X	A	A	A	X
Gain	573	50	39	51	10	9	0	628	6	91	1457
Visiteurs	1878	99	131	181	310	475	0	7380	105	609	11168
Proba	0.66	0.74	0.88	0.63	0.52	0.72	0	0.96	0.73	0.91	X

siteurs ont été traités par les bandits 7 et 8. La meilleure variation était la variation A.

- Les visiteurs à la variable  $clust = \in \{10, 2, 4, 6\}$ ,  $clusPage \in \{2\}$  et  $clusVisit \in \{2\}$ . Ces visiteurs ont été traités par les bandits 7 et 8. La meilleure variation était la variation A.

Dans notre méthode

- Le bandit 7 converge vers A avec une probabilité à 88% d’être le meilleur.
- Le bandit 8 converge vers B avec une probabilité à 63% d’être le meilleur.
- Le bandit 16 converge vers A avec une probabilité à 96% d’être le meilleur.

Notre méthode est donc aussi fiable qu’une méthode fréquentielle, lorsque la variation impacte faiblement une population, mais elle apporte les avantages supplémentaires suivants :

- Identification de la variation optimale pour une segmentation particulière.
- Convergence plus rapide vers la phase d’exploitation.
- Limitation des convergences vers la mauvaise variation.
- Gain comparable à une allocation aléatoire lorsque la variation impacte une faible proportion de la population.

### 3.3 Conclusion et travaux futurs

Une des problèmes majeurs des bandits dans un trafic particulièrement volatil qu’est celui du e-commerce est que la convergence vers une mauvaise solution est difficile à contrer. En utilisant des bandits de façon indépendantes, nous limitons les erreurs d’identification de la meilleure variation. De par notre utilisation du clustering, nous tirons profit des profils issus des parcours et des centres d’intérêt des visiteurs. Ces profils permettent de limiter l’information émise pour le contexte et anticipent la création trop importante de bandits, qui seraient alors soumis à un trafic trop limité pour converger. Actuellement nous avons automatisé le nombre de sujets à définir et testé cette approche avec d’autres e-commerçants. Nous travaillons également sur la qualité des clusters, et abordons les sujets d’intérêt de visiteurs de façon évolutive. Enfin, nous souhaitons utiliser des paramètres relatifs au trafic global du site afin d’anticiper les "pics" et "creux" de trafic qui peuvent nuire à la phase d’exploration (en période de faible trafic, les différences entre les variations sont plus réduites).

## Références

- [1] S. Roukine, *Améliorer ses taux de conversions web : vers la performance des sites web au-delà du webmarketing*, Eyrolles, 2011.
- [2] E. Kaufmann, O. Cappé et A. Garivier, On the Complexity of A/B Testing, *Conference on Learning Theory, Barcelona, Spain, JMLR : Workshop and Conference Proceedings*, Vol. 35, pp 461-481, 2014.
- [3] A. Wald, Sequential tests of statistical hypotheses. *Annals of Mathematical Statistics*, Vol. 16, pp 117-186, 1945.
- [4] A. Petitjean, A. Ketterlin et P. Gançarski, A global averaging method for dynamic time warping, with applications to clustering *Pattern Recognition archive*, Vol. 44, pp 678-693, 2011.
- [5] A. Sarda-Espinosa, Time Series Clustering Along with Optimizations for the Dynamic Time Warping Distance, *dtwclust R package version 3.1.0*, 2017. <https://github.com/asardaes/dtwclust>
- [6] B. Grun et K. Hornik, An R Package for Fitting Topic Models. *Journal of Statistical Software*, Vol. 40, pp 1-30, 2011.
- [7] H. Strasser et C. Weber On the Asymptotic Theory of Permutation Statistics *Mathematical Methods of Statistics*, Vol. 8, pp 220–250, 1991
- [8] T. Hothorn, K. Hornik et A. Zeileis, Unbiased Recursive Partitioning : A Conditional Inference Framework, *Journal of Computational and Graphical Statistics*, Vol. 15, pp 651–674, 2006.
- [9] AM. Molinaro, S. Dudoit et MJ. van der Laan, Tree-Based Multivariate Regression and Density Estimation with Right-Censored Data, *Journal of Multivariate Analysis*, Vol. 90, pp 154–177, 2004.
- [10] , L. Li, W. Chu, J. Langford, John et E. Schapire, A contextual-bandit approach to personalized news article recommendation, *Proceedings of the Nineteenth International Conference on the World Wide Web*, pp 661-670, 2010.
- [11] S. Scott, A Modern Bayesian Look at the Multi-armed Bandit, *Applied Stochastic Models Business and Industry*, Vol. 26, pp 639–658, 2010.
- [12] P. Auer, N. Cesa-Bianchi, Y. Freund, et R. E. Schapire, The nonstochastic multiarmed bandit problem, *SIAM Journal on Computing*, Vol. 32 pp 48–77, 2002.

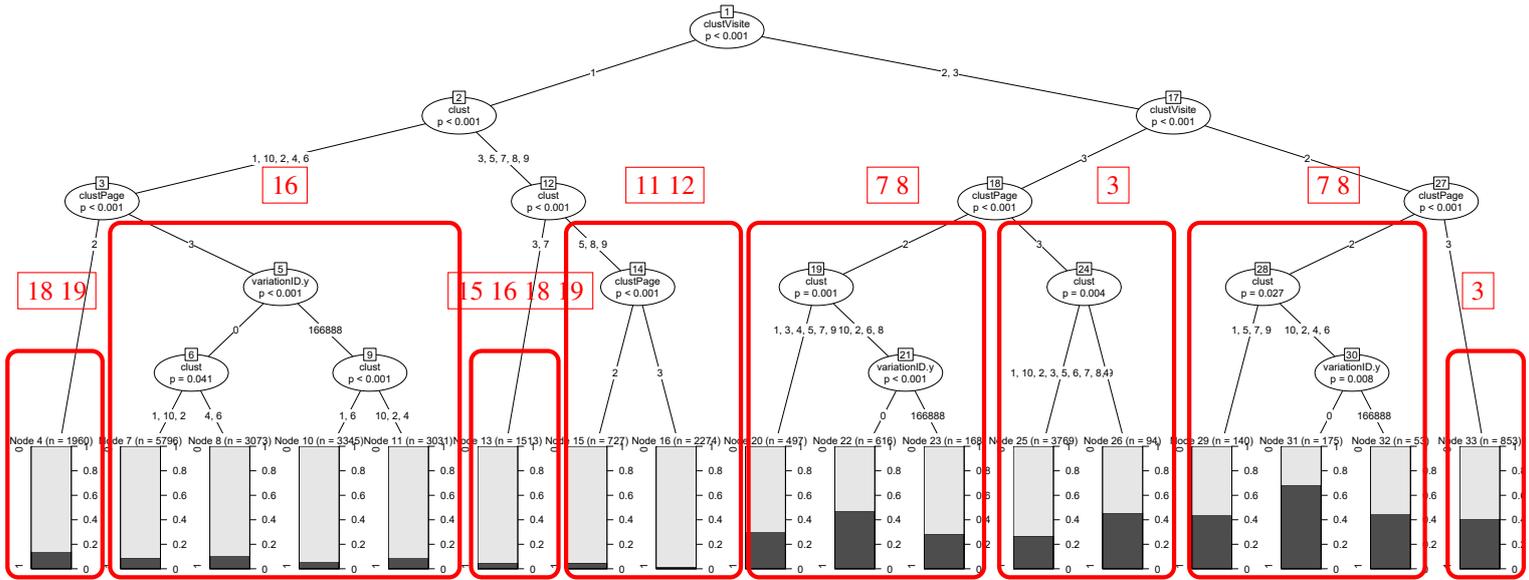


FIGURE 4 – Arbre de régression de *exp\_set* (avec bandits)

[13] W-Y. Loh Fifty Years of Classification and Regression Trees *International Statistical Review*, Vol. 82 pp 329–348, 2014.



# Can Synthetic Data Handle Unconstrained Gaze Estimation ?

A. Kacete<sup>1</sup>

R. Ségurier<sup>2</sup>

M. Collobert<sup>3</sup>

J.Royan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Research and Technology b-com

<sup>2</sup> Centralesupelec

<sup>3</sup> Orange Labs

amine.kacete@b-com.com

## Abstract

*In this article, we aim at solving unconstrained gaze estimation problem using appearance-based approach. Unlike previous methods working in relatively constrained environment, we propose an approach that allows free head motion and significant user-sensor distances using RGB-D sensor. Our paper presents the following contributions : (i) A direct estimation by inferring gaze information from RGB eyes and depth face appearances ;(ii) A channel selection strategy during the learning to evaluate the involvement of each channel in the final prediction ; (iii) Adapting a 3D face morphable model by integrating a parametric gaze model to render an important synthetic RGB-D training set. We also collect real labeled samples using Kinect sensor that allows for evaluating the potential of synthetic learning in handling real configurations and establish an objective comparison with real learning. Results on several users demonstrate the great potential of our approach.*

## Keywords

Gaze estimation, Eye tracking, Random Forest, Synthetic data, 3D morphable model.

## 1 Introduction

Gaze estimation plays a key role in several computer vision applications. In facial expression recognition fields, it allows access to important information such as the cognitive and expressive state of the person. In human behavior analysis, it allows the point of interest of the user, which represents the input of various devices such as user attention while driving and helping disabled people. Several industrial solutions are commercialized. They provide good accuracy on gaze estimation. Some of these solutions use complex hardware specifications (embedded camera on a head-mounted system) making them inappropriate for large scale public use. Other solutions use a range of infrared cameras to detect corneal reflection, but they remain very sensitive to illumination conditions. Recently, researches focus on using low cost devices such as monocular cameras, a comprehensive survey presented in [9], considers two main categories of gaze estimation, features-

based methods and appearance-based methods.

### 1.1 Feature-based methods

These methods rely on the extraction of some features such as the pupil center, the eye corners, the iris contour or the corneal reflection, which are used to build a 3D eye model and determine the visual axis. [8] and [25] used the pupil center corneal reflection, from the IR lights which are used to illuminate the eye regions from different directions giving different image appearances, the corneal reflection is built by subtracting these images. [22] and [11] estimated the shape of the iris by fitting an ellipse to infer the gaze. [15] and [10] estimate the gaze direction from the 2D locations of the pupils and the corners in the eye image. All the above methods simplify the anatomical structure of the eyeball and define the gaze direction as the optical axis. [4] proposed an extended 3D eye model based on the pupil and the corners to estimate the visual axis but still require a high image resolution to detect the corners accurately, in addition, they manually labeled the pupils centers. The main limitation of these methods lies in the direct link between their gaze estimation precision and the accuracy of the eye's key-points localization (pupil, corners etc.) which requires a high image resolution and small head pose changes.

### 1.2 Appearance-based method

Appearance-based methods learn the mapping from the eye image appearances space to the gaze estimation space. Many algorithms have been proposed. [1] trained a neural network with 2k samples to learn the mapping function. [20] proposed a weighted linear interpolation to estimate an unknown gaze point from 252 sparse samples. [23] trained a semi-supervised Gaussian process on 80 samples relatively sparse. [26] proposed support vector regressors to achieve a high non-linear mapping . [19] proposed an incremental learning strategy using an on-line sample acquisition from a video stream updating the mapping function for a number of limited head pose configurations. [14] introduced the adaptive linear regression for the learning on a very sparse training set. The accuracy of these previous approaches is significantly affected in unconstrained

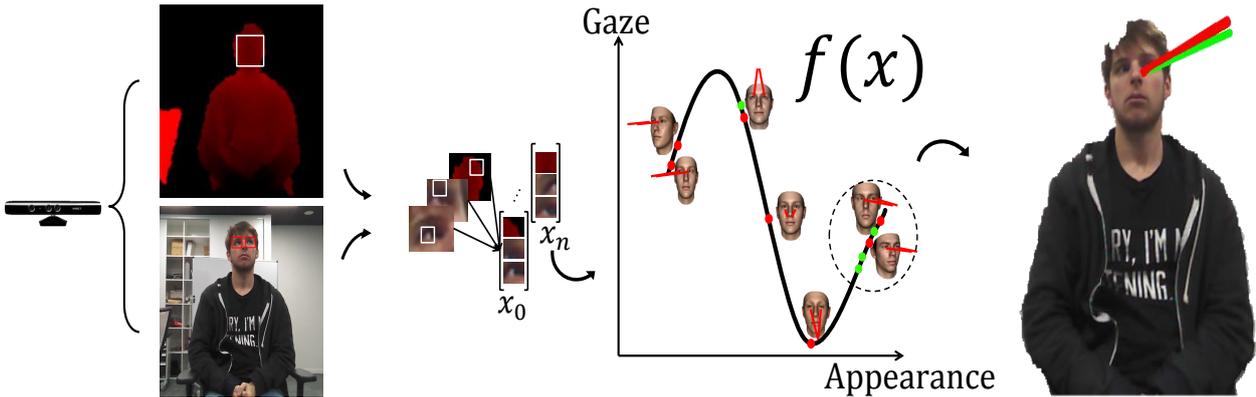


FIGURE 1 – Automatic gaze estimation based on our approach. We build a 3-channels global vector represented by the two RGB eye images and the face depth information using the depth sensor multimodal data, we extract a set of patches and project it through the forest represented here as the mapping function  $f(x)$  (the learned gaze sample clusters are defined as the red centroid points). Each single tree casts votes for each patch (defined as the green points). By performing a non-parametric clustering technique, a final estimation is calculated (represented as the green line, the red one defines the ground truth).

ned environment with high head pose changes. Recently, some methods aim to manage such trouble by considering gaze estimation and head pose as two independent geometrical components, these approaches can be seen as semi appearance-based methods. [13] proposed to separate head pose component from the global gaze estimation system. By performing an initial estimation under frontal configuration assumption and a geometric compensation with the head pose parameters, the final gaze estimation is inferred. Using the same paradigm, [16] projected the training gaze sample in frontal manifold using a frontalization step based on the head pose parameters calculated using a specific 3D model fitting. These last two methods solved the problem of head changes successfully but still working under low user-camera distances. To cover all the eye image appearance variability [24] recorded around 200k training samples and used a deeper strategy using a convolutional neuronal network to learn a very robust mapping function achieving a high gaze estimation accuracy but very constrained by an important computational time making this method not real-time.

In this paper, we consider the high non-linear problem of gaze estimation under head pose changes and large user-sensor distances as a regression task. To learn such mapping robustly, we propose a novel approach that considers a global gaze manifold instead of learning in frontal configurations and geometrically correct the final estimation using head pose parameters as usually done. We train an ensemble of regression trees able to capture robustly gaze information on an important 3-channels training samples ( $\text{channel}^{(0)}, \text{channel}^{(1)}$  defines the gray scale images relative to right and left eye respectively,  $\text{channel}^{(2)}$  defines the depth image of the face) organized as a set of patches (where a patch defines a small group of nearby pixels). We apply a channel-selection during the training to evaluate

the importance and involvement of each channel in the final estimation. We define the gaze vector  $g$  as the vector stretching the gravity center of the face and the gazed 3D point. To provide a significant set of training data for learning the trees, we render a very important amount of gaze samples using a 3D statistical morphable model with integrating dynamic gaze model. We also build an important gaze database recorded with the Microsoft Kinect sensor. Rendered synthetic data are exclusively used for the learning and real data are used for both learning and testing.

Fig. 1 describes an overview of our automatic gaze estimation system. The rest of the paper is organized as follows : Sec. 2 describes our method in details. In Sec 3, we detail how training data are generated. Sec. 4 describes the experiments and evaluates the precision of our approach. Sec. 5 concludes the paper.

## 2 Our method

We use randomized regression trees to estimate the two angles  $(\theta, \gamma)$ , which represent the horizontal and vertical orientation of the gaze vector  $g$ , from the RGB and depth cues combined on 3-channels patches. In Sec. 2.1, we provide some background on regression trees. In Sec. 2.2 and Sec. 2.3 we detail the training and testing steps of our forests respectively. Sec.3 describes the generation of our training RGB-D gaze samples.

For the next sections, we define also head pose parameters as  $\mathcal{H}$  (with  $\mathcal{H} : [R|T]$ ).

### 2.1 Random regression forest

Recently, many applications in computer vision have used Random Forest to achieve the mapping from complex input spaces into discrete or continuous output spaces. Introduced by [2], randomized trees deal with different tasks such as classification in [7, 12] and regression in [18, 5].

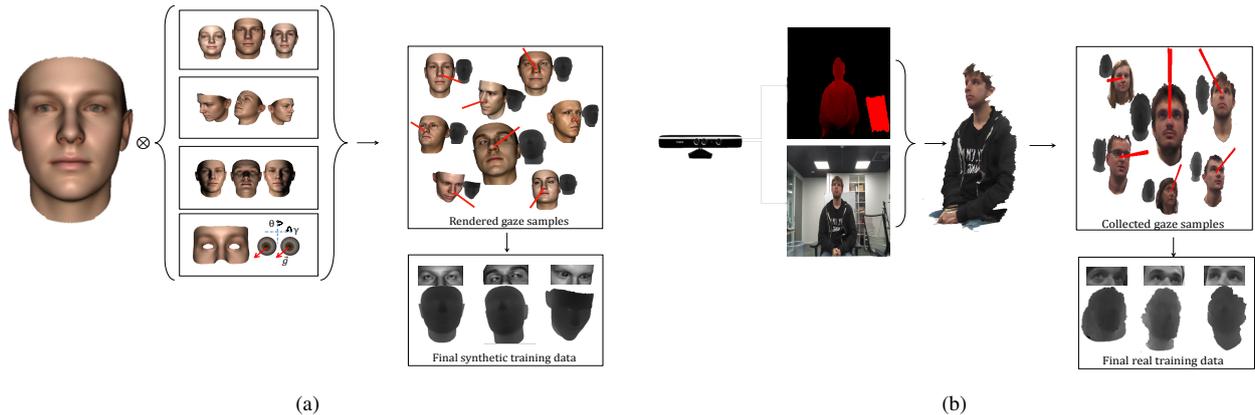


FIGURE 2 – Data generation. (a) represents synthetic data rendering using the 3D morphable model of [17]. By introducing some variabilities such as identity, head pose changes and lighting conditions, we integrated a dynamic gaze model (represented by two global textured spheres), we rendered the final RGB-D gaze training samples with the correspondent gaze annotation illustrated in red line. (b) We performed the same strategy using real data grabbed from the multimodal Kinect sensor by introducing the same previous variabilities. To obtain gaze annotation, a 2D moving point is gazed by the user (knowing the rigid transformation sensor-screen, the stretching vector from user head gravity and the projection of the moving point in the word coordinate can be calculated). These real data are principally used to evaluate accurately the performance of the synthetic data in handling gaze estimation.

Regression forest is an ensemble of trees predictors which splits the initial problem in two low complex problems in a recursive way. At each node, a simple binary test is performed, according to the result of the test, a data sample is directed towards the left or the right child. The tests are selected to achieve an optimal clustering. The terminal nodes of the tree called leaves, store the estimation models approximating the best the desired output. To achieve high generalization, the trees are trained in a decorrelated way (with introducing randomness in both the training data provided for each tree and the set of binary tests).

## 2.2 Training

We supervised the training of each tree  $T$  in the forest  $\mathcal{T} = \{T_i\}$  using a set of annotated patches  $\{\mathcal{P}_i = (\mathcal{I}_i^c, g_i)\}$  randomly selected from the training data where :

- $\mathcal{I}_i^c$  represents the extracted visual features vector from a given patch  $\mathcal{P}_i$ ,  $c$  defines the feature channel. We used 3 channels namely the two grayscale intensities extracted from the two eye images and the depth values extracted from the face.
- $g_i$  represents the output gaze vector represented with two components  $(\theta, \gamma)$ .

Starting from the root, at each non-leaf node, we define a simple binary test  $t_{x_1, y_1, x_2, y_2, c, \tau}$  :

$$\begin{cases} 1, & \text{if } \mathcal{I}_i^c(x_1, y_1) - \mathcal{I}_i^c(x_2, y_2) \leq \tau \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

where  $(\mathcal{I}_i^c(x_1, y_1) - \mathcal{I}_i^c(x_2, y_2))$  represents the difference of intensity between two locations  $(x_1, y_1)$  and  $(x_2, y_2)$  in the channel  $c$ . Supervising the training consists in finding at each non-leaf node the optimal binary test  $t^*$  that

maximizes the purity of the data clustering. Maximizing the clustering purity is achieved by maximizing the information gain defined as the differential entropy  $H$  of the set of patches at parent node  $\mathcal{P}$  minus the weighted sum of the differential entropies computed at the children  $\mathcal{P}_{\mathcal{L}}$  and  $\mathcal{P}_{\mathcal{R}}$  :

$$E = H(\mathcal{P}) - (\omega_{\mathcal{L}}H(\mathcal{P}_{\mathcal{L}}) + \omega_{\mathcal{R}}H(\mathcal{P}_{\mathcal{R}})) \quad (1)$$

The weights  $\omega_{j \in \{\mathcal{R}, \mathcal{L}\}}$  are defined as the ratio of patches reached to the parent and the right or left child respectively, *i.e.*,  $\frac{|\mathcal{P}_{j \in \{\mathcal{R}, \mathcal{L}\}}|}{|\mathcal{P}|}$ . Assuming that the gaze vector  $g$  at each node is a random variable with a multivariate Gaussian distribution such as  $p(g) = \mathcal{N}(g, \bar{g}, \Sigma)$ , allows us to rewrite Eq. 1 as follows :

$$E = \log |\Sigma(\mathcal{P})| - (\omega_{\mathcal{L}} \log |\Sigma(\mathcal{P}_{\mathcal{L}})| + \omega_{\mathcal{R}} \log |\Sigma(\mathcal{P}_{\mathcal{R}})|) \quad (2)$$

The learning process finishes when the data reach a predefined maximum value of the tree or when the number of patches let down a threshold value yielding the creation of the leaves. Each leaf  $l$  stores the mean of all the gaze vectors which reached it with the corresponding covariance.

## 2.3 Testing

Given an unseen instance, we extract a set of patches from the RGB eye regions and the face depth information after a face detection step. Each patch is passed through all the learned trees in the forest. Using the optimal stored binary test, each tree processes the patch until reaching a leaf. The gaze vector estimation according to a single tree is given by the reached leaf  $l$  in terms of the stored distribution

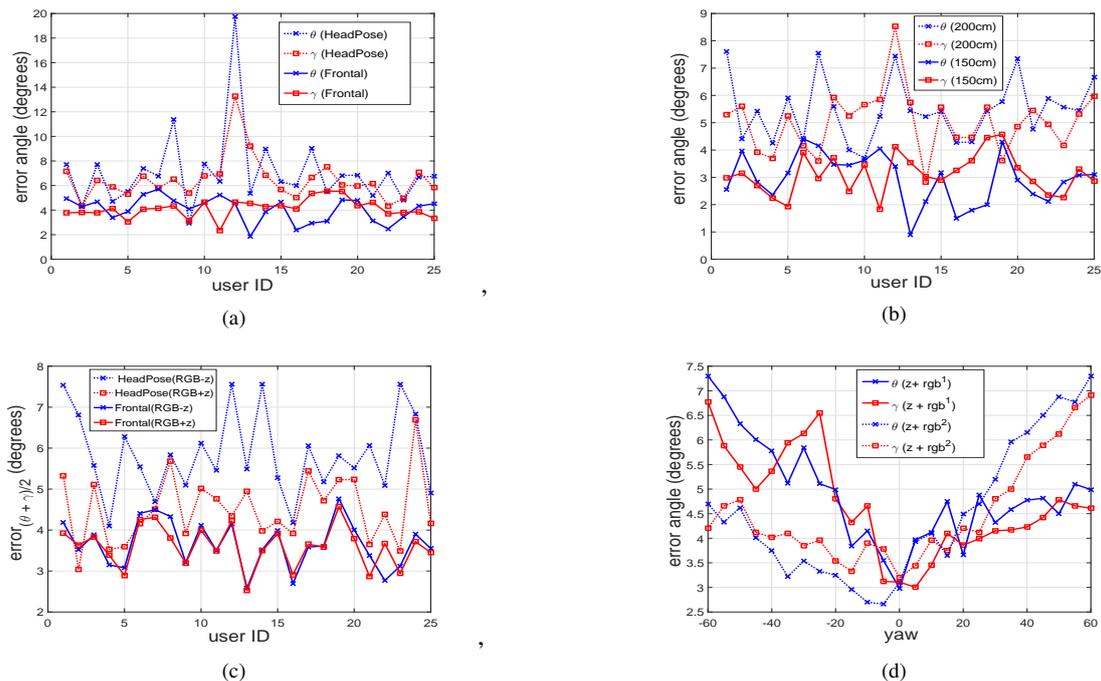


FIGURE 3 – (a) the mean error for the two gaze directions under frontal and head pose changes. (b) the mean error for the two gaze directions under two distances from the sensor. (c) mean error over the two directions with and without using channel<sup>(2)</sup> in frontal and head pose configurations respectively. (d) mean error of the two direction over head pose variation (yaw angle variation) with different channels combination

$p(g|l) = \mathcal{N}(g, \bar{g}, \Sigma)$ . The gaze vector estimation for a given patch  $\mathcal{P}_i$  over all the trees is calculated as follows :

$$p(g|\mathcal{P}_i) = \frac{1}{|\mathcal{T}|} \sum_t p(g|l_t(\mathcal{P}_i)) \quad (3)$$

All the estimations corresponding to the extracted patches are grouped in a set of votes. Before performing the clustering of these votes, we discard the estimations from the leaves with high variance considered as non-informative. To locate the centroid of the cluster of the votes, we perform 5 mean-shift iterations using a Gaussian kernel.

### 3 Data generation

To provide a representative training dataset, we use two types of data : synthetic and real data.

#### 3.1 Synthetic data

In Computer vision community, machine learning techniques are considered as a very elegant way to tackle problems. They demonstrated a great potential in terms of efficiency and robustness. Nevertheless to achieve a high generalization across unseen scenarios, these methods often require a very representative training data set. Given that the building of high amount of labeled data is a very tedious process, synthetic data represent a promising solution. Indeed, the annotation is performed automatically

instead of manual labeling. [3] developed an iterative model based on Gabor-filters applied on an empty image containing some seed points to render a fingerprint training samples. [27] rendered iris image samples obtained from a 2D polar projection of a cylindrical representation of continuous fibers. [21] improved face authentication by generating multiple virtual images using simple geometric transformations. [18] used a motion capture strategy to record RGB and depth cues of the body part movements, by varying body size and shape, scene position, camera position and mirroring the recorded data, they synthesize a highly varied training allowing a robust body part pose estimation. [6] tackled the head pose estimation problem with synthetic depth images by rendering an enormous amount of training data using a 3D statistical morphable model. In our method, we first generate our synthetic training gaze samples by rendering the 3D morphable model proposed by [17]. This model is built from around 200 scans of human faces. It contains a very high mesh density including the face, frontal neck and the ears. The shape and texture of the model is composed as a linear combination of 199 components. They can be deformed according to the following equation :

$$\mathcal{A} = \mathcal{A}_0 + \mathcal{M}_A \alpha \quad (4)$$

where  $\mathcal{A}$  can denote the generated texture or shape respectively.  $\mathcal{A}_0$  denotes the mean,  $\mathcal{M}$  represents the basis com-

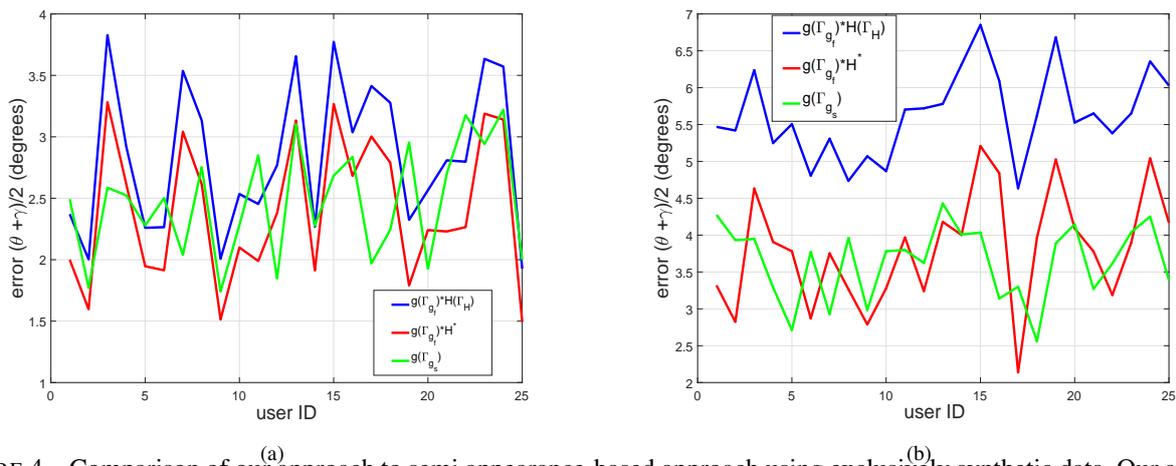


FIGURE 4 – Comparison of our approach to semi appearance-based approach using exclusively synthetic data. Our approach (in red) performs gaze estimation using RGB-D cues assuming a global gaze manifold (under head pose changes) in red. Semi appearance-based approach (in green) performs gaze estimation assuming frontal configuration with a geometrical correction using estimated head pose parameters. In blue : a semi appearance-based approach with ideal head pose parameters. (a) and (b) : mean gaze error across the two directions for frontal and head pose configuration respectively.

ponents perturbed with parameters  $\alpha$ .

Fig.2a shows an overall of the generation process. To introduce face identity variation, we perturb the first 50 basis components of the shape and texture by  $\pm 1.5$  of the standard deviation of each mode. To render images in different head pose configurations, we apply random rigid transformations on the model : the rotations spans  $\pm 60$  for yaw and  $\pm 40$  for pitch and we translate the model along the  $z$  axis within 200 cm range for scale variability. Furthermore, to produce illumination variability, we generate light sources with different intensities and directions. Unfortunately, the basis components related to the shape and the texture of this model do not monitor the gaze direction.

So, to integrate a dynamic gaze system to the model able to generate different gaze direction instances, we decided to delete all the vertices related to the eye regions. Two spheres are placed as the eyeballs instead. We fix the diameters to human average eyeball namely 25 mm. We use different textures for the eyeballs to handle iris appearance variability. Moreover to control eyelids movements resulting from the gazing up and down, we introduce a linear translation for each vertex surrounding the eye regions as blendshapes. By defining the starting and the ending position in the global mesh, all the coefficients of the linear translations can be calculated. Thanks to the topology of the model, all these modifications keep the same behavior under identity variation. To generate gaze samples, we apply random rotations to the eyeballs, the gaze information angles can be easily computed knowing the location of the eyeballs.

### 3.2 Real data

In the other hand, we recorded real gaze sample data using Microsoft Kinect sensor. The database contains 17k RGB-

D images of 42 people (15 females and 27 males, 4 with glasses and 38 without glasses) gazing different targets displayed on a screen. The subject performed 4 scenarios, gazing with a fixed head at roughly  $d_0 = 150$  cm from the sensor, gazing at same distance  $d_0$  under head pose changes and the two others scenarios are performed at about  $d_1 = 200$  cm from the sensor. Knowing the Kinect intrinsic parameters and its rigid transformation to the screen, the displayed gaze points can be projected to the Kinect world space. The gaze vector is represented as the vector stretching the head gravity center (computed using face detection area) and the 3D gazed point. The acquisition was under SXGA and VGA resolution for RGB and depth respectively recorded at 15 fps. Fig.2b describes the acquisition process. First we grab RGB and depth information, by using the known calibration between the two sensors, a 3D textured mesh can be reconstructed. We show then, in analogy with synthetic data, some real training data used for both learning and testing.

## 4 Experimental results

In our experiments, we trained different forests either on real data or synthetic data. The nature of the experiment determines the training parameters.

We trained our forest  $\mathcal{T}_{g_s}$  using 400k RGB-D synthetic gaze samples under several head pose changes. We extracted 15 patches from each sample giving 6M training data. Face depth image size is fixed to  $(150 \times 150)$ , eye RGB images to  $(80 \times 70)$  and the size of each channel of the extracted patches for each channel is fixed to  $(16 \times 16)$ . Some training and testing parameters are fixed according to some empirical observations, *e.g.*, the maximum depth to 18 and at each node we randomly generate 400 splitting candidates with 50 thresholds giving a total

number of  $20k$  binary tests. At testing, we extracted a total of 30 patches from each gaze test sample with 20 regression trees. We tested our forest on 25 users from the real images database discussed previously.

#### 4.1 Robustness to head pose and distance variations

We evaluate the gaze estimation accuracy using our trained forest  $\mathcal{T}_{g_s}$  under unconstrained environment. Fig. 3a represents the global error of gaze estimation over 25 users under frontal and head changes configurations. For each user, a mean error across different gaze samples performed under two distances is computed. In frontal case, the mean error over all the users is less than  $3^\circ$  for the two directions whereas the error is less than  $6.5^\circ$  for head pose changes case. This difference in accuracy between the two configurations is directly linked to the high eye image appearances variability across head pose configuration making the trees prediction less accurate. In Fig. 3b we report the error as a function of distance from the sensor for a frontal configuration. The experiments show a mean error of  $2.9^\circ$  and  $3.1^\circ$  for  $\theta$  and  $\gamma$  respectively at 150 cm from the sensor. At 200cm, we notified a slightly higher errors,  $4.8^\circ$  and  $5.0^\circ$  for the two directions respectively. The difference in accuracy between the two distances is related to the RGB eye images and face depth appearances which are significantly variable depending on the distance from the sensor.

#### 4.2 Channel selection importance

To evaluate the involvement of each channel (from the two eye RGB images and face depth information) at testing time, we realized experiments using the forest  $\mathcal{T}_{g_s}$  with and without depth channel and compared gaze estimation accuracy in both cases. Fig.3c illustrates the importance of depth information in our approach especially in head pose changes scenario. Gaze estimation errors are very close with and without depth information in frontal scenario whereas the error gap is approximately  $1.5^\circ$  in head pose changes configuration proving the importance of this channel in such case. Depth information is more suitable to encode geometric similarities between data samples which represent the head pose information.

Fig.3d describes the influence of the two RGB channels (corresponding to right and left eye) on gaze estimation accuracy across different yaw angle values. These results are expected since eye appearance is very sensitive to head pose changes especially for *yaw* angle variation. For instance, positive values of yaw deform the left eye appearance until a complete disappearance giving high estimation errors for the two directions without the visible channel namely right eye (*i.e.*, dotted lines in Fig 3d) and reciprocally. Using our channel selection strategy introduced on the forest learning, we can quantify the involvement of each RGB channel in the final gaze estimation across head pose changes.

Fig.6 shows some clusters with low variances captured by

the forest  $\mathcal{T}_{g_s}$  during training step. The process is achieved with real training data.

#### 4.3 Semi appearance-based versus appearance-based approach

Fig.4 illustrates the robustness of learning gaze in a global manifold (under head pose estimation). Instead of separating gaze and head pose as usually done, we trained two supplementary forests  $\{\mathcal{T}_{g_f}, \mathcal{T}_{\mathcal{H}}\}$  on exclusively synthetic data as follows :

- $\mathcal{T}_{g_f}$  : is the learned gaze estimation forest using only RGB (eye images) cues under frontal configuration exclusively. The forest is trained with the same parameters as  $\mathcal{T}_{g_s}$ .
- $\mathcal{T}_{\mathcal{H}}$  : is the learned head pose estimation forest using RGB-D cues (face depth and face RGB images). The training parameters are fixed as done in [6] using  $100k$  training data.

Fig.4a illustrates the mean error of the gaze estimation across the two direction under frontal scenario using different approaches. In red, our approach using the forest ( $\mathcal{T}_{g_s}$ ), in green, frontal gaze estimation corrected with head pose parameters using  $\{(\mathcal{T}_{g_f}, \mathcal{T}_{\mathcal{H}})\}$  and in blue, frontal gaze estimation using  $\mathcal{T}_{g_f}$  corrected with an ideal head pose (driven from the OpenGL camera calibration). We noticed that errors are very close which is an expected result due to the fact that head pose parameters are not involved in the frontal scenario. Fig.4b describes the mean error in a head pose scenario. Our gaze estimation approach presents a lowest error compared to the frontal gaze estimation corrected with head pose parameters even if it is optimal. Correcting gaze estimation with head pose in a geometrical way makes the errors related to each component accumulated unlike our approach which performs a direct mapping producing an unique error for gaze estimation.

#### 4.4 Learning with real data versus learning with synthetic data

To evaluate the realism of our rendered synthetic data and their ability to handle unconstrained gaze estimation problem, we trained a forest  $\mathcal{T}_{g_r}$  on  $500k$  exclusively real trai-

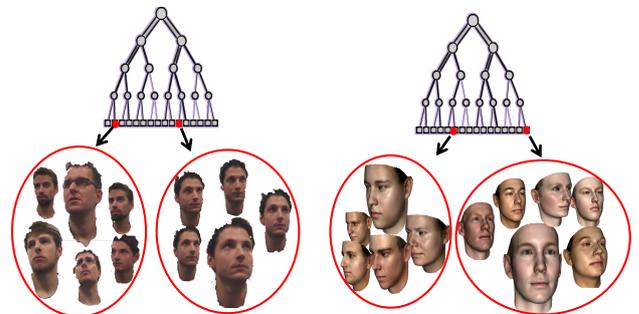


FIGURE 6 – Visualizing some clusters captured during the training step using only channel<sup>(2)</sup> with real and synthetic data respectively.

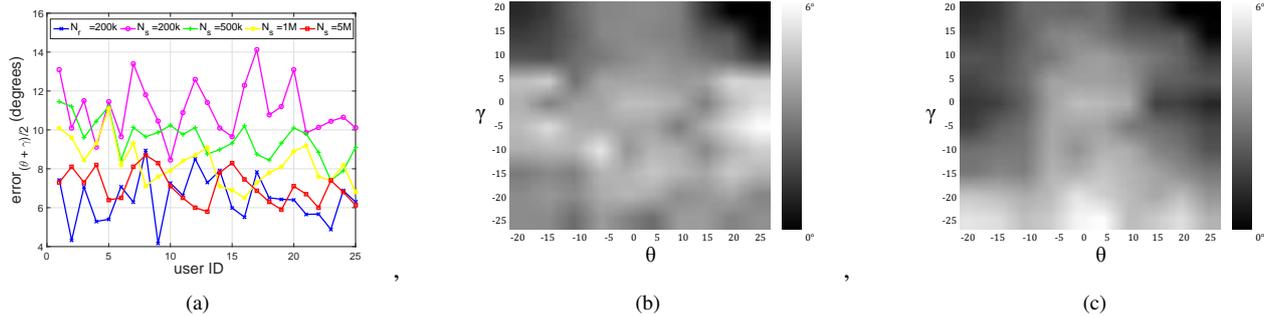


FIGURE 5 – (a) gaze estimation error (over  $\theta$  and  $\gamma$  and over 150cm and 200cm) under learning with real and synthetic data ( $N_r$  and  $N_s$  are the number of real and synthetic training data used respectively). (b) and (c) Gaze estimation error distribution based real and synthetic learning respectively.

ning data under head pose changes extracted from the previous database (the other training parameters are kept fix as in  $\mathcal{T}_{g_s}$ ). To achieve a comparative analysis, we trained in the same way as  $\mathcal{T}_{g_s}$  different forest using different number of synthetic training data. The fact that learning forest is a very computational time task, to learn different forest in an acceptable time, we reduce the number of binary tests generated at internal nodes to  $1k$  instead of  $20k$  which affects considerably the estimation accuracy but yields sufficiently good results to compare different scenarios. Fig. 5a describes gaze estimation errors across different user under real and synthetic learning. A first observation can be driven by the figure, learning with the same number of training data in real and synthetic case does not perform the same accuracy which can be explained by the difference in the realism between real and synthetic data. During test, extracted patches appearance from a testing user is more closer to the gaze clusters appearances encoded using the forest  $\mathcal{T}_{g_r}$ . Increasing the number of synthetic training data make  $\mathcal{T}_{g_s}$  increasingly close to  $\mathcal{T}_{g_r}$ . This can be explained by enhancing the generalization ability across unseen scenarios with more training data (We evaluated the factor between real and synthetic training producing approximately same accuracy to  $1/9$ ).

In Fig. 5b and Fig. 5c we illustrate gaze estimation error distribution over all 5 best testing users using  $\mathcal{T}_{g_r}$  and  $\mathcal{T}_{g_s}$  respectively. We can notice the importance of the error under synthetic learning in Fig. 5c for  $\gamma$  less than  $-20^\circ$  values resulting from the eyes closure when gazing down.

## 5 conclusion

In this paper, we presented a robust approach to handle gaze estimation problem in unconstrained environment using an ensemble of regression trees grouped in a single forest with high ability of generalization. To ensure the robustness, we include both RGB and depth cues as input during learning assuming a global gaze samples manifold under head pose variation. To enhance the generalization, we render an important amount of training data using a

3D morphable model with an integrated dynamic gaze model. We also, build a database with real images to evaluate the accuracy of the gaze estimation in real scenario with accuracy. Different experiments scenarios demonstrate that our approach present a great potential regarding state-of-the-art methods.

## Références

- [1] S. Baluja and D. Pomerleau. Non-intrusive gaze tracking using artificial neural networks. Technical report, DTIC Document, 1994.
- [2] L. Breiman. Random forests. *Machine learning*, 45(1):5–32, 2001.
- [3] R. Cappelli, A. Erol, D. Maio, and D. Maltoni. Synthetic fingerprint-image generation. In *Pattern Recognition, 2000. Proceedings. 15th International Conference on*, volume 3, pages 471–474. IEEE, 2000.
- [4] J. Chen and Q. Ji. 3d gaze estimation with a single camera without ir illumination. In *Pattern Recognition, 2008. ICPR 2008. 19th International Conference on*, pages 1–4. IEEE, 2008.
- [5] A. Criminisi, J. Shotton, D. Robertson, and E. Konukoglu. Regression forests for efficient anatomy detection and localization in ct studies. In *Medical Computer Vision Workshop*. 2010.
- [6] G. Fanelli, J. Gall, and L. Van Gool. Real time head pose estimation with random regression forests. In *CVPR*, 2011.
- [7] J. Gall, A. Yao, N. Razavi, L. Van Gool, and V. Lempitsky. Hough forests for object detection, tracking, and action recognition. *TPAMI*, 2011.
- [8] E. D. Guestrin and M. Eizenman. General theory of remote gaze estimation using the pupil center and corneal reflections. *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, 53(6):1124–1133, 2006.
- [9] D. W. Hansen and Q. Ji. In the eye of the beholder : A survey of models for eyes and gaze. *TPAMI*, 2010.

- [10] T. Ishikawa, S. Baker, I. Matthews, and T. Kanade. Passive driver gaze tracking with active appearance models. In *Proceedings of the 11th World Congress on Intelligent Transportation Systems*, October 2004.
- [11] S. Kohlbecher, S. Bardinst, K. Bartl, E. Schneider, T. Poitschke, and M. Ablassmeier. Calibration-free eye tracking by reconstruction of the pupil ellipse in 3d space. In *Proceedings of the 2008 symposium on Eye tracking research applications*, pages 135–138. ACM, 2008.
- [12] V. Lepetit, P. Lagger, and P. Fua. Randomized trees for real-time keypoint recognition. In *CVPR*, 2005.
- [13] F. Lu, T. Okabe, Y. Sugano, and Y. Sato. A head pose-free approach for appearance-based gaze estimation. In *BMVC*, pages 1–11, 2011.
- [14] F. Lu, Y. Sugano, T. Okabe, and Y. Sato. Inferring human gaze from appearance via adaptive linear regression. In *Computer Vision (ICCV), 2011 IEEE International Conference on*, pages 153–160. IEEE, 2011.
- [15] Y. Matsumoto and A. Zelinsky. An algorithm for real-time stereo vision implementation of head pose and gaze direction measurement. In *Automatic Face and Gesture Recognition, 2000. Proceedings. Fourth IEEE International Conference on*, pages 499–504. IEEE, 2000.
- [16] K. A. F. Mora and J.-M. Odobez. Gaze estimation from multimodal kinect data. In *Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), 2012 IEEE Computer Society Conference on*, pages 25–30. IEEE, 2012.
- [17] P. Paysan, R. Knothe, B. Amberg, S. Romdhani, and T. Vetter. A 3d face model for pose and illumination invariant face recognition. In *Advanced Video and Signal Based Surveillance*, 2009.
- [18] J. Shotton, R. Girshick, A. Fitzgibbon, T. Sharp, M. Cook, M. Finocchio, R. Moore, P. Kohli, A. Criminisi, A. Kipman, et al. Efficient human pose estimation from single depth images. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 35(12) :2821–2840, 2013.
- [19] Y. Sugano, Y. Matsushita, Y. Sato, and H. Koike. An incremental learning method for unconstrained gaze estimation. In *Computer Vision–ECCV 2008*, pages 656–667. Springer, 2008.
- [20] K.-H. Tan, D. J. Kriegman, and N. Ahuja. Appearance-based eye gaze estimation. In *Applications of Computer Vision, 2002.(WACV 2002). Proceedings. Sixth IEEE Workshop on*, pages 191–195. IEEE, 2002.
- [21] N. P. H. Thian, S. Marcel, and S. Bengio. Improving face authentication using virtual samples. In *Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2003. Proceedings.(ICASSP'03). 2003 IEEE International Conference on*, volume 3, pages III–233. IEEE, 2003.
- [22] J.-G. Wang and E. Sung. Study on eye gaze estimation. *Systems, Man, and Cybernetics, Part B : Cybernetics, IEEE Transactions on*, 32(3) :332–350, 2002.
- [23] O. Williams, A. Blake, and R. Cipolla. Sparse and semi-supervised visual mapping with the  $s^3$ gp. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 2006 IEEE Computer Society Conference on*, volume 1, pages 230–237. IEEE, 2006.
- [24] X. Zhang, Y. Sugano, M. Fritz, and A. Bulling. Appearance-based gaze estimation in the wild. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 4511–4520, 2015.
- [25] Z. Zhu and Q. Ji. Novel eye gaze tracking techniques under natural head movement. *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, 54(12) :2246–2260, 2007.
- [26] Z. Zhu, Q. Ji, and K. P. Bennett. Nonlinear eye gaze mapping function estimation via support vector regression. In *Pattern Recognition, 2006. ICPR 2006. 18th International Conference on*, volume 1, pages 1132–1135. IEEE, 2006.
- [27] J. Zuo, N. A. Schmid, and X. Chen. On generation and analysis of synthetic iris images. *Information Forensics and Security, IEEE Transactions on*, 2(1) :77–90, 2007.

# Cibler une action de gestion des connaissances appropriée dans un cadre industriel : retour d'expérience d'Ardans

Aline BELLONI<sup>1</sup>

Alain BERGER<sup>1</sup>

Jean-Pierre COTTON<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ardans SAS

6 rue Jean Pierre Timbaud, "Le Campus", bâtiment B1,  
78180 Montigny-le-Bretonneux, France

{abelloni, aberger, jpcotton} @ardans.fr

## Résumé

*La question de la préparation d'une opération de gestion des connaissances au sein d'une entité d'une organisation industrielle est un sujet récurrent : comment discriminer les connaissances clés des connaissances cruciales, comment motiver les acteurs pour que leurs contributions soient optimales, quelles finalités attendre d'une telle opération dédiée à la maîtrise des savoirs, comment identifier les thèmes pertinents et les ressources déterminantes pour le succès de l'opération ?*

*Entre l'état de l'art académique et les attentes opérationnelles des responsables de service ou de département, cet article décrit une méthode pragmatique qui est aujourd'hui déclinée dans l'industrie. Ce retour d'expérience est une contribution à cette discipline de l'intelligence artificielle dite "faible" qui a déjà la caractéristique de valoriser les contributeurs humains aux savoirs de l'organisation.*

## Mots Clés

Cartographie de connaissance, ingénierie de la connaissance, connaissances clés, connaissances cruciales, connaissances critiques, ciblage d'une opération de gestion des connaissances, méthode d'analyse de criticité de connaissance, retour d'expérience industriel.

## Abstract

*The question of the preparation of an action of knowledge management within an entity of an industrial organization is a recurring subject : how to discriminate between the key knowledge of the crucial knowledge, how to motivate the actors so that their contributions are optimal, which purposes expect from such an operation dedicated to the control of the knowledge, how to identify the relevant themes and the determining resources for the success of the operation ? Between the academic state of the art and the operational expectations of the heads of department, this article describes a pragmatic method which is*

*declined today in the industry. This experience feedback is a contribution to this discipline of the artificial intelligence named "weak AI" which already has the characteristic to value the human contributors in the knowledge of the organization.*

## Keywords

Knowledge map, knowledge engineering, key knowledge, crucial knowledge, critical knowledge, targeting of a corporate action of knowledge, method of analysis of criticality of knowledge, industrial lesson learnt.

## 1 Introduction

Cet article présente une méthode pour analyser un patrimoine de connaissances, basée sur une approche multicritère, aujourd'hui déclinée dans l'industrie. La première réflexion fondée sur divers travaux académiques [1][2][3][4][5] a imposé d'intégrer une dose de pragmatisme opérationnel. Notre démarche trouve son fondement sur l'évaluation de la criticité des connaissances métier qui constituent le patrimoine d'actifs immatériels de toute entreprise, et nécessitent la mise en place d'actions de gestion des connaissances appropriées en vue de leur pérennisation, de leur transmission ou leur partage à des fins d'exploitations [8][7].

Dans cette première partie, nous précisons tout d'abord l'importance, pour toute organisation, de réaliser une analyse stratégique de son patrimoine de connaissances et l'intérêt d'en disposer. Nous présentons notre définition de la criticité d'une connaissance en précisant les éléments qui sont venus nourrir notre réflexion. S'il s'agit avant tout d'une démarche approfondie pour identifier et évaluer les connaissances à préserver, il faut garder à l'esprit que l'objectif final est bien celui d'établir une gestion efficiente de ces connaissances au travers d'un plan d'actions adaptées. La deuxième partie de cet article décrit notre démarche d'analyse en 4 étapes. La partie suivante est dédiée à la

présentation de résultats concrets obtenus dans l'industrie. Nous discutons ensuite de l'intérêt de l'outil cartographie pour ce type d'analyse et enfin, nous proposons quelques éléments de réflexion issus d'échanges que nous avons eus avec nos clients avant de conclure.

## 2 Les connaissances présentes dans l'organisation : d'une question stratégique jusqu'à une représentation cartographique

La gestion des connaissances apparue dès les années 70, répond aujourd'hui à des problèmes opérationnels résultant de pertes de connaissances (savoirs et savoir-faire) en lien, souvent, avec les départs à la retraite, les taux de rotation parfois élevés, les recrutements qui peuvent s'avérer difficiles ou inefficaces et les réorganisations (compressions des effectifs, fusions d'équipes), autant de situations vécues aujourd'hui dans les organisations. A ce jour, toute entreprise qui souhaite faire face à ces pertes, se doit de considérer l'importance du partage des connaissances pour son développement stratégique et le maintien de sa compétitivité dans le contexte actuel de mondialisation.

### 2.1 Réaliser l'analyse stratégique d'un patrimoine de connaissances

Une étape essentielle de la gestion des connaissances, ayant pour objectif de sauvegarder les savoirs et savoir-faire et les partager avec le futur remplaçant ou les personnes du même métier, reste l'identification des connaissances clés et cruciales de l'organisation. En effet, faire une bonne gestion des connaissances ne signifie pas tout capitaliser mais plutôt gérer efficacement celles qui doivent l'être, celles qui sont clés, cruciales pour l'organisation. Si usuellement sont distinguées les connaissances explicites, ou savoirs, et les connaissances tacites, ou savoir-faire, un regard complémentaire peut être porté sur ces connaissances. Quand l'entreprise confère une importance pour certaines d'entre elles, on parle alors de connaissances clés ou cruciales.

Un sujet subtil à négocier est par exemple la question liée à un savoir-faire accumulé par un expert sur une activité, avec un cadre "peu tracé" et donc peu formalisé. La difficulté survient lorsqu'il convient de discerner si la connaissance qui a pu lui servir et être appréciée par le passé a une chance de s'avérer utile et d'"être réveillée" dans le futur. Les **connaissances clés** sont celles qui permettent la réalisation des activités qui constituent le savoir-faire métier et sont tout simplement l'élément différenciant vis-à-vis de la concurrence. Les **connaissances cruciales** sont, quant à elles, celles sans lesquelles les problèmes critiques d'une entreprise n'ont pas de solution, "*c'est -à-dire les savoirs et les savoir-faire qui sont nécessaires aux processus de décision et au déroulement des processus essentiels qui constituent le coeur des activités de l'entreprise*"[4]. Cette identification est réalisée par le repérage, la collecte et la quali-

fication des connaissances, mises en forme et positionnées au sein d'une carte des connaissances.

Connaître ce que l'on sait et repérer ce qu'il est essentiel, voire stratégique, de savoir pour mener à bien les activités du quotidien, "*c'est considérer les connaissances utilisées et produites par l'entreprise comme un ensemble de richesses constituant un capital, et en tirer des intérêts contribuant à augmenter la valeur de ce capital*" [5]. Enfin, retenons que les connaissances ont de la valeur pour l'entreprise si elles sont rares, non substituables et très utiles, d'où l'intérêt à réaliser une analyse stratégique de ce patrimoine d'actifs intangibles.

### 2.2 Critique ? vous avez dit critique ?

L'individu et son savoir-faire, sous-ensemble particulier de ses connaissances -indissociable de l'individu lui-même- constitue le centre des activités de l'entreprise dans laquelle il opère. Tant que cette personne est présente, son savoir-faire est *a priori* maîtrisé. Lorsque cela est possible, un détenteur de connaissances (sachant), transfère ses savoirs, savoir-faire et parfois aussi son savoir-être à son futur successeur ou aux personnes de son service par un accompagnement ou par un compagnonnage. Parfois, ce transfert n'a pu être réalisé ou n'est pas possible et les conséquences sur l'entreprise sont rapidement mesurables : perte de savoir-faire, ralentissement de la production, réclamations ou contentieux client... Autant de connaissances clés voire cruciales qu'il convient de reconstituer pour les maîtriser à nouveau.

On comprend donc aisément qu'il soit important de gérer ce capital immatériel et par voie de conséquence le capital humain détenteur de ces connaissances. Avec le recensement et la qualification des connaissances (savoir, savoir-faire, savoir-être, clé, cruciale), il devient alors possible d'en évaluer la criticité. Mais qu'est-ce que cela veut dire concrètement ? Qu'est-ce qu'une connaissance critique ?

Prenons l'analogie avec ce qui est fait dans le domaine de la qualité où la criticité d'une non-conformité (non-respect d'une exigence) est définie comme le produit de la probabilité d'occurrence de la non-conformité par la gravité de ses conséquences. Ainsi, la criticité d'un mode défaillant (facteur de l'AMDEC<sup>1</sup>) dépend à la fois de la fréquence d'apparition du défaut (probabilité), de sa gravité et de la probabilité de sa non-détection. Autrement dit, c'est le niveau de risque que prend une entreprise lorsqu'elle ne met pas en place une action corrective ou préventive pour pallier cette non-conformité.

Dans le domaine qui nous intéresse ici, c'est à dire la gestion des connaissances, **la criticité d'une connaissance** est évaluée sur celles qui sont repérées comme étant clés ou cruciales. Notre approche consiste donc à considérer que la criticité d'une connaissance peut être entendue comme le niveau de risque que prend une entreprise en cas d'ab-

1. AMDEC : Analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC) est un outil de sûreté de fonctionnement (SdF) et de gestion de la qualité.

sence, partielle ou totale, d'une maîtrise de cette connaissance clés au sein de l'entreprise.

De manière similaire à la définition de la criticité utilisée en qualité, nous pouvons alors dire que **la criticité d'une connaissance (C)** est le produit de la probabilité de survenue de la perte de la connaissance par le "degré" d'importance qu'aurait cette perte pour l'entreprise, la probabilité de survenue de la perte d'une connaissance étant étroitement liée à sa vulnérabilité.

En effet, **une connaissance est vulnérable**, dès lors qu'elle n'est plus disponible et donc d'une grande rareté, qu'elle est difficilement transmissible, qu'elle est complexe et/ou présente une difficulté d'usage importante, qu'elle ne peut être externalisée, qu'elle est confidentielle, qu'elle requiert un niveau d'expertise élevé pour être maîtrisée, qu'elle présente un caractère tacite ou enfin, qu'elle n'a pas été ou très peu capitalisée. Le degré d'importance de la perte d'une connaissance est quant à lui, lié à l'impact que cette perte générerait pour l'entreprise et donc à la pertinence qu'elle revêt. Il se mesure par exemple, parce que cette connaissance constitue un fondement historique des savoirs de l'organisation, qu'elle porte une importance stratégique ou parce qu'elle crée de la valeur pour l'entreprise.

Ainsi, plus le résultat du produit de la vulnérabilité par la pertinence est élevé plus le niveau de criticité d'une connaissance résultera fort.

### 2.3 L'outil cartographie

Nous l'avons vu, l'identification des connaissances détenues par les personnels des entreprises, connaissances nécessaires et essentielles à la réalisation des métiers, est un prérequis à l'évaluation puis à l'analyse d'une quelconque criticité. A partir de là et si l'on en croit l'adage de Napoléon Bonaparte "*un bon croquis vaut mieux qu'un long discours*", il est très souvent pertinent de disposer d'une représentation visuelle bien choisie qui procure les échanges, qui facilite la compréhension et rend l'analyse d'une situation plus aisée. On parle alors de représentation cartographique ou cartographie. Le terme cartographie, littéralement "écriture de la carte", vient du mot latin *charta* qui signifie "papier". Il s'agit donc là de l'ensemble des opérations ayant pour objet l'élaboration, la rédaction et l'édition d'une carte.

Initialement réservée au domaine de la géographie, la cartographie constitue aujourd'hui le moyen d'obtenir une représentation spatiale d'une réalité qui peut ne pas être géographique. Il suffit pour cela de penser aux cartes génomiques ou chromosomiques ou, dans le cas qui nous concerne, simplement aux cartes heuristiques issues du "Mind Mapping" (cartes mentales, cartes sémantiques, cartes cognitives ou cartes de connaissances). Ces cartes sont utilisées depuis de nombreuses années, par les chercheurs en gestion des connaissances [1] afin de faciliter la navigation dans ces patrimoines immatériels des organisations et surtout d'en donner une vue globale afin de piloter des actions appropriées [9].

Le niveau de criticité étant le résultat du produit de la vulnérabilité et de la pertinence de la connaissance par une approche multicritère, nous avons choisi d'utiliser la cartographie pour représenter les connaissances sur une matrice de chaleur ou "carte des connaissances critiques", présentée plus en détails au paragraphe 2.4.

## 3 Notre démarche d'analyse de criticité des connaissances métier clés et/ou cruciales

Afin de satisfaire nos clients décidés à identifier les actions de gestion des connaissances les plus appropriées, nous proposons une démarche pour analyser la criticité des connaissances métier clés et/ou cruciales en quatre étapes. Selon le périmètre de l'analyse, notre démarche est réalisable sur quelques semaines ou plusieurs mois.

Un certain nombre d'ateliers ou de réunions de travail sont organisés avec l'équipe projet, d'abord avec les managers opérationnels ou les dirigeants, puis avec les détenteurs de la connaissance au niveau de la dernière étape. La Figure 1 illustre notre démarche avec ses grandes étapes et les livrables associés.

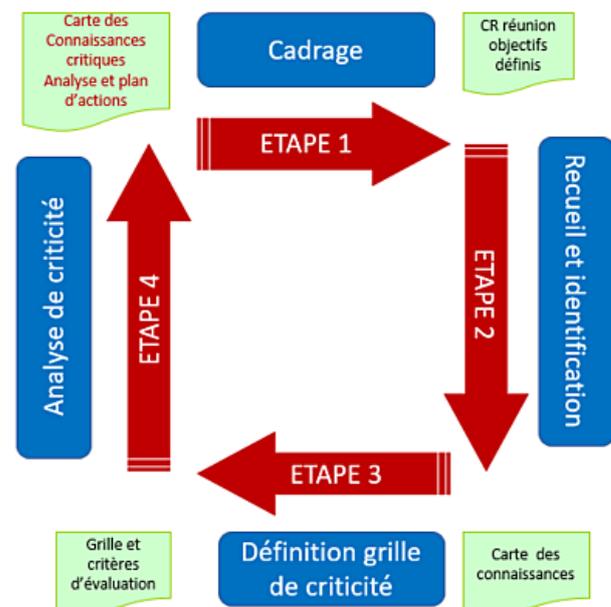


FIGURE 1 – Notre démarche d'analyse de criticité des connaissances métier clés et/ou cruciales en 4 étapes

Comme indiqué sur la Figure 1, chaque étape est finalisée par la remise d'un livrable (encadré en vert) reprenant les éléments définis, décidés et colligés au cours des réunions de travail avec l'équipe projet du maître d'ouvrage. L'objectif final étant pour nos commanditaires de disposer d'une cartographie des connaissances dont le niveau de criticité a été évalué afin de l'analyser et d'en proposer un plan d'actions approprié pour *in fine* réduire les éléments pointés de niveaux de criticité élevés ou les ra-

mener à un niveau acceptable et maîtrisé. La réalisation de la carte des connaissances n'étant pas une fin en soi mais une photographie particulière du patrimoine immatériel à un instant "t", nous proposons une démarche en cycle pour affiner la carte dans le temps (ce qui traduit l'évolution des travaux).

### 3.1 Etape de cadrage

Cette première étape primordiale a pour objectif de : définir les objectifs stratégiques de la cartographie des connaissances critiques en tant qu'outil, dans le cadre d'une politique plus globale de gestion des connaissances dans l'organisation :

- définir le périmètre des connaissances à traiter (i.e. le domaine métier)
- identifier les activités concernées par le périmètre
- identifier les thématiques (sujets, projets...) concernant le domaine métier
- identifier les personnels impliqués dans l'opération (qui sont "les experts" à interviewer) autrement dit connaître les ressources nécessaires à mobiliser relativement à ce domaine et leur disponibilité.

Lors de cette étape, il est important de rencontrer les managers opérationnels ou les dirigeants de l'organisation pour bien comprendre leurs attentes et besoins vis-à-vis de cette analyse et pour affiner correctement le périmètre de la carte, bien définir ses frontières (quel domaine métier est concerné ?, quels sujets ou projets à considérer ?, l'analyse doit-elle être réalisée sur toutes les connaissances d'un métier, d'un service, d'un département ?, combien de personnes sont impliquées ?, etc.), autant d'éléments essentiels pour bien débiter l'étape suivante. Ensuite, une rencontre avec les acteurs du domaine est à planifier. Outre vérifier leur disponibilité et leur présenter la démarche, cette entrevue facilitera les étapes suivantes de repérage des connaissances et l'évaluation de la criticité.

### 3.2 Etape de repérage des connaissances

La deuxième étape, non moins essentielle, sert à repérer les connaissances du périmètre arrêté dans l'étape de cadrage. Le repérage consiste, à partir des documentations de référence et d'entretiens de sachants, qu'ils soient experts ou managers opérationnels du domaine considéré, à faire ressortir les domaines de connaissances stratégiques par l'analyse successive des missions, des activités, des projets, des produits, etc.

Cette tâche exige une capacité d'analyse importante et de prise de recul vis-à-vis des tâches réalisées au quotidien. En effet, il convient de faire abstraction de la structure fonctionnelle de l'entreprise en regroupant des activités en domaines de connaissances.

Le point central du recensement des connaissances est le cœur de métier de l'entreprise qui correspond à la connaissance qui définit le patrimoine stratégique ou clés des savoirs des collaborateurs impliqués dans le périmètre. Selon le périmètre et le nombre de personnes à rencontrer, cette étape est plus ou moins longue. A chaque nouvelle réunion,

il faut être vigilant à ce que les éléments recueillis précédemment soient parfaitement validés.

### 3.3 Etape de construction de la grille d'évaluation de la criticité

La troisième étape, qui peut être réalisée en parallèle au repérage, a pour but de définir la grille des critères de pertinence (P) et de vulnérabilité (V) retenus et choisis comme étant les plus adaptés à l'organisation, selon sa culture et au contexte du moment pour réaliser l'évaluation de la criticité et donc l'analyse.

Les critères à sélectionner pour l'évaluation ne sont pas simples à définir. Si la vulnérabilité est généralement liée à la rareté ou à l'usage d'une connaissance, sa pertinence est, quant à elle, liée à son utilité ou à son importance, autant d'aspects qui peuvent se référer tant au contenu de la connaissance qu'à sa nature. Compte-tenu de la grande diversité de critères possibles, nous avons choisi de nous inspirer d'un ensemble de réflexions élaborées d'une part dans un groupe de travail du club gestion des connaissances ([www.club-gc.asso.fr](http://www.club-gc.asso.fr)) [2] et d'autre part par Françoise Rossion qui imagine un calcul par pondération, en tenant compte de l'âge des détenteurs, de la rotation, de la complexité du domaine, etc. [6].

Ainsi, évaluer la criticité d'une connaissance revient à évaluer deux scores : un score de vulnérabilité (V) (liée à sa disponibilité, sa complexité, sa transmissibilité, etc.) et un score de pertinence (P) qui n'est autre que le reflet du degré d'importance que revêt la perte d'une connaissance dans une entreprise en regard d'objectifs ou d'axes stratégiques établis.

Chaque score est évalué sur n critères (entre 3 et 4) de pertinence et de vulnérabilité, le produit des deux scores donne alors une bonne indication de la criticité de la connaissance.

Pour l'estimation du score de vulnérabilité d'une connaissance, nous retiendrons par exemple les critères suivants :

- **Sa disponibilité** : correspondant au nombre de personnes détenant la connaissance
  - *Rang 1* : forte disponibilité (connaissance détenue et maîtrisée par beaucoup de personnes),
  - *Rang 2* : disponibilité moyenne (connaissance détenue par un faible nombre de spécialistes, peu ou faiblement disponibles),
  - *Rang 3* : disponibilité faible (connaissance détenue par un seul expert pouvant être indisponible).
- **Sa transmissibilité** : facilité à transmettre la connaissance car faible niveau d'expertise requis, liée également à sa complexité : plus une connaissance est complexe plus il y a de chance qu'elle soit difficile à transmettre
  - *Rang 1* : transmissibilité forte (connaissance facile à transmettre),
  - *Rang 2* : transmissibilité moyenne (connaissance compliquée à transmettre mais réalisable)

au moyen de formation, utilisation de méthodes et modèles adéquats pour expliquer),

- *Rang 3* : transmissibilité faible (connaissance très difficile à transmettre).
- **Sa confidentialité** : il s’agit du niveau de confidentialité de la connaissance
  - *Rang 1* : confidentialité nulle (connaissance du domaine public),
  - *Rang 2* : confidentialité moyenne (connaissance de diffusion restreinte à l’équipe, au département ou l’entreprise),
  - *Rang 3* : confidentialité forte (connaissance confidentielle dont la diffusion est soumise à des règles strictes).

Pour l’estimation du degré d’importance de la perte d’une connaissance, nous retiendrons par exemple les critères de pertinence suivants :

- **Son utilisation** : le niveau d’utilisation d’une connaissance dans l’entreprise
  - *Rang 1* : utilisation faible (l’utilisation de la connaissance est faible et irrégulière dans son domaine d’application),
  - *Rang 2* : utilisation moyenne (l’utilisation de la connaissance se fait de manière régulière par les personnes concernées),
  - *Rang 3* : utilisation forte (l’utilisation de la connaissance par de nombreuses personnes est régulière).
- **Son adéquation** : son niveau d’adéquation avec les missions de l’entreprise
  - *Rang 1* : adéquation faible (connaissance non spécifique, non stratégique et plutôt générique)
  - *Rang 2* : adéquation moyenne (connaissance impliquée dans la spécificité de l’entreprise mais pouvant être substituée)
  - *Rang 3* : adéquation forte (domaine de connaissance prioritaire dans la stratégie, connaissance incontournable dans le domaine qui ne peut être maîtrisé sans elle).
- **Son importance historique** : connaissance qui a été importante, considérée comme résultante d’une accumulation dans le temps ou en adéquation avec la stratégie de l’entreprise par le passé, avec la perspective d’être potentiellement “réveillée” dans le futur
  - *Rang 1* : importance faible (connaissance récente, historique non marqué),
  - *Rang 2* : importance moyenne (la connaissance des principaux jalons historiques sont suffisants pour comprendre la connaissance),
  - *Rang 3* : importance forte (on ne peut la comprendre sans connaître son historique).

### 3.4 Etape d’évaluation et d’analyse de la criticité des connaissances

L’ultime étape consacrée à l’évaluation et l’analyse de la criticité vise à mettre en évidence le caractère critique des connaissances au travers d’ateliers thématiques réalisés avec les experts du domaine de connaissances considéré. Cette analyse réalisée à un instant “t” correspond à une sorte de “photo” de la criticité des connaissances du domaine.

Lors de ces ateliers, chaque connaissance, repérée et qualifiée dans l’étape 2, est évaluée en regard des critères choisis. Ainsi, un des 3 rangs possibles est choisi par critère comme étant le plus représentatif pour la connaissance, pondéré d’un facteur apprécié selon le niveau d’importance que revêt ce critère. Les scores de vulnérabilité et de pertinence sont calculés selon la méthode des moyennes pondérées et la valeur de la criticité calculée par la formule :

$$C = V \times P.$$

Selon les valeurs possibles prises par les scores de vulnérabilité et de pertinence, il est donc possible de placer sur une carte de chaleur (Figure 2), matrice à double entrée, la valeur de la criticité prise par chaque connaissance évaluée.

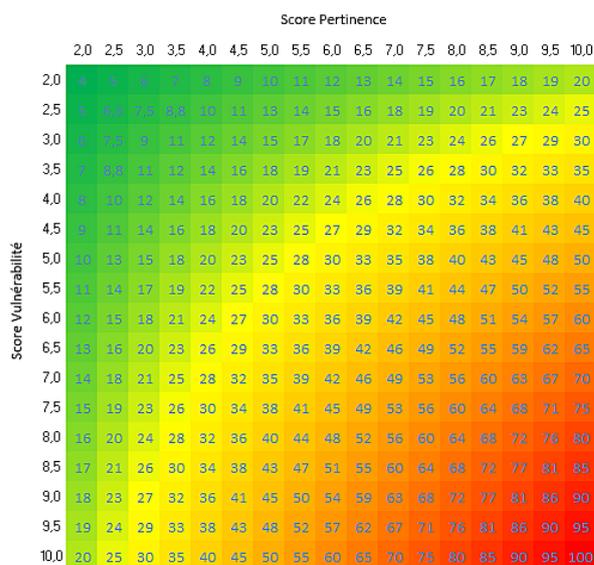


FIGURE 2 – Carte de chaleur pour visualiser des connaissances critiques

Ainsi, les connaissances, représentées par des billes sont placées sur la carte selon leurs scores de V et de P, les connaissances les plus critiques se retrouvent placées dans la zone rouge de la matrice, les connaissances les moins critiques dans le vert foncé.

A noter qu’une connaissance peut être très vulnérable sans pour autant être pertinente ou inversement, être très pertinente mais peu vulnérable, auquel cas la connaissance se retrouve placée au niveau des coins en bas à gauche ou

en haut à droite de la matrice, et la décision de mettre en place une action ou pas sera appropriée. Nous souhaitons, en utilisant ce format de carte, proposer à nos interlocuteurs acteurs, décideurs ou managers, un résultat très visuel facilement appropriable, partageable et compréhensible par tous.

Dans la Figure 3 est donnée un exemple de matrice de chaleur avec le positionnement de 4 connaissances dont le niveau de criticité a été évalué.

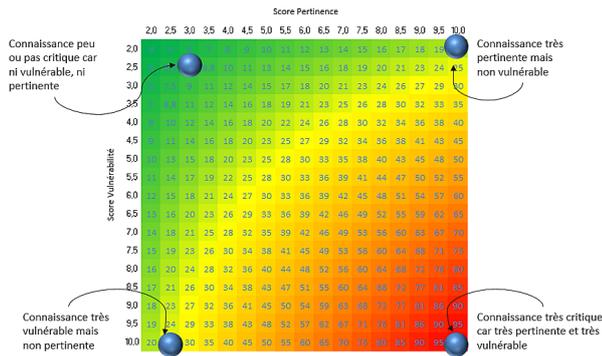


FIGURE 3 – Matrice de chaleur avec 4 connaissances dont le niveau de criticité est évalué

Plus la criticité d'une connaissance est élevée, plus elle nécessite à court terme une action de gestion des connaissances pour la pérenniser et en assurer la maîtrise. Une connaissance non critique lors de l'évaluation est simplement à surveiller dans le temps au risque de le devenir suite à des changements intervenus dans l'organisation. Là où l'analyse doit être plus attentive, c'est lorsque les connaissances se trouvent dans le "jaune" (jaune, jaune-vert ou jaune-orangé) de la carte de chaleur, c'est à dire la zone médiane ou dans les coins en bas à gauche (connaissance très vulnérable mais peu pertinente) et en haut à droite (connaissance très pertinente mais peu vulnérable). Il convient alors d'identifier le/les critère(s) à l'origine de ce positionnement, critère dont la valeur sera un bon élément pour décider si agir ou pas et comment.

Cette étape est clôturée par la remise à l'équipe projet d'un rapport d'analyse où seront identifiées les pistes d'amélioration et proposées les actions de gestion des connaissances les plus appropriées à entreprendre pour réduire les niveaux de criticité élevés, les améliorer si possible et surveiller les connaissances dont les niveaux sont dans la moyenne. Ce rapport prend bien évidemment en compte le contexte de l'entreprise et résulte d'un échange avec les parties prenantes afin de proposer des actions pertinentes et réalistes dont il conviendra d'évaluer les répercussions humaines, financières et organisationnelles.

## 4 Résultats : retour d'expérience dans l'industrie

### 4.1 Contexte de travail

Nous avons réalisé courant 2015-2016, selon la démarche décrite ci-dessus, une opération pilote d'ingénierie de la connaissance auprès d'un département de la R&D d'un industriel leader technique mondial sur son métier. Ce département, composé d'une vingtaine de collaborateurs répartis en deux entités venait de changer de responsable qui connaissait assez peu les connaissances de l'ensemble de ses équipes. Notamment leur déclinaison en termes de savoirs, savoir-faire ou savoir-être. Ce département, outre la responsable du département comporte 2 managers opérationnels en charge des 2 entités au sein desquelles sont retrouvés 3 types de postes (A, C, R).

Les 3 objectifs mis en avant par l'équipe en charge du projet étaient de :

- Définir ce que pouvait être "objectivement" la criticité d'une connaissance pour la R&D de cet industriel.
- Situer la démarche de cartographie des connaissances critiques par rapport aux autres démarches existantes en interne (démarche qualité, GPEC).
- Définir un mode d'évaluation pour repérer les domaines de connaissance les plus critiques dans la cartographie des connaissances élaborée au préalable pour prendre des décisions et définir des actions.

A noter que cette opération a été menée dans le cadre d'une démarche interne globale de gestion des connaissances "interne & externe" associée à de la *competitive intelligence*.

### 4.2 Déroulement de l'opération

Le lancement de la mission a eu lieu courant avril 2015. Un point d'avancement a été réalisé fin juillet avec l'équipe projet à l'issue du repérage des connaissances du département.

Nous avons alors réalisé 2 ateliers pour le cadrage (étape 1) et 3 ateliers pour l'identification (étape 2). A la rentrée nous avons défini la grille de critères (choix des critères de vulnérabilité et des critères de pertinence) au cours d'un atelier de 3 heures.

Compte-tenu de la faible disponibilité des membres de l'équipe, les ateliers ont eu une durée moyenne de 3-4 heures et nous avons sollicité les experts uniquement pour l'évaluation de la criticité des connaissances (étape 4) sur un seul atelier d'une journée complète courant novembre. La présence des participants est résumée dans la Figure 4. Après avoir transmis le rapport d'analyse à l'équipe avant la fin de l'année, la réunion bilan s'est tenue au cours du mois de janvier 2016.

### 4.3 Déroulement des ateliers

Chaque atelier a débuté par la présentation et/ou un rappel des objectifs de l'étape par Ardans. Ensuite un temps

Ateliers	Etape 1	Etape 2	Etape 3	Etape 4
Chef de service	X	X	X	X
Manager*	X	X	X	X
Expert**				X

\*Manager : personne responsable d'une entité

\*\*Expert : personne désignée par le manager comme « sachant » du métier

FIGURE 4 – Présence des participants aux ateliers sur les 4 étapes

d'échange avec les participants a été consacré aux questions/réponses afin de clarifier et compléter la présentation le cas échéant.

Ensuite, selon les actions à mener, un moment de réflexion a été consacré à l'organisation des idées, la mise en forme de réponses par les participants. Une démarche participative a toujours été recherchée et les ajustements nécessaires ont été apportés.

Enfin, une mise en commun et un partage des réflexions a eu lieu avant une restitution des éléments validés en atelier.

#### 4.4 Résultats obtenus

L'étape 1 a circonscrit le périmètre de l'analyse aux missions du département.

L'étape 2 a repéré une cinquantaine de connaissances au total, toutes directement en rapport avec les missions (lettre de mission du département). Cette identification s'est aussi appuyée sur les fiches de postes des trois métiers représentés au sein du département.

L'étape 3 a permis de construire la grille d'analyse avec 3 critères de vulnérabilité (le leadership, la disponibilité et la transmissibilité) et 3 critères de pertinence (l'importance des sources, la création de valeur et l'émergence). L'évaluation de la criticité a été produite en présence d'une équipe projet élargie aux sachants et experts du domaine et représentatifs des 3 postes A, C et R.

La carte de chaleur obtenue avec le positionnement des connaissances est donnée dans la Figure 5.

A noter que la taille des billes placées sur la carte est en rapport direct avec le nombre de connaissances présentant le même niveau de criticité. Ainsi, plus la bille est grosse, plus il y a de connaissances ayant ce niveau de criticité pour un même score de pertinence et de vulnérabilité. Sur la carte ci-dessus, nous visualisons 3 tailles de billes, la plus petite correspondant à une connaissance, la plus grosse à 3 connaissances présentant le même niveau de criticité. Compte-tenu du fait que notre recensement des connaissances clés s'est fait selon le type de poste A, C ou R présent dans le département, nous avons su présenter le résultat de l'évaluation à l'aide d'un code couleur différenciant soit sur une seule carte de chaleur avec répartition par poste (Figure 6) soit une carte de chaleur avec répartition par poste par poste (Figure 7).

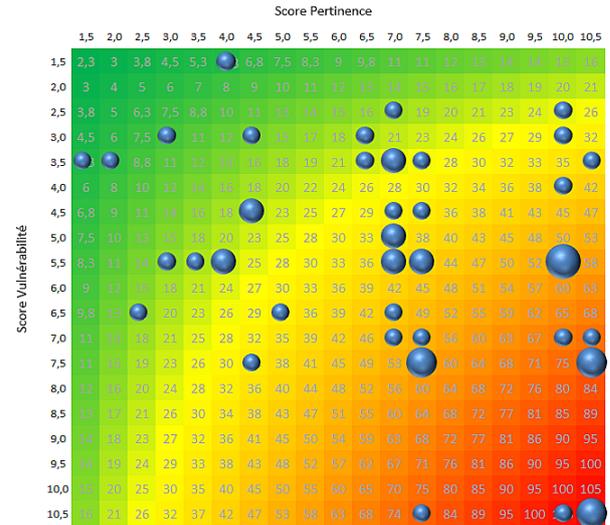


FIGURE 5 – Matrice de chaleur avec connaissances critiques d'une entité R&D d'un industriel

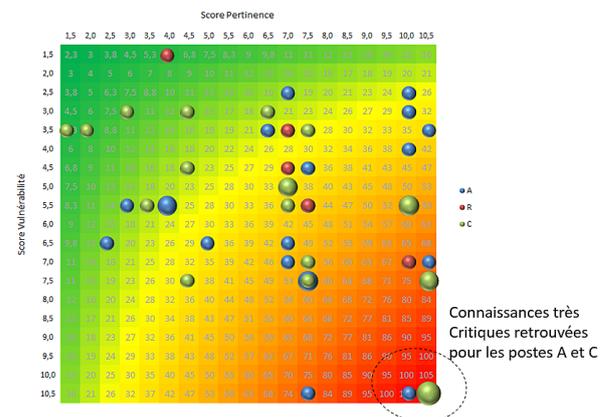


FIGURE 6 – Matrice de chaleur globale avec répartition par poste

Nous avons ainsi observé que sur l'ensemble du patrimoine de connaissances étudié, environ 8% se sont révélées être très critiques et un peu plus de 15% se sont retrouvées dans la zone de criticité "action attendue" (zone rouge). L'analyse des scores de vulnérabilité et de pertinence de ces connaissances a naturellement conduit les managers à choisir les actions les plus appropriées de recueil et/ou de transfert notamment.

## 5 Notre démarche dans la singularité d'un cadre industriel

### 5.1 Points positifs

En préalable à l'opération, avoir eu la possibilité de préparer les premiers éléments de réflexion sur le périmètre grâce à la lettre de mission du département et les fiches de postes, etc.) a fait gagner du temps lors de l'étape de ca-

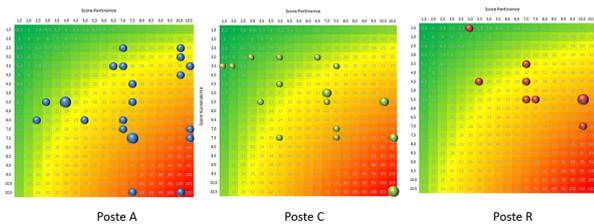


FIGURE 7 – Matrice de chaleur avec répartition poste par poste

drage (étape 1).

De même, en partant de la lettre de mission du département, aucun trou dans les activités répertoriées n'a été constaté. Notre méthodologie de cartographie et d'évaluation a été validée par l'équipe et qualifiée comme claire. Les objectifs méthodologiques et de création de valeur ont été atteints pour l'équipe qui a mis en avant un déroulement efficace des ateliers dédiés au recueil et à l'identification des connaissances grâce à une préparation préalable et une animation participative.

Enfin l'atelier d'évaluation de la criticité réalisé (étape 4), avec l'ensemble des experts, sur une journée en mode "plateau repas" s'est avérée être le format idéal pour un juste temps consacré et un maintien de la dynamique auprès des participants.

## 5.2 Points à améliorer

Dans l'identification et le repérage des connaissances, l'équipe aurait souhaité au final pouvoir accentuer plus l'origine de certaines connaissances du département.

Lors de l'étape 3, une grande vigilance doit être apportée à la formulation des intitulés des rangs possibles pour chaque critère. Il est impératif qu'ils soient non ambigus et exprimés en une phrase afin d'être partagés ; c'est pourquoi il est également essentiel de les adapter au contexte de l'entreprise. De même, il convient de valider le choix des critères de pertinence et vulnérabilité retenus sur quelques connaissances prises au hasard afin de s'assurer de leur adéquation sur le patrimoine dans le contexte de l'opération.

## 5.3 Discussion

Par une approche pragmatique de repérage et de qualification des connaissances, sur un périmètre fini et défini au préalable, nous réalisons une carte à un instant "t". Le repérage et l'évaluation de la criticité sont réalisés dans un délai relativement court, compte-tenu du fait que les organisations bougent (départs en retraite, turn-over, réorganisations, etc.) et dans certains cas les métiers peuvent évoluer rapidement. Ainsi, une nouvelle évaluation doit être réalisée à distance d'une période raisonnable, afin de valider l'efficacité des actions mises en oeuvre et visant à réduire les niveaux de criticité les plus élevés.

Si la présence des "sachants" (experts ou spécialistes du domaine) a son importance lors de l'évaluation des critères

de vulnérabilité et de pertinence, car ce sont eux les détenteurs des connaissances, il est important qu'elle se fasse aussi en présence des managers, pour confronter la vision des opérationnels à celle des managers, avec le regard stratégique. Il est très important de sensibiliser l'équipe projet participant à l'évaluation des critères de l'étape 4 (évaluation de la criticité), sur l'importance de bien faire la part des choses entre la réalité (rang réel de la connaissance) et l'attendu (rang souhaité pour la connaissance). L'opération a confirmé que le nombre de critères V ou P doit idéalement être inférieur ou égal à 4, ceci afin de ne pas mettre en oeuvre une étape d'évaluation chronophage, épuisante pour les acteurs ou imposant des délais de réalisation trop longs.

Pour éviter de fausser l'évaluation de la criticité, le choix des critères d'évaluation doit se porter sur les plus pertinents pour le contexte opérationnel. Par cette assertion nous partageons le même retour d'expérience que ceux précédemment publiés [1][2][6].

Si notre approche à l'aide d'une carte de chaleur est très "lisible", on se rend bien compte que le nombre de connaissances évaluées doit pour autant être fini afin de conserver cette lisibilité (dans le retour d'expérience présenté nous avons identifié une cinquantaine de connaissances qui ont été évaluées et représentées sur la carte globale). Il est ainsi intéressant de repérer les postes, voire les personnes, dont les connaissances sont critiques. Ce type de carte délivre une vision holistique ou particulière de la criticité d'un patrimoine. On sait ainsi repérer rapidement si un niveau de criticité est dû à une grande vulnérabilité ou à une forte pertinence. De même, il est possible pour des connaissances très critiques d'analyser les critères qui en sont responsables et de creuser le pourquoi, afin de cibler et sélectionner l'action la plus appropriée.

Enfin, concernant la traduction des notions "connaissances" en valeurs numériques pour les positionner sur la matrice, il est important d'accompagner les lectures lors des restitutions ; ne serait-ce que pour conserver le "pourquoi" de l'évaluation des différents rangs des différents critères. De la même façon qu'une justification fonde la validation d'une connaissance, il est nécessaire de bien tracer les raisons des choix qui prévalent à la transformation numérique des notions représentées sur la carte.

## 6 Conclusion

Le choix d'un sujet pour l'initialisation de la mise en place d'une action de gestion des connaissances est un sujet délicat dans les entreprises.

Lorsque le climat humain est propice à l'implantation d'une telle opération, il est pertinent de lancer une opération d'analyse de la criticité des connaissances auprès des acteurs qui contribuent à la mission métier de l'entité dans l'organisation.

L'article a démontré qu'une approche pragmatique fédère les acteurs de l'entité autour de l'objectif de discernement des natures des connaissances qui contribuent à la maîtrise

du domaine métier. A partir du recensement produit, de la qualification des différents éléments émerge une hiérarchie de leur caractère critique. L'analyse associée délivre un ciblage clair pour décider de la forme d'action requise et des ressources associées.

Le résultat produit par la démarche constitue pour les managers une formalisation d'une réalité métier au-delà d'une prise de conscience des forces et faiblesses de la situation constatée. La cartographie révèle par son objectivité, sa clarté, une lecture partagée qui décline une démarche managériale argumentée pour pérenniser les savoirs, savoir-faire et connaissances cruciales de l'entité nécessaire pour garantir la bonne exécution de la mission collective.

Depuis la rédaction de cet article, il s'avère que l'exécution d'une action de "ciblage de la connaissance" constitue aussi un levier de motivation supplémentaire pour les acteurs impliqués à s'engager et à contribuer à la mise en place d'un dispositif de gestion des connaissances au sein de leur organisation.

## Références

- [1] G. Aubertin, I. Boughzala et J-L. Ermine, Cartographie des connaissances critiques, *Revue des sciences et technologies de l'information*, pp. 495-502, 2003.
- [2] J-L. Ermine, Valoriser les connaissances critiques d'une entreprise. *IC2*, pp 107-125, 2004.
- [3] J-L. Ermine, Un modèle formel pour la gestion des connaissances - Management et ingénierie des connaissances, modèles et méthodes, *Hermès-Lavoisier*, 2008.
- [4] M. Grundstein, Le Management des Connaissances dans l'Entreprise : problématiques, axes de progrès, orientations, *MG Conseil*, 2002.
- [5] M. Grundstein, I. Saad et C. Rosenthal-Sabroux, Une méthode d'aide à l'identification des connaissances cruciales pour l'entreprise, *Système d'information et de management*, 2009.
- [6] F. Rossion, Transfert des savoirs : Stratégies, moyen d'action, solutions adaptées à votre organisation, *Hermès-Lavoisier*, 2008.
- [7] A. Berger, JP. Cotton, Les outils et méthodes de KM exploités au profit d'applications informatiques : un pas vers la fertilisation croisée information & connaissance ?, *21ème Colloque de l'Association Information & Management*, <http://aim.asso.fr/> rubrique "Médiathèque", 2016
- [8] V. Besson, A. Berger, To initiate a corporate memory with a knowledge compendium : ten years of learning from experience with the Ardans method, *Revue des Nouvelles Technologies de l'Information, Extraction et Gestion des Connaissances*, RNTI-E- 28, pp. 401-412, <http://editions-rnti.fr/?inprocid=1002103>, 2015
- [9] F. Vexler, A. Berger, JP. Cotton, A. Belloni, Eléments d'appréciation et d'analyse d'une base de connais-

sance : l'expérience industrielle d'Ardans, *Atelier aide à la Décision à tous les Etages (AIDE)*, 2013.



# Détection de la fumée et du feu par réseau de neurones convolutifs

Sébastien Frizzi<sup>1</sup> Rabeb Kaabi<sup>2,3,4</sup> Moez Bouchouicha<sup>2,3</sup> Jean-Marc Ginoux<sup>2,3</sup> Farhat Fnaiech<sup>4</sup> Eric Moreau<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Département Génie Biologie- IUT de Toulon, 83957 La Garde, France

<sup>2</sup>Aix Marseille Université, CNRS, ENSAM, LSIS, UMR 7296, 13397 Marseille, France

<sup>3</sup>Université de Toulon, CNRS, LSIS, UMR 7296, 83957 La Garde, France

<sup>4</sup>Université de Tunis, ENSIT, LR13ES03, SIME, 1008, Montfleury, Tunisie

## Résumé

La recherche dans le domaine de la détection du feu et de la fumée devient un sujet de plus en plus traité. Les algorithmes conventionnels utilisent exclusivement des modèles basés sur des vecteurs de caractéristiques. Ces vecteurs restent difficiles à définir et dépendent largement du type de feu observé. Ces méthodes donnent des résultats avec un faible taux de détection et un haut taux de fausse classification. Une approche innovante pour résoudre ce problème est d'utiliser un algorithme permettant de déterminer automatiquement les caractéristiques utiles pour classifier le feu et la fumée. Dans cet article, nous proposons un réseau de neurones convolutif pour identifier le feu et la fumée d'une vidéo en temps réel. Les réseaux de neurones convolutifs ont montré leur grande performance dans le domaine de la classification des objets. Testée sur des séquences vidéos réelles, l'approche proposée atteint une meilleure performance de classification que les méthodes conventionnelles. Ces résultats indiquent clairement que l'utilisation des réseaux de neurones convolutifs pour la détection du feu et de la fumée est très prometteuse.

## Mots Clef

Feu, fumée, détection, réseau de neurones convolutif, apprentissage profond, cartes de caractéristiques, dropout, maxpooling.

## Abstract

Research on video analysis for fire detection has become a hot topic in computer vision. However, the conventional algorithms use exclusively rule-based models and features vector to classify whether a frame is fire or not. These features are difficult to define and depend largely on the kind of fire observed. The outcome leads to low detection rate and high false-alarm rate. A different approach for this problem is to use a learning algorithm to extract the useful features instead of using an expert to build them. In this paper, we propose a convolutional neural network (CNN) for identifying fire in videos. Convolutional neural network are shown to

*perform very well in the area of object classification. This network has the ability to perform feature extraction and classification within the same architecture. Tested on real video sequences, the proposed approach achieves better classification performance as some of relevant conventional video fire detection methods and indicates that using CNN to detect fire in videos is very promising. It's the English version of the abstract.*

## Keywords

Fire and smoke detection, deep learning, convolutional neural network, feature maps, max pooling, dropout

## 1 Introduction

La détection du feu et de la fumée est cruciale pour la protection des personnes. Des dispositifs ont été développés pour prévenir les dommages provoqués par un feu. La majorité de ces dispositifs sont basés sur des capteurs non optiques et se limitent à la détection dans les locaux d'habitations ou commerciaux. La détection de la fumée par ionisation requiert une grande proximité avec le feu. Par conséquent il est impossible de couvrir une large zone et de donner des informations sur la localisation de la naissance d'un incendie, la direction de propagation, l'importance du feu, etc.

La rapide évolution des caméras numériques a permis aux techniques de détections vidéos via l'évolution des ordinateurs de remplacer les méthodes standard de détection du feu et de la fumée. Les techniques de détection vidéo de la fumée et du feu sont particulièrement adaptées en espace ouvert. De plus, ces systèmes offrent la possibilité d'analyser le comportement et la localisation en 3 dimensions du feu. Actuellement les circuits de surveillance vidéos tant en intérieur qu'en extérieur se développent rapidement. Dans ces circonstances, il serait judicieux de développer un dispositif de détection du feu et de la fumée pouvant utiliser ces équipements sans frais.

La recherche dans ce domaine a commencé dans les années 1990. On dénote quelques algorithmes vidéos de détection du feu et des flammes dans la littérature. La majorité de ces algorithmes se concentrent sur les

caractéristiques de couleurs et de formes du feu et de la fumée [1],[2],[3],[4],[5], [6] et [7]. Ensuite, l'objectif fut de construire un vecteur de caractéristiques multidimensionnel utilisé en entrée d'un algorithme conventionnel de classification : SVM, Réseau de neurones, Adaboost, etc. Par conséquent, des experts deviennent indispensables pour créer les règles de base permettant de déterminer les vecteurs de caractéristiques propres à la détection recherchée. Une approche différente et innovante réside dans le fait de ne pas utiliser d'expert pour la construction du vecteur de caractéristique en faisant extraire automatiquement celui-ci par un algorithme d'apprentissage. Les algorithmes d'apprentissage profond possèdent la capacité d'apprendre les caractéristiques utiles à une classification du feu et de la fumée. Les réseaux de neurones convolutifs (CNN) sont de variantes des réseaux profonds et permettent d'extraire les propriétés topologiques d'une image.

Notre approche est conceptuellement simple. Nous utilisons un réseau de neurones convolutifs comme un puissant détecteur du feu et de la fumée dans des images d'une vidéo. L'avantage de cette approche est que cette méthode est insensible au mouvement de la caméra. Le Réseau convolutif opère directement sur les images brutes en RGB dans le spectre du visible. Le réseau convolutif apprend automatique par un ensemble d'images de la base d'entraînement. L'article est organisé de la manière suivante : le paragraphe suivant relate les travaux connexes. Le paragraphe 3 introduit brièvement les réseaux de neurones convolutifs. Le paragraphe 4 quant à lui décrit en détail l'architecture de notre réseau convolutif. Les résultats expérimentaux et la performance se trouvent dans le paragraphe 5. Enfin, le dernier paragraphe discute des limitations de notre méthode et conclut cet article.

## 2 Travaux connexes

Le nombre de documents traitant de la détection de feu vidéo dans la littérature augmente de façon exponentielle. Plusieurs chercheurs ont joué un rôle important dans le développement d'algorithmes de détection de feu par traitement vidéo [6]. Verstockt [1] a proposé un détecteur d'incendie à capteurs multiples qui fusionne les caractéristiques de flammes visuelles et non-visuelles des objets en mouvement. Il a utilisé des images thermiques ordinaires vidéo et infrarouge à ondes longues (LWIR). Tout d'abord, il exploite une soustraction de fond dynamique pour extraire des objets en mouvement. De plus, les objets en mouvement LWIR sont filtrés par segmentation d'objets à chaud basée sur l'histogramme. Un ensemble de caractéristiques de flamme analyse ces objets en mouvement en mettant l'accent sur les caractéristiques géométriques, temporelles

et spatiales distinctives des désordres des régions de flamme. Ensuite, une probabilité de flamme LWIR est calculée en combinant la probabilité du désordre de la fenêtre de délimitation, du désordre d'orientation principal et de la rugosité de l'histogramme des objets en mouvement chaud dans LWIR. Toreyin [2] utilise un algorithme de détection vidéo à quatre étapes. D'abord, il a estimé les pixels et les régions en mouvement en utilisant une méthode de fond hybride: une opération de différenciation à trois images est effectuée pour déterminer des régions de mouvement légitime, suivies d'une soustraction de fond adaptative pour extraire toute la région en mouvement. Deuxièmement, il a utilisé un modèle de mélange gaussien dans l'espace de couleur RVB pour détecter les pixels de couleur de feu. La répartition des couleurs du feu est obtenue à partir d'images échantillonnées contenant des régions de feu. Dans la troisième étape, une transformation en ondelettes temporelles est effectuée pour analyser le scintillement de la flamme. Enfin, une analyse spatiale en ondelettes de régions en mouvement contenant des pixels de masque de feu pour évaluer des variations de couleur en valeurs de pixel est effectuée. Des variations spatiales significatives présupposent la région du feu. Celik [3] a développé deux modèles: un pour la détection d'incendie et l'autre pour la détection de fumée. Un modèle de logique floue basé sur des règles a été utilisé à la place des règles heuristiques existantes. Ce choix a rendu la classification plus robuste en distinguant efficacement le feu et le feu comme des objets colorés. Pour la détection des fumées, une analyse statistique a été effectuée sur la base de l'idée que la fumée présente une couleur grisâtre avec un éclairage différent. Borges [4] a utilisé un vecteur de caractéristiques multidimensionnel comme entrée à un classificateur Bayes. Les caractéristiques sont: la rugosité limite des régions de feu potentiel, le moment statistique du troisième ordre des régions de feu potentiel qui définit l'asymétrie, la variance et enfin la quantité de feu d'un cadre à l'autre (varie en raison de la flamme). Il existe des travaux plus récents inspirés par des recherches antérieures connexes [5], [6]. Comme dit précédemment, toutes ces méthodes sont basées sur la règle ou exigent la construction de caractéristiques discriminantes pour détecter le feu. Une autre solution serait l'utilisation de l'algorithme d'apprentissage en profondeur. Dans la section suivante, nous présentons une variante de l'apprentissage profond: Réseau de neurones convolutifs.

## 3 Réseau de neurones convolutifs

Les réseaux convolutifs ont été introduits pour la première fois par Fukushima [8], il a dérivé une architecture de réseau nerveux hiérarchique inspirée par

le travail de recherche de Hubel [9]. Lecun [10] les a généralisés pour classer les chiffres avec succès et pour reconnaître les numéros de contrôle manuscrit par LeNet-5 qui est montré à la Fig. 1. Ciresan [11] a utilisé les réseaux convolutifs et a réalisé les meilleures performances dans la littérature pour la reconnaissance d'objets multiples pour des bases de données d'images multiples: MNIST, NORB, HWDB1.0, CIFAR10 et l'ensemble de données ImageNet.

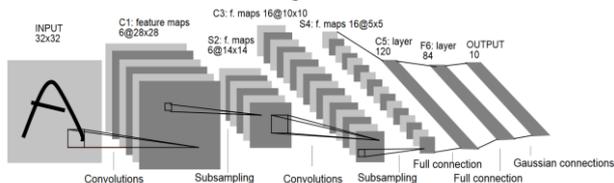


Figure. 1. LeNet-5, un réseau neuronal convolutif pour la reconnaissance des chiffres

Un réseau neuronal convolutif se compose de plusieurs couches. Figure. 2, montre ces différentes couches.

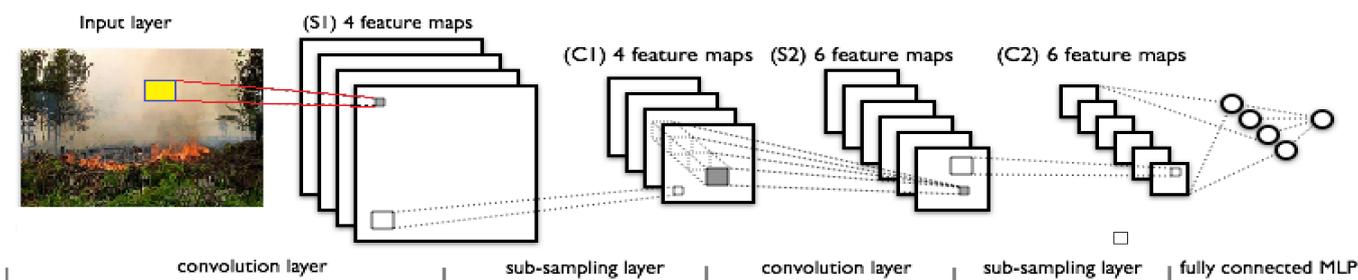


Fig. 2. CNN layers

### 3.1 Couches convolutives

Les couches convolutives constituent le noyau du réseau convolutif. Ces couches se composent d'une grille rectangulaire de neurones qui ont un petit champ réceptif étendu à travers toute la profondeur du volume d'entrée. Ainsi, la couche convolutionnelle est juste une convolution d'image de la couche précédente, où les poids spécifient le filtre de convolution.

### 3.2 Couches de pooling

Après chaque couche convolutive, il peut y avoir une couche de pooling. La couche de pooling sous-échantillonne leur entrée. Il y a plusieurs façons de faire cette mise en commun, comme prendre la moyenne ou le maximum, ou une combinaison linéaire apprise des neurones dans le bloc. Par exemple, la Fig. 3. montre max pooling sur une fenêtre  $2 \times 2$ .

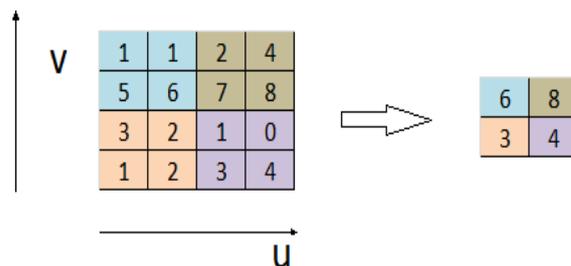


Fig. 3. Max pooling

### 3.3 Couches totalement connectées

Enfin, après plusieurs couches de convolution et pooling, le raisonnement de haut niveau dans le réseau neuronal se fait via des couches totalement connectées.

Dans les réseaux de neurones convolutifs, chaque couche agit comme un filtre de détection pour la présence de caractéristiques spécifiques ou de motifs présents dans les données d'origine. Les premières couches d'un convolutif détectent des caractéristiques qui peuvent être reconnues

et interprétées relativement facilement. Les couches ultérieures détectent de plus en plus des caractéristiques plus abstraites. La dernière couche du réseau convolutif est capable de faire une classification ultra-spécifique en combinant *toutes* les caractéristiques spécifiques détectées par les couches précédentes dans les données d'entrée. Dans la section suivante, l'architecture proposée du réseau convolutif pour le feu vidéo et la détection de fumée est présentée.

## 4 Réseau de neurones convolutifs pour la détection du feu et de la fumée dans une vidéo

### 4.1 La structure

Notre architecture de classification est classique [17], elle combine convolution et Max pooling. Cependant, pour obtenir une classification rapide permettant une classification et localisation en temps réel, nous avons choisi un réseau léger. Figure. 4 montre les neuf couches de notre réseau convolutif.

Une image couleur RVB dans le spectre visible passe successivement par deux opérations convolutives avec noyau de taille 3x3. La même structure est appliquée après la troisième couche. Un Max pooling 3x3 avec le pas 2 suit les couches convolutives deux et cinq. Les couches un à quatre possèdent 16 cartes de caractéristiques. Les couches cinq et six n'ont qu'une seule carte de caractéristiques. La couche sept et huit sont entièrement connectées. La sortie de la dernière couche totalement connectée alimente un Softmax 3 voies produisant une distribution sur 3 classes.

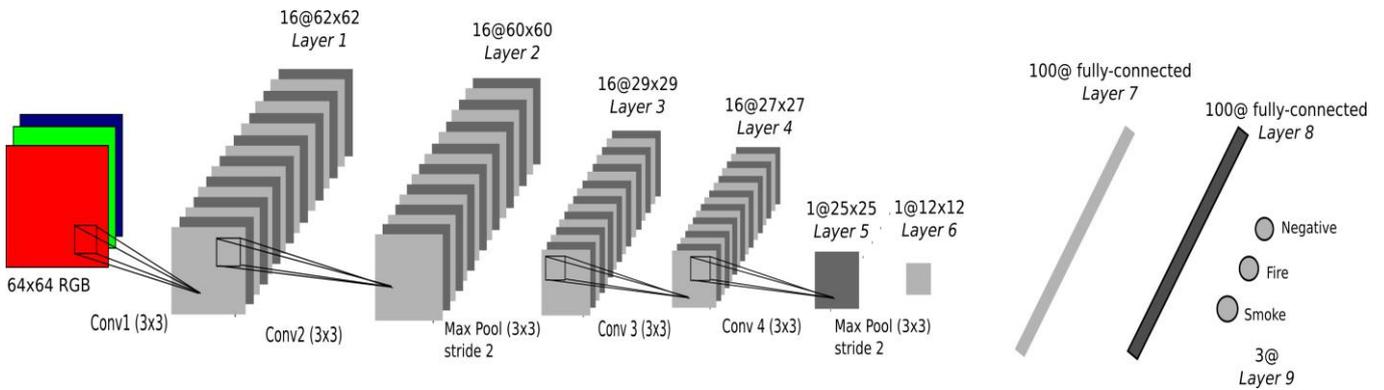


Fig. 4. Architecture de notre réseau convolutionnel

Nous avons choisi [12] et [13] pour les couches convolutives et une entièrement connectée avec une fonction d'activation Leaky ReLu avec coefficient  $a = 1/3$  (voir figure 5).

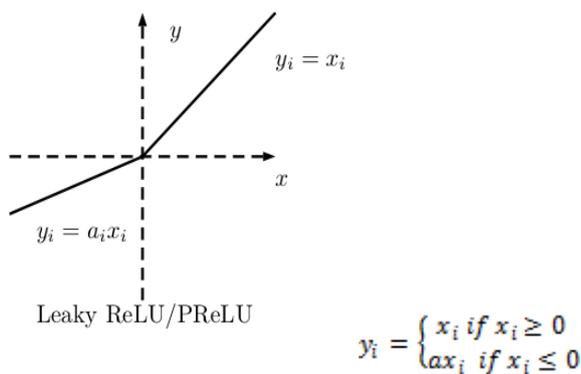


Fig. 5. Leaky ReLu

## 4.2 Entraînement du réseau

L'objectif de notre classification est de décider si une image contient du feu et / ou de la fumée. Pour résoudre ce problème, l'apprentissage du classifieur est réalisé à partir d'une collection d'images dans le spectre du visible en 3 canaux (RVB) étiquetées. En outre, nous voulons

localiser la position du feu et de la fumée dans une image ou dans une vidéo. L'ensemble d'entraînement est composé de 27919 images RVB étiquetées de taille 64x64 pixels. 8915 pour la fumée, 7257 pour le feu et 11752 négatives (pas de feu ou de fumée). Nous créons 3 sous-ensembles: training 60% des images, validation 20% et test 20%. L'entraînement a été réalisé avec un ordinateur composé d'un microprocesseur Intel Xeon (fréquence CPU 3,1Ghz, RAM 16Go) et une carte graphique GTX 980 Ti (2816 cœurs, 6 Go de mémoire). Nous avons utilisé une descente de gradient stochastique (SGD) avec des mini-lots de taille 100. Le poids dans le réseau est initialisé aléatoirement. Le taux

d'apprentissage initial est de 0,01 et le momentum de 0,9. Le taux d'apprentissage diminue d'un facteur 0,95 chaque 5 itérations (epochs). En revanche, le momentum augmente pour atteindre 0,9999. Pour obtenir la meilleure précision possible pour ces paramètres, plusieurs essais ont été effectués. Nous avons implémenté CNN avec Theano [14], [15] et Lasagne [16]. Nous utilisons un dropout de 0,5 dans les deux couches entièrement connectées pour éviter le surapprentissage. L'apprentissage des paramètres du réseau est réalisé sur 100 cycles ou itérations.

## 5 Résultats

La précision de classification sur l'ensemble test est de 97,9%. L'ensemble d'essais est composé de 1427 images d'incendie, 1758 images de fumée et 2399 images négatives, donc 5584 images. Les images de fumée représentent plus une texture que l'objet « fumée » en lui-même. Les tableaux 1 à 3 donnent la matrice de confusion pour chaque classe. Sur la matrice de confusion du feu, les faux négatifs et les faux positifs ne contiennent pas d'images de fumée. De la même manière, la matrice de confusion des fumées ne contient pas d'image de feu pour les faux négatifs et les faux positifs. Nous pouvons conclure que les paramètres de notre modèle de réseau convolutif permettent une bonne distinction de classification entre le feu et la fumée. En

outre, les surfaces sous la courbe ROC (Receiver Operating Characteristic) de la Fig. 6, pour les trois classes sont proches de l'unité, indiquant une bonne classification sur l'ensemble d'essai. La courbe ROC feu a une aire plus grande que les autres, ce qui indique une meilleure classification des performances pour le feu.

TABLE I. CONFUSION MATRIX POUR LE FEU

Fire	True class		
	True	False	
Hypothesis class	True	1400	3 <sup>a</sup>
	False	27 <sup>a</sup>	4154

<sup>a</sup>not smoke images

TABLE II. CONFUSION MATRIX POUR LA FUMÉE

Smoke	True class		
	True	False	
Hypothesis class	True	1698	26 <sup>a</sup>
	False	60 <sup>a</sup>	3800

<sup>a</sup>not fire images

TABLE III. CONFUSION MATRIX POUR LES NEGATIFS (NI FIRE/SMOKE)

No Fire/Smoke	True class		
	True	False	
Hypothesis class	True	2370	87 <sup>a</sup>
	False	29 <sup>b</sup>	3098

<sup>a</sup>Image Fire 27 – image Smoke 60  
<sup>b</sup>Image Fire 3 – image Smoke 26

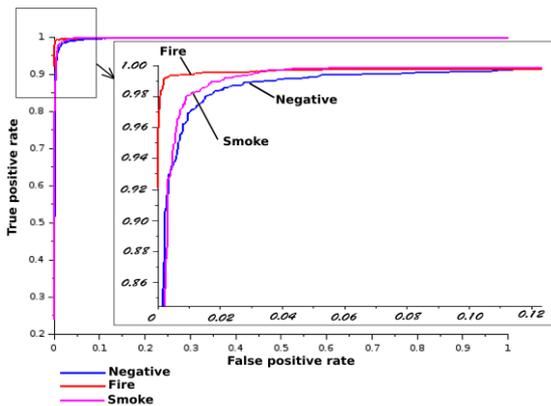


Fig. 6. Courbe ROC pour les 3 classes: fumée, feu et négative

Notre objectif est de détecter en temps réel le démarrage du feu ou de caractériser un incendie sur une vidéo. Le temps de traitement pour la détection est un facteur clé avec la précision. Par conséquent, nous décidons d'utiliser la "structure légère" décrite dans la Fig. 4. Les méthodes actuelles utilisent des fenêtres coulissantes pour détecter et classer l'objet sur des images originales

ou redimensionnées. Chaque fenêtre passe par le réseau de neurones convolutif et les couches totalement connectées pour finir par le classifieur. Pour analyser l'image entière d'un cadre vidéo, la position de la fenêtre doit changer et aller de nouveau à travers le réseau neuronal convolutif. Notre approche est tout à fait différente, au lieu de glisser une fenêtre de 64x64 pixels dans l'image d'origine RGB pour localiser le feu et la fumée; Nous décidons de travailler sur la dernière carte de caractéristiques. Nous divisons le réseau en deux parties. La première partie est composée de 6 couches: 1 à 6 (couches convolutives et Max pooling), la deuxième partie est composée uniquement des entièrement connectées Fig. La figure 7 montre cette architecture CNN.

En utilisant la première partie du réseau, nous évaluons la dernière carte de caractéristiques (couche 6) de l'image entière. Nous savons que sur la base de la structure du réseau de la CNN, une fenêtre coulissante de taille 64x64 pixels dans l'image RVB correspond à une taille de fenêtre de 12x12 pixels dans la dernière carte de caractéristiques. Fig 8.

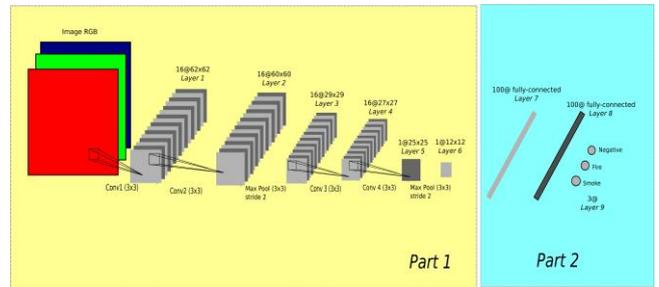


Figure. 7. Deux parties de notre réseau convolutif. Partie 1: 6 couches (convolutives, maxpooling). Partie 2: Deux couches totalement connectées et la couche de sortie.

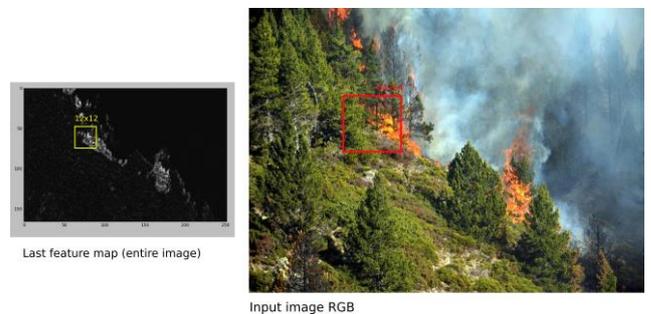


Figure. 8. Fenêtre glissante: Image originale vs Carte des caractéristiques

Pour détecter le feu et la fumée dans l'image d'une vidéo, nous appliquons une fenêtre glissante de taille 12x12

pixels sur la dernière carte de caractéristiques (voir la figure 8). Pour accélérer la prédiction pour chaque fenêtre 12x12 de l'image entière, nous réalisons un tenseur 12x12x1xN (N: nombre de fenêtres permettant la détection du feu ou de la fumée) à partir de la dernière carte de caractéristiques et nous utilisons le GPU de la carte graphique. Avec cette méthode, la précision semble inchangée et la vitesse de détection et de prédiction augmentent en fonction de la taille d'origine de l'image et du nombre de fenêtres à prédire comme représenté sur la Fig. 9. et Fig. 10.

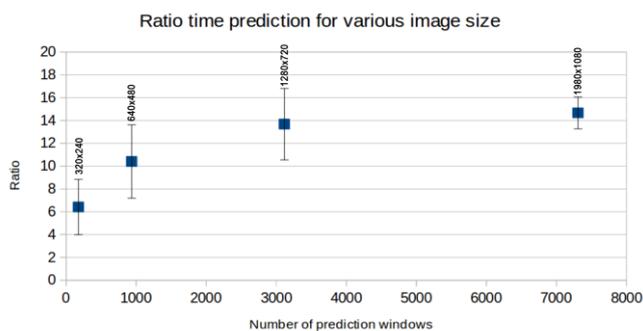


Figure. 9. Ratio du temps de prédiction pour différentes tailles d'image.

Ratio = (temps de prédiction pour l'image originale entière) / (temps de prédiction sur la dernière carte de fonction + temps pris pour réaliser la dernière carte de caractéristique). Fenêtres glissantes par pas de 16px

sur l'image originale et 4px sur la dernière carte de caractéristiques. Expérience réalisée sur 200 images d'une vidéo.

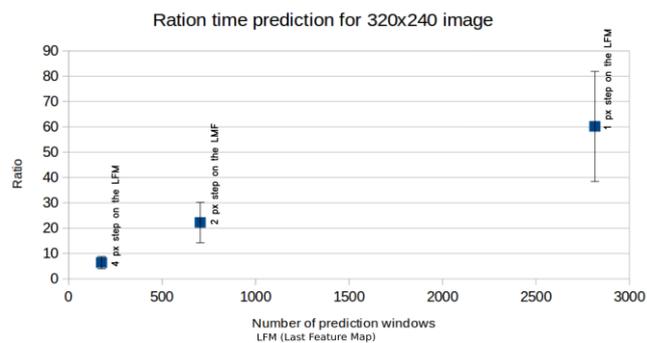


Figure. 10. Ratio du temps de prédiction pour une taille d'image 320x240 avec différent pas de glissement. Expérience réalisée sur 200 images d'une vidéo.

La classification et la localisation affichée à la Fig. 11 et 12, a été effectuée en faisant glisser une fenêtre de 12x12 sur la carte de caractéristique par pas de 2 pixels. Figure. 9.1 (c) et la Fig. 9.2. C) décrivent le masque de détection et de localisation. La couleur rouge représente l'incendie détecté et la couleur verte représente la fumée détectée. L'intensité des couleurs rouge et verte varie en fonction de la probabilité de détection de feu et / ou de fumée. La localisation du feu et de la fumée dans la carte des

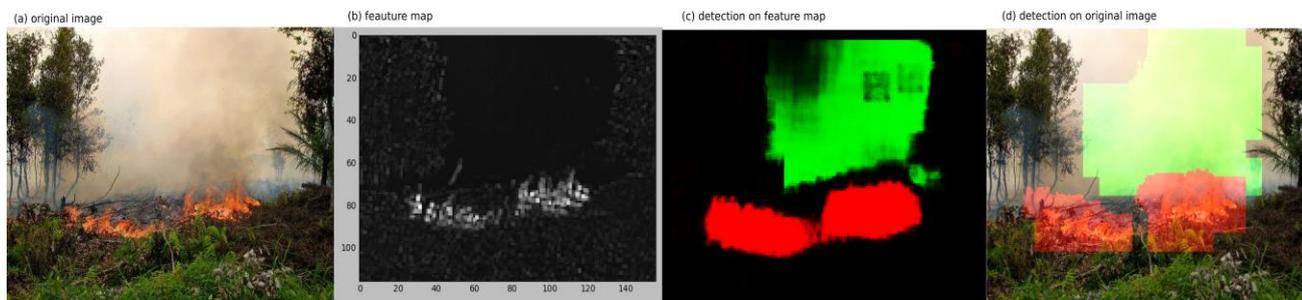


Fig. 11. Feu/fumée détection sur une image de forêt

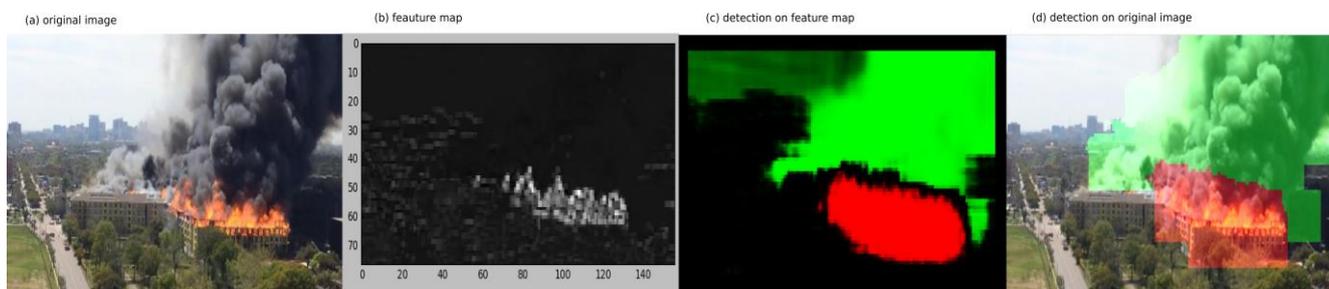


Fig. 12. Feu/fumée détection sur une image d'immeuble

caractéristiques permet de projeter ces positions sur l'image RVB originale (Rectangles rouge et vert).

## 6 Conclusion

Dans cet article, une méthode de détection de fumée et de feu dans le spectre du visible a été présentée. L'algorithme proposé utilise une approche d'apprentissage profond basée sur le réseau neuronal convolutif. La matrice de confusion et les courbes ROC indiquent une très bonne précision globale pour l'étape de détection. Nous avons montré que notre méthode de travail sur la dernière carte de caractéristique permet de diminuer le temps de prédiction d'un facteur allant de 6 à 60.

Dans les travaux futurs, nous souhaitons améliorer la méthode en utilisant un réseau de neurones convolutionnels 3D pour prendre en compte la dynamique temporelle dans notre modèle. En effet, le réseau convolutif est actuellement limité à gérer les entrées 2D qui nous amènent à traiter l'entrée vidéo seulement image par image. En revanche, le réseau convolutif 3D extrait des caractéristiques spatiales et temporelles en effectuant des convolutions 3D. Ainsi, l'information de mouvement du feu et de la fumée pourrait être encodée, ce qui permettrait de diminuer considérablement le temps de détection. De plus, pour optimiser la détection et la localisation de la fumée et du feu sur une vidéo, nous devons améliorer notre base d'image. La fumée est plus difficile à détecter et à localiser en raison de la nature de sa forme et de sa texture. Nous pourrions améliorer cette détection en augmentant la taille du réseau ou en ajoutant des images de l'objet « fumée » dans la base d'apprentissage. Notre modèle ne détecte que le feu rouge, pour détecter d'autres couleurs de feu, nous devons augmenter notre base d'image avec d'autres couleurs de feu telles que bleue, etc ... En outre, nous prévoyons de comparer notre algorithme aux méthodes conventionnelles sur une plus grande variété des images de feu vidéo: différents matériaux, sources et ventilations. Enfin, une approche intéressante serait de coupler notre réseau convolutionnel dans le spectre du visible avec une image infrarouge dans la bande LWIR afin de focaliser notre recherche dans une zone déterminée de l'image. Ceci permettrait également de différencier la fumée et les nuages.

## References

- [1] S. Verstockt, A. Vanoosthuyse, S. Van Hoecke, P. Lambert, and R. Van de Walle, Multi-sensor fire detection by fusing visual and non-visual flame features, In Proceedings of International Conference on Image and Signal Processing, June 2010, pp. 333–341.
- [2] B. U. Toreyin, Y. Dedeoglu, U. Gudukbay, A. E. Cetin, Computer vision based method for real-time fire and flame detection, Pattern recognition letters, 2006, 27, 1, pp. 49-58.
- [3] T. Çelik, H. Özkaramanlı and H. Demirel, Fire and smoke detection without sensors: Image processing based approach, *Signal Processing Conference, 2007 15th European*, Poznan, 2007, pp. 1794-1798.
- [4] K. Borges, P. Vinicius, J. Mayer and E. Izquierdo, Efficient visual fire detection applied for video retrieval, *Signal Processing Conference, 2008 16th European*, IEEE, 2008.
- [5] K. Poobalan and S. Liew, Fire detection algorithm using image processing techniques, Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Artificial Intelligence and Computer Science (AICS2015), October 2015, pp. 160-168
- [6] P. Gomes, P. Santana and J. Barata, A vision-based approach to fire detection, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 09-2014.
- [7] E. Çetin et al, Video fire detection – Review, *Digital Signal Processing*, Volume 23, Issue 6, December 2013, pp. 1827-1843
- [8] K. Fukushima, Neocognitron: A self-organizing neural network model for a mechanism of pattern recognition unaffected by shift in position. *Biological Cybernetics*, 1980, 36(4), pp.193–202.
- [9] D. H. Hubel and T. N. Wiesel, Ferrier lecture: Functional architecture of macaque monkey visual cortex, *Proceedings of the Royal Society of London, Series B, Biological Sciences*, 1977, 198(1130):pp. 1–59.
- [10] Y. Lecun, L. Bottou, Y. Bengio and P. Haffner, Gradient-based learning applied to document recognition, in *Proceedings of the IEEE*, vol. 86, no. 11, pp. 2278-2324, Nov 1998.
- [11] D. Ciresan, U. Meier; J. Masci; L.M. Gambardella and J. Schmidhuber, *Flexible, High Performance Convolutional Neural Networks for Image Classification*, *Proceedings of the Twenty-Second international joint conference on Artificial Intelligence-Volume Volume Two 2: pp. 1237–1242, November 2013*.
- [12] X. Bing, N. Wang, T. Chen and M. Li, Empirical Evaluation of Rectified Activations in Convolutional Network, *CoRR abs/1505.00853 (2015): n. pag.*
- [13] A. L. Maas, A. Y. Hannun and A. Y. Ng, Rectify nonlinearities improve neural network acoustic model, *ICML 2013 Workshop on Deep Learning for Audio, Speech, and Language Processing*, June 2013, Atlanta
- [14] F. Bastien, P. Lamblin, R. Pascanu, J. Bergstra, I. Goodfellow, A. Bergeron, N. Bouchard, D. Warde-Farley and Y. Bengio. "Theano: new features and speed improvements". *NIPS 2012 deep learning workshop*.
- [15] J. Bergstra, O. Breuleux, F. Bastien, P. Lamblin, R. Pascanu, G. Desjardins, J. Turian, D. Warde-Farley and Y. Bengio. "Theano: A CPU and GPU Math Expression Compiler". *Proceedings of the Python for Scientific Computing Conference (SciPy) 2010. June 30 - July 3, Austin*
- [16] LASAGNE, Lightweight library to build and train neural networks in Theano, <https://github.com/Lasagne/Lasagne>, 13 August 2015.
- [17] S. Frizzi, R. Kaabi, M. Bouchouicha, J. M. Ginoux, E. Moreau and F. Fnaiech, "Convolutional neural network for video fire and smoke detection," *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Florence, 2016, pp. 877-882.



# Formalisation et résolution d'un problème en Santé Animale avec le cadre Leader-Follower MDP

A.-F. Viet<sup>1</sup>

C. Belloc<sup>1</sup>

R. Sabbadin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> BioEpAR, INRA, Oniris, Nantes

<sup>2</sup> MIAT, INRA, Toulouse

anne-france.viet@oniris-nantes.fr ; catherine.belloc@oniris-nantes.fr ; regis.sabbadin@inra.fr

## Résumé

*Le contrôle des maladies transmissibles est une préoccupation majeure du secteur des productions animales. Pour les maladies non réglementées, chaque éleveur décide la mise en place éventuelle d'actions de maîtrise. Pour aider à la coordination entre éleveurs, des organisations proposent des approches collectives de maîtrise, s'appuyant sur des incitations. Nous souhaitons concevoir un outil d'aide à la coordination, basé sur le cadre des Leader-Follower Markov Decision Processes (LF-MDP). La résolution exacte étant difficile, nous avons proposé des méthodes de résolution exacte et approchée (basée sur l'agrégation d'états). Nous avons appliqué ces méthodes sur le cas d'étude du virus du Syndrome Dysgénésique Respiratoire Porcin. La résolution exacte a pu être effectuée jusqu'à  $n = 20$  suiveurs. La résolution approchée a pu être effectuée jusqu'à  $n = 100$  suiveurs et les solutions exacte et approchée sont proches pour  $n \leq 20$ .*

## Mots Clef

Epidémiologie animale, Processus Décisionnel de Markov, Théorie des jeux

## Abstract

*Transmissible disease control is a major concern for the livestock sector. For unregulated diseases, each farmer chooses to implement control actions. To help coordination between farmers, organizations propose collective control approaches using incentives. Our objective is to design a tool, based on the Leader-Follower Markov Decision Processes framework (LF-MDP), to help coordination. Exact solution is hard, however we have proposed an exact solution method and an approximate (using state aggregation) one. We have applied these methods to a case study concerning the Porcine Reproductive and Respiratory Syndrome (PRRS) virus. Exact solution is possible for up to  $n = 20$  followers. Approximate solution could be performed for up to  $n = 100$  followers and we observed similar exact and approximate solutions for  $n \leq 20$ .*

## Keywords

Animal epidemiology, Markov Decision Process, Game theory

## 1 Introduction

Le contrôle des maladies transmissibles est une préoccupation majeure pour le secteur des productions animales. On sépare classiquement les maladies épidémiques des maladies endémiques. Les maladies épidémiques ont une propagation souvent très rapide et sont majoritairement réglementées (mise en place obligatoire de mesures de maîtrise). En revanche, les maladies endémiques sont souvent non réglementées et sont présentes à divers niveaux de prévalence. Leur présence induit une diminution de compétitivité des élevages liée à des pertes économiques [7, 2]. Pour ces maladies, chaque éleveur choisit de mettre en place ou non des actions de maîtrise en se basant sur différents critères dont sa perception du risque. Les critères et la perception diffèrent d'un éleveur à un autre. Or, pour les maladies transmissibles, le choix d'une stratégie de maîtrise dans une exploitation va influencer la propagation de l'agent pathogène dans cette exploitation, et donc le risque de transmission aux autres exploitations (par voisinage ou achat d'animaux), créant une externalité positive [12]. D'autres élevages peuvent choisir de ne rien faire du fait des actions de leurs voisins, adoptant alors un comportement de "free rider" [11]. Pour limiter ces comportements, il est nécessaire de coordonner les décisions des élevages. Pour aider à la coordination entre élevages, des organisations professionnelles regroupant un ensemble d'élevages proposent parfois des approches collectives de maîtrise d'une maladie pouvant s'appuyer sur des incitations financières. Comme le collectif n'impose pas d'actions de maîtrise à ses membres, il doit tenir compte du comportement possible des éleveurs. Un outil permettant de définir ces stratégies collectives serait utile. L'enjeu est donc de proposer des approches d'aide à la décision collective tenant compte des prises de décisions des éleveurs. Les décisions sont prises régulièrement (séquentielles) et réajustées en tenant compte de la situation épidémiologique courante (adapta-

tion). On s'intéresse donc aux approches d'optimisation pour la prise de décisions séquentielles en environnement incertain. Les méthodes de l'Intelligence Artificielle sont d'intérêt pour répondre à nos questions. En santé animale, peu de travaux utilisant de telles approches ont été proposés et ils sont souvent limités à un seul décideur.

Du point de vue de l'Intelligence Artificielle, notre question en santé animale peut être vue comme une forme de problème décisionnel multi-agent et séquentiel. Tous les agents (éleveurs) maximisent leurs objectifs propres lorsqu'ils décident de mettre en place ou non une mesure de maîtrise. En parallèle, un pseudo-agent du type leader (l'organisation) a pour objectif de minimiser l'impact de la maladie dans l'organisation en donnant des incitations aux éleveurs pour que leurs comportements se rapprochent de l'optimum collectif. Du fait des interactions très spécifiques entre l'organisation et les éleveurs, nous sommes face à un problème de type *Leader-Follower Markov Decision Process (LF-MDP)* [23]. La résolution des LF-MDP est la plupart du temps réalisée par simulation, par des approches de type *Apprentissage par Renforcement* [23, 10]. Pour envisager une résolution exacte, nous nous sommes intéressés à un sous-problème plus simple, dont les hypothèses étaient acceptables pour répondre à nos questions en santé animale. Nous avons supposé que le nombre de statuts des suiveurs vis à vis de la maladie était petit et que les suiveurs ne sont pas individuellement identifiés par l'organisation, excepté par leur statut vis à vis de la maladie. Cette dernière hypothèse signifie que 2 éleveurs ayant le même statut vont utiliser la même politique (qui peut être stochastique). Nous avons pu résoudre de manière exacte ce problème pour des petits nombres de suiveurs ( $n \leq 20$ ). Pour de plus grandes valeurs, nous avons proposé une méthode de résolution approchée, par agrégation d'états.

L'objectif de ce papier est de présenter la formulation par un LF-MDP du problème de coordination de décision individuelle par une organisation ainsi que les approches développées pour sa résolution exacte et approchée. Après un état de l'art, nous présentons notre contribution à la résolution de LF-MDP et ensuite un cas d'étude permettant d'illustrer notre approche sur une question en santé animale.

## 2 Etat de l'art

En santé animale, il existe des travaux s'intéressant aux problématiques de coordination de décisions. Le plus souvent, ceux-ci s'intéressent à la modélisation et à la simulation de la propagation d'une épidémie dans une région. Ils se limitent alors à évaluer, par simulation, plusieurs scénarios représentant différentes actions imposées par un collectif et supposées mises en place dans tous les élevages [15, 24]. Il existe toutefois quelques approches pour la conception par optimisation de stratégies de contrôle collectives [9, 13], ou individuelles [25, 19, 20].

Le non suivi des actions proposées par une organisation par une partie des éleveurs est un facteur impactant la propaga-

tion [27]. De rares travaux prennent en compte le non-suivi des actions proposées, dans le cadre de l'optimisation de stratégies collectives [26].

Quelques travaux, en économie [23] et en Intelligence Artificielle / Recherche Opérationnelle [28], se sont intéressés à la coordination d'un leader et de plusieurs suiveurs, dans des problèmes de décision. Néanmoins, ces travaux se limitent à des comparaisons par simulation de politiques de coordination prédéfinies ou à l'étude de systèmes ne comprenant que quelques individus ou un seul pas de temps. En négligeant le rôle particulier de l'organisation, des approches de type *Competitive Markov Decision Process* aussi appelées *Stochastic Game* [8] ou de type *Mean Field Game* [14] seraient envisageables pour traiter le problème qui nous intéresse. Du fait des interactions très spécifiques entre l'organisation et les éleveurs, nous sommes plutôt dans les problèmes de type *Leader-Follower Markov Decision Process (LF-MDP)* [23] et *Dynamic Principal-Agent Problem* [18]. Pour résoudre ces problèmes, il est nécessaire de résoudre un grand nombre de jeux à  $n$  joueurs, à chaque pas de temps pour construire la politique des  $n$  éleveurs. La complexité (non-polynomiale) de cette étape se répercute sur la résolution des LF-MDP. C'est pourquoi la plupart des approches existantes opèrent par simulation, en utilisant des méthodes d'apprentissage par renforcement [23, 10]. Mais ces méthodes ne permettent pas de traiter facilement le contrôle des maladies non réglementées en santé animale, où il faut considérer : (1) des horizons de plusieurs pas de temps et (2) plusieurs centaines d'éleveurs en interaction. Nous avons, dans [21, 22], proposé une approche générique de résolution pour ces problèmes, entrelaçant programmation dynamique et calculs d'équilibres de Nash. Cette approche est basée sur une hypothèse simplificatrice de *substituabilité* des suiveurs dans les LF-MDP. Pour le cas d'étude qui nous occupe ici, elle permet de résoudre, de manière exacte, des problèmes avec 20 suiveurs. En utilisant une approximation basée sur l'agrégation des suiveurs, nous pouvons résoudre, de manière approchée, des problèmes avec au moins 100 suiveurs.

## 3 Formalisation et résolution

Nous considérons 2 types d'agents : un leader (l'organisation) et des suiveurs (les éleveurs). Le leader cherche à maximiser sa propre fonction d'utilité qui est dépendante de la quantité d'incitations versées (fonction des décisions des suiveurs) et de l'état du système (niveau d'infection dans l'organisation). Les suiveurs maximisent leur propre fonction d'utilité dépendant de leur statut individuel (pertes dues à la maladie) et des actions de maîtrise si elles sont mises en place (coût des actions diminué des incitations du leader si il en distribue). Dans notre situation, le leader influence les fonctions de récompense des suiveurs via les incitations. Les décisions individuelles, de maîtrise ou non, des suiveurs influencent la dynamique du système (propagation de la maladie) et donc indirectement la fonction de récompense du leader.

Nous présentons d'abord le cadre LF-MDP (Section 3.1) proposé par [23]. Puis, nous décrivons brièvement un algorithme de type *Backward Induction* "naïf", de complexité exponentielle en le nombre de suiveurs, permettant de résoudre un LF-MDP (Section 3.2). Enfin, nous rappelons les principes et la complexité des algorithmes de résolution, exacte et approchée, que nous avons proposés dans [22] (Section 3.3).

### 3.1 Formalisation LF-MDP

**Etats, actions, transitions et récompenses.** Un LF-MDP [23] modélise un processus de décision séquentielle dans l'incertain impliquant une *leader* et  $n \geq 1$  *suiveurs* (*followers*). Il se définit, en horizon fini<sup>1</sup>, par :  $\mathcal{M} = \langle n, \Sigma, A^L, \{A_i^F\}_{i=1..n}, T, r^L, \{r_i^F\}_{i=1..n}, H \rangle$ , où :

- $\Sigma$  est l'espace d'états joint du leader et des suiveurs. Dans le cas général, il peut être factorisé :  $\Sigma = S^L \times S_1^F \times \dots \times S_n^F$ .
- $A^L = \{1, \dots, m\}$  est l'ensemble fini des actions du leader.
- $A_i^F = \{1, \dots, p_i\}$  est l'ensemble fini des actions du suiveur  $i$ . Pour simplifier l'exposé, nous supposons que ces ensembles sont identiques pour tous les suiveurs :  $A^F = \{1, \dots, p\}$ .
- $T : \Sigma \times (A^F)^n \times \Sigma \rightarrow [0, 1]$  est la fonction de transition jointe.  $T(\sigma' | \sigma, \{a_i^F\}_{i=1..n})$  est la probabilité de passer de l'état  $\sigma$  à l'état  $\sigma'$ , lorsque les actions des suiveurs sont  $a^F = \{a_i^F\}_{i=1..n}$ . Notons que l'action du leader n'influence pas directement ces probabilités.
- $r^L : \Sigma \times A^L \times (A^F)^n \rightarrow \mathbb{R}$  est la fonction de récompense instantanée du leader.
- $r_i^F : \Sigma \times A^L \times A^F \rightarrow \mathbb{R}$  est la fonction de récompense instantanée du suiveur  $i$ .
- $H$  est le nombre d'étapes de décision.

**Stratégies du leader et des suiveurs.** Nous supposons, comme classiquement dans les Processus Décisionnel Markov (MDP, pour *Markov Decision Processes*) à horizon fini, que les agents choisissent leurs actions à l'étape  $t$  en suivant des stratégies *non-stationnaires*,  $\delta_t^L, \{\delta_{t,i}^F\}_{i=1..n}$ . Nous nous restreindrons à des stratégies *Markoviennes*, *stochastiques*, car les stratégies d'équilibre d'un LF-MDP vérifient ces hypothèses [23].

$\delta_t^L(a^L | \sigma)$  est la probabilité que  $a^L \in A^L$  soit choisie par le leader à l'étape  $t$ , connaissant l'état courant  $\sigma \in \Sigma$ .  $\delta_{t,i}^F(a_i^F | \sigma, a^L)$  est la probabilité que  $a_i^F \in A^F$  soit choisie par le suiveur  $i$  à l'étape  $t$ , connaissant l'état courant  $\sigma$  et l'action  $a^L$  choisie par le leader<sup>2</sup>.

Dans un LF-MDP, la stratégie optimale du leader est *déterministe* [23, 22] :  $\delta_t^L(a^L) \in \{0, 1\}$ . Aussi, nous écrivons :  $a^L = \delta_t^L(\sigma)$ . Dans le cas (non général) où les stratégies

des suiveurs sont déterministes, nous écrirons également :  $a_i^F = \delta_{t,i}^F(\sigma, a^L)$ .

#### Valeurs d'une stratégie jointe, stratégies d'équilibre.

Soit  $\Delta = \{\delta_t^L, \{\delta_{t,i}^F\}_{i=1..n}\}_{t=1..H}$  une stratégie jointe fixée du leader et des suiveurs. Les *valeurs*  $Q_\Delta^L$  et  $Q_\Delta^{F,i}$  de cette stratégie jointe pour le leader et pour les suiveurs sont définies, à chaque pas de temps et dans chaque état joint, par :

$$Q_\Delta^L(\sigma, t) = E \left[ \sum_{t'=t}^H r_{t'}^L \mid \Delta, \sigma \right], \quad (1)$$

$$Q_\Delta^{F,i}(\sigma, t) = E \left[ \sum_{t'=t}^H r_{t',i}^F \mid \Delta, \sigma \right]. \quad (2)$$

Résoudre un LF-MDP consiste à trouver une stratégie d'équilibre,  $\Delta^* = \{\delta_t^{L*}, \{\delta_{t,i}^{F*}\}_{i=1..n}\}_{t=1..H}$ , pour le leader et les suiveurs.

#### Définition 1 (stratégie d'équilibre d'un LF-MDP)

$\Delta^* = \{\delta_t^{L*}, \{\delta_{t,i}^{F*}\}_{i=1..n}\}_{t=1..H}$  est une stratégie d'équilibre si et seulement si elle vérifie,  $\forall t, \delta_t^L, \{\delta_{t,i}^F\}, \sigma \in \Sigma$  :

$$Q_{\Delta^*}^L(\sigma, t) \geq Q_{\Delta^* \downarrow \delta^L}^L(\sigma, t), \forall \delta^L, \quad (3)$$

$$Q_{\Delta^*}^{F,i}(\sigma, t) \geq Q_{\Delta^* \downarrow \delta_i^F}^{F,i}(\sigma, t), \forall i, \delta_i^F. \quad (4)$$

$\Delta^* \downarrow \delta^L$  (resp.  $\Delta^* \downarrow \delta_i^F$ ) est une stratégie jointe où les  $\delta_t^{L*}$  (resp.  $\delta_{t,i}^{F*}$ ) ont été remplacées par des stratégies arbitraires  $\delta_t^L$  (resp.  $\delta_{t,i}^F$ ),  $\forall t (\forall i)$ .

Dans [22], nous avons exploité les résultats de [23, 8] montrant l'existence d'une stratégie d'équilibre dans laquelle les stratégies du leader sont déterministes, pour définir un algorithme exact, par programmation dynamique arrière, de calcul de stratégies jointes d'équilibre d'un LF-MDP.

### 3.2 Résolution

Soit  $\mathcal{M}$ , un LF-MDP. Une stratégie d'équilibre  $\Delta^*$  peut être calculée par l'algorithme suivant [21] :

**Pas de temps final.** Au pas de temps final,  $H$ , tout suiveur  $i$  appliquant l'action  $a_i^F \in A^F$  alors que l'état joint est  $\sigma$  et que l'action du leader est  $a^L$ , reçoit une récompense immédiate  $r_i^F(\sigma, a^L, a_i^F)$ , indépendante des actions des autres suiveurs. On peut toujours trouver une stratégie  $\delta_{H,i}^{F*}$  déterministe<sup>3</sup> :

$$\delta_{H,i}^{F*}(\sigma, a^L) \in \arg \max_{a_i^F \in A^F} r_i^F(\sigma, a^L, a_i^F) \text{ et}$$

$$Q_{\Delta^*, a^L}^{F,i}(\sigma, H) = \max_{a_i^F \in A^F} r_i^F(\sigma, a^L, a_i^F), \forall (\sigma, a^L). \quad (5)$$

Nous définissons la récompense espérée du leader à tout pas de temps  $t \in \{1, \dots, H\}$ , pour une stratégie jointe

1. Nous considérerons, pour raisons de simplicité des notations, des fonctions de transition et de récompense stationnaires, mais cette limitation est triviale à lever.

2. La caractéristique principale d'un LF-MDP est que le leader communique son action aux suiveurs, afin d'influencer leurs choix d'action.

3. Au cas où plusieurs actions généreraient la même récompense maximale, il suffit de choisir l'une d'elles, arbitrairement.

stochastique des suiveurs,  $\delta_t^F = \{\delta_{t,i}^F\}_{i=1..n}$  :

$$r_{\delta_t^F}^L(\sigma, a^L) = \sum_{a^F} \left( \prod_{i=1}^n \delta_{t,i}^F(a_i^F | \sigma, a^L) \right) r^L(\sigma, a^L, a^F). \quad (6)$$

Donc, pour le leader au pas de temps  $H$  :

$$\begin{aligned} \delta_H^{L*}(\sigma) &\in \arg \max_{a^L \in \mathcal{A}^L} r_{\delta_H^*}^L(\sigma, a^L), \\ Q_{\Delta^*}^L(\sigma, H) &= \max_{a^L \in \mathcal{A}^L} r_{\delta_H^*}^L(\sigma, a^L), \forall \sigma. \end{aligned} \quad (7)$$

**Etapes d'induction.** La stratégie jointe (stochastique) d'équilibre des suiveurs à l'étape  $t < H$  est calculée inductivement, en fonction des stratégies d'équilibre des pas de temps suivants<sup>4</sup>, par la résolution de jeux sous forme normale à  $n$  joueurs, pour chaque couple  $(\sigma, a^L)$ .

La valeur pour le suiveur  $i$  de l'action jointe des suiveurs,  $a^F$ , dans l'état  $\sigma$  au pas de temps  $t$ , après une action du leader,  $a^L$ , et en supposant qu'une stratégie jointe d'équilibre est appliquée par la suite, est :

$$\begin{aligned} G_{\sigma, a^L, \Delta^*}^t(i, a^F) &= r_i^F(\sigma, a^L, a_i^F) \\ &+ \sum_{\sigma'} T(\sigma' | \sigma, a^F) Q_{\Delta^*}^{F,i}(\sigma', t+1). \end{aligned} \quad (8)$$

Soit  $\{\alpha_1^*, \dots, \alpha_n^*\}$ , une solution du jeu  $G_{\sigma, a^L, \Delta^*}^t \cdot \alpha_i^*(a^F)$  est la probabilité que  $i$  "joue"  $a^F \in A^F$ . Une politique d'équilibre des suiveurs est obtenue par :  $\delta_{t,i}^{F*}(a_i^F | \sigma, a^L) = \alpha_i^*(a_i^F)$  et

$$Q_{\Delta^*, a^L}^{F,i}(\sigma, t) = \sum_{a^F} \left( \prod_{j=1}^n \alpha_j^*(a_j^F) \right) G_{\sigma, a^L, \Delta^*}^t(i, a^F). \quad (9)$$

Puisqu'une action  $a^L$  du leader détermine un équilibre de Nash pour les suiveurs, à travers l'équation (9), la stratégie optimale du leader peut être calculée en résolvant un simple MDP non-stationnaire  $\langle \Sigma, \mathcal{A}^L, \{T_{\delta_t^{F*}}\}, \{r_{\delta_t^{F*}}^L\}_{t=1..H}, H \rangle$ , dans lequel les  $\{r_{\delta_t^{F*}}^L\}_{t=1..H}$  ont été définis plus haut et

$$T_{\delta_t^{F*}}(\sigma' | \sigma, a^L) = \sum_{a^F} \prod_{j=1}^n \delta_{t,j}^{F*}(a_j^F | \sigma, a^L) T(\sigma' | \sigma, a^F). \quad (10)$$

Les fonctions  $T_{\delta_t^{F*}}$  et  $r_{\delta_t^{F*}}^L$  sont calculées au fur et à mesure qu'elles sont utilisées dans l'algorithme d'induction arrière. Cet algorithme calcule des stratégies  $\delta_t^{L*}$  et des fonctions de valeur  $Q_{\Delta^*}^{L*}$  optimales, par induction arrière :

$$\begin{aligned} \delta_t^{L*}(\sigma) &\in \arg \max_{a^L \in \mathcal{A}^L} \left\{ r_{\delta_t^*}^L(\sigma, a^L) \right. \\ &\left. + \sum_{\sigma' \in \Sigma} T_{\delta_t^*}(\sigma' | \sigma, a^L) Q_{\Delta^*}^{L*}(\sigma', t+1) \right\}, \\ Q_{\Delta^*}^L(\sigma, t) &= \max_{a^L \in \mathcal{A}^L} \left\{ r_{\delta_t^*}^L(\sigma, a^L) \right. \\ &\left. + \sum_{\sigma' \in \Sigma} T_{\delta_t^*}(\sigma' | \sigma, a^L) Q_{\Delta^*}^{L*}(\sigma', t+1) \right\}. \end{aligned} \quad (11)$$

4. Cette stratégie jointe, découlant de la recherche d'équilibres de Nash dans des jeux sous forme normale, n'est pas unique.

La complexité de cet algorithme est calculée dans [22]. Dans cet article, on montre également comment la complexité algorithmique peut être réduite grâce à certaines hypothèses sur la structure du problème. Dans la Section suivante nous décrivons brièvement ces résultats. Pour une description plus complète, le lecteur se référera à [22].

### 3.3 Considérations de complexité algorithmique

Les différentes étapes de l'algorithme LF-MDP générique ont des complexités variées.

**Etape 1 : Génération de jeux en forme normale.** Afin de calculer les stratégies d'équilibre des suiveurs, il est nécessaire de construire des jeux en forme normale,  $G_{\sigma, a^L, \Delta^*}^t$  (Equation 8). Chaque jeu comprend  $O(n \times |A^F|^n)$  éléments, et il y a  $|\Sigma| \times |A^L|$  tels jeux. La complexité temporelle de la construction de ces jeux est donc en  $O(n \times |A^F|^n \times |\Sigma| \times |A^L|)$ . Néanmoins, il n'est nécessaire de stocker qu'un jeu à la fois dans l'algorithme.

**Etape 2 : Calcul et stockage des stratégies jointes d'équilibre des suiveurs.** Les stratégies jointes d'équilibre des suiveurs sont obtenues à partir de la résolution des jeux précédemment définis. Leur stockage nécessite un espace en  $O(n \times |\Sigma| \times |A^F| \times |A^L|)$ . De plus, leur calcul nécessite de résoudre de nombreux jeux, chaque résolution étant elle-même difficile<sup>5</sup>.

**Etape 3 : Calcul des fonctions de transition et de récompense du leader.** Les fonctions de transition  $T_{\delta_t^{F*}}$  sont calculées grâce à l'équation 10. Ce calcul nécessite un espace en  $O(|\Sigma|^2 \times |A^L|)$  et un temps en  $O(n \times |A^F|^n \times |\Sigma|^2 \times |A^L|)$ . Le calcul des fonctions de récompense  $r_{\delta_t^{F*}}^L$  nécessite un espace en  $O(|\Sigma| \times |A^L|)$  et un temps en  $O(n \times |A^F|^n \times |\Sigma| \times |A^L|)$ , en utilisant l'équation 6.

**Etape 4 : Calcul de la stratégie optimale du leader.** Le calcul de  $\delta_t^{L*}$  nécessite un espace en  $O(|\Sigma|)$  et un temps en  $O(|\Sigma|^2 \times |A^L|)$ , en utilisant l'équation 11.

**Réduction de la complexité.** Dans [22], nous avons montré que la propriété de *substituabilité* permettait de simplifier la résolution d'un LF-MDP. Les suiveurs sont substituables dans un LF-MDP, si, pour chacun d'entre eux, seul son état propre et les *nombre*s de suiveurs dans chaque état déterminent sa fonction de transition et de récompense. Sous cette hypothèse, un algorithme de résolution de LF-MDP de complexité réduite peut être défini, dont l'espace d'états  $\Sigma^L$  est formé de l'ensemble des vecteurs d'entiers positifs ou nuls,  $c = (c_1, \dots, c_k)$ , dont la somme est  $n$ . Nous obtenons alors  $|\Sigma^L| = O(n^k)$  et, plus généralement, la taille des divers objets du LF-MDP réduit devient polynomiale en  $n$ . En conséquence, la résolution devient polynomiale<sup>6</sup>.

5. Chaque résolution est un problème PPA-complet, où PPA est une classe de complexité supposée inclure *strictement* la classe P.

6. Sauf la construction de  $\bar{T}$ , qui reste exponentielle, mais peut être "approchée" en temps polynomial.

TABLE 1 – Complexité de différents éléments utiles dans la résolution d’un LF-MDP dans le cadre d’une résolution naïve, ou exploitant la substituabilité seule, ou incluant également une agrégation des nombres de suiveurs dans chaque état.

	Résolution naïve	Substituabilité	+ Agrégation
Taille de l’espace d’états	$ \Sigma  = O(k^n)$	$ \Sigma^L  = O(n^k)$	$ \overline{\Sigma^L}  = O(K^k)$
Taille de l’espace d’actions des suiveurs	$ A^F ^n$	$ A^F ^k$	$ A^F ^k$
Taille des matrices de transition	$ T  = O(k^{2n} A^F ^n)$	$ \overline{T}  = O(n^{2k} A^F ^k)$	$ \hat{T}  = O(K^{2k} A^F ^k)$
Taille d’un jeu	$ G_{\sigma, a^L, \Delta^*}^t  = O(n A^F ^n)$	$ G_{c, a^L, \Delta^*}^t  = O(k A^F ^k)$	$ G_{\kappa, a^L, \Delta^*}^t  = O(k A^F ^k)$
Nb jeux par étape	$nb =  A^F ^n  A^L $	$nb =  A^F ^k  A^L $	$nb = K^k  A^L $

Néanmoins, une complexité en  $O(n^k)$  peut être problématique, si  $n \geq 100$ ... Aussi, nous avons proposé une méthode de résolution approchée des LF-MDP substituables, consistant à *agréger* les vecteurs  $c$ . Pour se faire, nous avons proposé de considérer une partition de l’ensemble  $\{0, \dots, n\}$  en  $K + 2$  intervalles non-homogènes, où  $K$  est un entier divisant  $n$  :  $I_0 = \{0\}$ ,  $I_{K+1} = \{n\}$  et  $I_i = \{\frac{(i-1)n}{K} + 1, \dots, \frac{in}{K}\}$ ,  $\forall i = 1, \dots, K$ . Nous avons définis les *états agrégés* comme des  $k$ -uplets d’entiers  $(\kappa_1, \dots, \kappa_k) \in \{0, \dots, K\}^k$ . L’ensemble des états agrégés correspond à l’ensemble des combinaisons d’ensembles  $I_{\kappa_1} \times \dots \times I_{\kappa_k}$ , telles qu’il existe un état  $c \in \Sigma^L$ ,  $c_h \in I_{\kappa_h}$ ,  $\forall h = 1, \dots, k$ . L’ensemble  $\overline{\Sigma^L}$  de ces états agrégés vérifie  $|\overline{\Sigma^L}| = O(K^k)$ . Sa taille est donc indépendante de  $n$ . Plus généralement, tous les objets d’un LF-MDP agrégé ont une taille indépendante de  $n$ , ce qui permet une résolution en temps quasiment indépendante de  $n$ . Seule, encore une fois, la construction de la matrice de transition approchée reste exponentielle en  $n$ , mais peut être approchée par simulation. La table 1 regroupe des éléments de complexité des différents sous-modèles.

## 4 Cas d’étude

### 4.1 Modèle

Notre cas d’étude concerne la coordination d’un ensemble d’éleveurs afin de limiter la propagation du virus du Syndrome Dysgénésique Respiratoire Porcin (SDRP) [17]. SDRP est une maladie endémique non réglementée. Elle impacte la santé et le bien-être des animaux ainsi que l’économie de l’exploitation. Dans certaines zones (par exemple : [16, 5]), des actions sont proposées par des organisations, dont des incitations financières permettant de limiter le coût des actions de maîtrise pour les éleveurs. Pour les autres zones souhaitant mettre en place une coordination, un outil d’aide à la décision serait d’intérêt. Pour définir notre modèle LF-MDP, nous présentons d’abord les statuts et les transitions entre statuts au niveau individuel en fonction des décisions individuelles. Pour les transitions, par souci de lisibilité, on donne un diagramme par action, mais des éleveurs peuvent retenir des actions différentes au même instant s’ils ont des statuts différents ou même si leurs statuts sont identiques, si la stratégie ob-

tenue lors du calcul de l’équilibre de Nash est mixte.

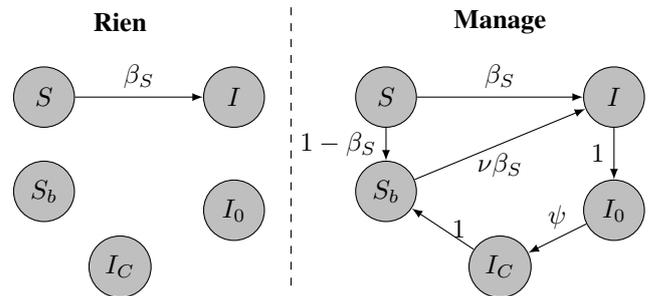


FIGURE 1 – Transitions individuelles pour les suiveurs, en fonction des actions retenues. Les auto-transitions ne sont pas représentées pour simplifier le graphique.

Pour le SDRP, nous avons défini, pour les suiveurs, 5 statuts vis à vis de la maladie et 2 actions possibles "Rien" et "Manage" avec les transitions suivantes (Fig.1) :

- $S$  (non infecté) : un suiveur  $S$  devient  $I$  (infecté) avec une probabilité  $\beta_S$ . Sinon, soit il reste  $S$  (si  $a_S^F = 0 \iff$  Rien) soit il devient  $S_b$  (si  $a_S^F = 1 \iff$  Manage, correspondant à prendre des mesures de biosécurité).
- $S_b$  (non infecté avec management) : seul  $a_{S_b}^F = 1 \iff$  Manage (correspondant à de la biosécurité) est possible (pas d’arrêt de la maîtrise). En  $S_b$  le risque d’infection et donc de passage en  $I$  est réduit comparé à  $S$ . La probabilité est  $\nu\beta_S$ , avec  $\nu < 1$  qui dépend de la qualité de la biosécurité.
- $I$  (infecté) : soit le suiveur reste  $I$  (si  $a_I^F = 0 \iff$  Rien) soit il devient  $I_0$  (si  $a_I^F = 1 \iff$  Manage, correspondant à de la vaccination).
- $I_0$  (infecté en cours de contrôle) : Seul  $a_{I_0}^F = 1 \iff$  Manage (correspondant à la vaccination) est possible (pas d’arrêt de la maîtrise). La transition vers  $I_C$  est définie avec une probabilité  $\psi$ , modélisant un temps de séjour en  $I_0$  stochastique, représentant un délai avant un contrôle effectif.
- $I_C$  (infecté contrôlé) : soit le suiveur reste  $I_C$  si  $a_{I_C}^F = 0 \iff$  Rien (maintien de la vaccination) soit il devient  $S_b$  si  $a_{I_C}^F = 1 \iff$  Manage pour revenir non infecté (dépeuplement).

Pour la transmission, on suppose que les suiveurs sont tous en contact les uns avec les autres de par leur situation géographique et les achats/ventes d'animaux. En conséquence, seul la proportion totale d'infectés est à prendre en compte pour le taux de transmission. Cela nous permet de faire une hypothèse de *substituabilité* des suiveurs. Le paramètre  $\beta_S$  a une forme fréquence-dépendant [1] :

$$\beta_S(c) = \frac{1}{n} \sum_{h=1}^k \beta(h)c_h + \beta_{out} \quad (12)$$

où  $\beta(h)$  est le taux de transmission de la maladie par les suiveurs du statut  $h$  et  $\beta_{out}$  le taux de transmission par l'extérieur. Ces paramètres ont été fixés par des experts à  $\beta(I) = 0.08, \beta(I_0) = 0.06, \beta(I_C) = 0.01$  et  $\beta_{out} = 0.005$ .

Les états du leader correspondent à la répartition des suiveurs dans les différents statuts :  $\Sigma^L = \{c = (n_S; n_{Sb}; n_I; n_{I0}; n_{Ic})$  avec  $n_{Sb} + n_I + n_{I0} + n_{Ic} = n\}$  où  $n_h$  le nombre de suiveurs dans le statut  $h$ . La taille de l'espace d'états est  $|\Sigma^L| = C_{n+4}^4$ . Deux actions sont possibles :  $a^L = 0 \Leftrightarrow$  Rien et  $a^L = 1 \Leftrightarrow$  Incitation. Dans le cas  $a^L = 1$  une proportion ( $perc \leq 1$ ) des coûts de l'action Manage des suiveurs est prise en charge par le leader. Les transitions entre états sont calculées à partir des transitions entre statuts, de manière similaire à [26].

Les fonctions de récompense des suiveurs ( $r_F$ ) et du leader ( $r_L$ ) sont les suivantes, pour  $\sigma = (s_1, \dots, s_n)$  :

$$r^L(\sigma, a^L, a^F) = -c^L(a^L) - \sum_{i=1}^n c^F(s_i)q^L(a^L, a_i^F) - L^L(s_i),$$

$$r^F(\sigma, a^L, a_i^F) = -E_{s_i} [L^F(s_i')] - \sum_{i=1}^n c^F(s_i)q^F(a^L, a_i^F),$$

avec

- $c^L$ , le coût pour le leader de la mise en place des incitations,
- $L^F(s_i)$  les pertes dans le statut  $s_i$  pour le suiveur,
- $L^L(s_i) = red \times L^F(s_i)$  les pertes dans le statut  $s_i$  pour le leader correspondant à une proportion ( $red \leq 1$ ) de celles des suiveurs,
- $c^F(s_i)$  le coût de l'action Manage pour les suiveurs,
- $q^L(a^L, a_i^F)$  la proportion prise en charge par le leader pour les suiveurs retenant l'action Manage :  $q^L(a^L, a_i^F) = perc \leq 1$  si  $a^L = 1$  et  $a_i^F = 1$  et 0 sinon,
- $q^F(a^L, a_i^F)$  la proportion restant à la charge des suiveurs retenant l'action Manage ( $a_i^F = 1$ ) :  $q^F(a^L, a_i^F) = 1 - perc$  si  $a^L = 1$  et 1 si  $a^L = 0$ .

Pour la résolution, seuls 3 statuts nécessitent des décisions individuelles ( $S, I, I_C$ ). Par conséquent, la taille de l'espace d'actions des suiveurs est  $2^3$  et la taille d'un jeu  $3 \times 2^3$ .

## 4.2 Evaluation de l'approximation

Pour valider l'approximation présentée dans la section 3.3, nous avons réalisé, pour  $n \in \{12, 15, 20\}$ , une résolution

exacte et des résolutions approchées avec différentes valeurs de  $K$  compatibles avec  $n$ . Pour chaque combinaison de  $K$  et  $n$ , nous avons calculé les politiques exacte ( $\delta^*$ ) et approchée ( $\delta^K$ ). Puis, nous avons comparé le comportement du modèle avec ces différentes politiques.

Pour le paramétrage du modèle, nous avons considéré plusieurs jeux de paramètres générés en faisant varier les valeurs des paramètres dans des intervalles de possibles donnés par les experts pour évaluer les comportements de notre modèle. Nous avons considéré deux distributions initiales (à  $t = 0$ ) (i)  $\Gamma_U$  uniforme sur tous les états et (ii)  $\Gamma_E$  uniforme seulement sur les états représentant une situation endémique (état avec au moins 40% dans les statuts  $S + S_b$  et au moins 40% dans le statut  $I_C$ ).

Nous avons comparé les politiques et le comportement du modèle selon 6 indicateurs

- *#Diff* Le nombre de pas de temps où la politique approchée diffère de la politique exacte,
- *Max\_Gap* la valeur maximale de la proportion d'états par pas de temps où il y a une différence d'actions entre les politiques,
- *DB<sub>x</sub>* la distance de Battacharyya [3] entre les distributions sur les états du leader au pas de temps final, en partant d'une distribution initiale  $\Gamma_x$  avec  $x = U$  ou  $E$ ,
- *RMSE<sub>x</sub>* l'écart entre les valeurs espérées calculées sur tous les états si  $x = U$  et uniquement les états endémique si  $x = E$  en utilisant la formule :

$$RMSE_x = \sqrt{\sum_{c \in \Sigma^L} ((V^K(c) - V^*(c))^2 \times \Gamma_x),}$$

avec  $x = U$  ou  $E$  et  $V^K(\cdot)$  la fonction de valeur de la politique  $\delta^K$ .

## 4.3 Résultats

Plusieurs jeux de paramètres testés conduisent à très peu d'incitations du leader. Dans certains jeux de paramètres, la politique consiste à ne rien faire sauf à un seul pas de temps où l'incitation est retenue pour quelques états. Pour ces jeux de paramètres, les différences liées à l'approximation sont faibles. Pour les illustrations de ce papier, nous avons sélectionné 2 jeux de paramètres avec des incitations réparties sur plusieurs pas de temps (Table 2). Pour ces deux jeux, les profils d'incitations sont conservés : les instants où il y a au moins un état avec une incitation sont les mêmes quelle que soit l'approximation. Néanmoins, les états avec incitations changent selon  $K$ .

Il y a quelques légères différences en termes de politique et de RMSE, mais elles restent faibles (Fig. 2). Il n'y a pas de relation claire entre la valeur de  $K$  et les écarts à la résolution exacte.

Avec notre approximation, le problème peut être résolu pour  $n = 100$  avec  $K = 5$ . Mais du fait de la taille du modèle ( $|\Sigma^L| = 4\,598\,251$ ), nous n'avons pas pu calculer la fonction de valeur sur l'espace complet. Si on considère uniquement les états endémiques pour l'application au

TABLE 2 – Valeurs des paramètres de transition des suiveurs et des récompenses (leader et suiveurs) dans 2 jeux

Jeu	$\nu$	$\psi$	$L^F(s_i)$ (pertes)	$c^F(s_i)$ (coûts des suiveurs)	$c^L(a_L)$ (coût leader)	$perc$	$red$
A	0.5	0.5	(0,0,6,5,4)	(4,1,4,2,101)	(0,3)	0.5	0.7
B	0.7	0.5	(0,0,4,8,5,6,2,8)	(7.84,1.4,11.76,2.8,101.4)	(0,4,2)	0.7	0.7

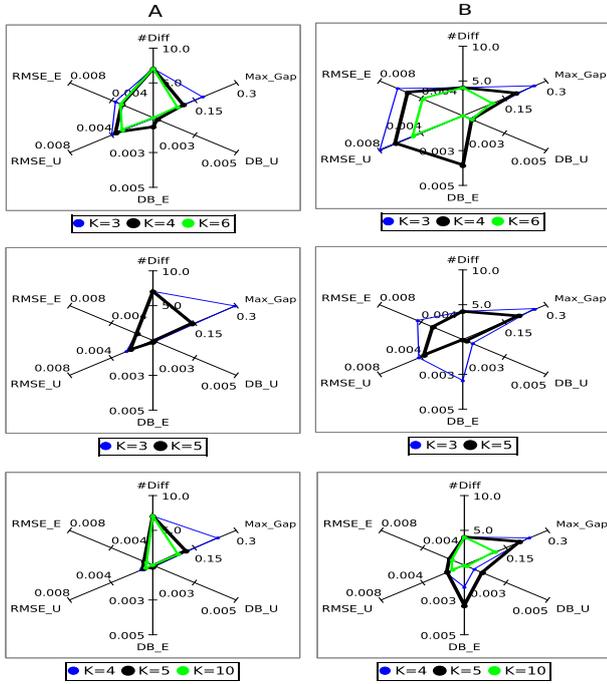


FIGURE 2 – Représentation des différences entre la résolution exacte et approchée, sur différents indicateurs et pour différentes approximations ( $K$ ) pour  $N = 12$  (ligne du haut),  $N = 15$  (ligne du milieu) et  $N = 20$  (ligne du bas)

SDRP, il est néanmoins possible de calculer par simulation les fonctions de valeurs pour ces états.

## 5 Conclusion

Nous avons proposé une approche pour la gestion collective de maladies animales transmissibles non réglementées via la coordination de décisions individuelles, dans le cadre LF-MDP. Nous avons développé un algorithme générique permettant la résolution exacte ( $n \leq 20$ ) ou approchée ( $n \leq 100$ ) d'un problème de contrôle collectif du SDRP. Dans notre cas d'étude, nous avons montré par comparaison, la proximité des solutions exacte et approchée pour  $n \leq 20$ . Les écarts sont d'autant plus acceptables que notre approche est principalement un outil de réflexion pour les décideurs. Pour illustrer l'intérêt de la politique obtenue, qui est adaptative, l'impact de celle-ci devra être comparé à celui des stratégies classiquement considérées qui sont non-adaptatives, comme dans [19, 20].

Ces travaux peuvent être poursuivis selon différents axes. Tout d'abord, bien que la résolution approchée soit pos-

sible avec  $n = 100$ , le calcul exact des matrices de transitions est très long pour  $n > 100$  (plusieurs heures/jours). Ces matrices peuvent être approchées par des simulations non exhaustives des transitions, ce qui permettrait un important gain de temps. Ensuite, nous avons supposé que l'horizon de la prise de décision individuelle était le même que celui de l'organisation. Or les éleveurs raisonnent souvent à un horizon plus court, parfois d'un seul pas de temps. La prise en compte d'horizons différents pour le leader et les suiveurs est possible dans le cadre LF-MDP et il serait intéressant d'étudier l'impact sur la politique optimale du leader de la considération d'un horizon court pour les suiveurs. Enfin, les éleveurs peuvent présenter une *aversion au risque* plus ou moins importante. L'effet de l'attitude vis à vis du risque de gestionnaires forestiers sur leurs politiques de gestion a déjà été étudié dans le cadre MDP [4, 6]. L'extension de ces travaux au cadre LF-MDP est un problème ouvert, important en épidémiologie animale.

Enfin, le cadre LF-MDP est générique et pourrait être adopté dans d'autres domaines que la santé animale. Notre approche peut être utilisée dans de nombreux problèmes où des décideurs maximisant leur profit individuel sont sous l'influence d'un coordinateur (via des actions impactant les jeux entre suiveurs) visant à atteindre son propre objectif. De tels problèmes peuvent se rencontrer en épidémiologie humaine ou végétale (dans ce dernier cas, on se place au niveau de parcelles agricoles gérées par des décideurs indépendant). Toujours dans le cadre de la gestion Environnementale, la taxation des émissions de carbone est un autre domaine d'application potentiel.

## Remerciements

Ce travail a été soutenu par l'ANR, projets ANR-10-BINF-07 (MIHMES) et ANR-13-AGRO-0001-04 (AgroBioSE) et par l'Europe (fond FEDER, Pays-de-la-Loire).

## Références

- [1] M. Begon, M. Bennett, R.G. Bower, N.P. French, S.M. Hazel, J. Turner, A clarification of transmission terms in host-microparasite models : numbers, densities and areas. *Epidemiology and Infection*, 129, pp. 147-153, 2002.
- [2] R. Bennett, The 'direct costs' of livestock disease : the development of a system of models for the analysis of 30 endemic livestock diseases in Great Britain. *Journal of Agricultural Economic* 54 pp. 55-71, 2003
- [3] A. Bhattacharyya, On a measure of divergence between two statistical populations defined by their pro-

- bability distributions. *Bulletin of the Calcutta Mathematical Society*, 35, pp. 99-109, 1943.
- [4] M. Brunette, S. Couture, J. Laye, Optimising forest management under storm risk with a Markov decision process model. *Journal of Environmental Economics and Policy*, 4, pp. 141-163, 2015.
- [5] C.A. Corzo, E. Mondaca, S. Wayne, M. Torremorell, S. Dee, P. Davies, R.B. Morrison, Control and elimination of porcine reproductive and respiratory syndrome virus. *Virus research*, 154, pp. 185-192, 2010.
- [6] S. Couture, M.J. Cros, R. Sabbadin, Risk aversion and optimal management of an uneven-aged forest under risk of windthrow : A Markov decision process approach. *Journal of Forest Economics*, 25, pp. 94-114, 2016.
- [7] K. Ekboir, The role of the public sector in the development and implementation of animal health policies. *Preventive veterinary Medicine* 40 pp. 101-115, 1999.
- [8] J. Filar, K. Vrieze, *Competitive Markov Decision Processes*, Springer, 1996.
- [9] L. Ge, M. Mourits, A.R. Kristensen, R. Huirne, A modelling approach to support dynamic decision-making in the control of FMD epidemics, *Preventive veterinary medicine*, 95, pp. 167-174, 2010.
- [10] J. Hu, M. P. Wellman, Nash Q-learning for general-sum stochastic games, *Journal of Machine-Learning Research*, 4, pp. 1039-1069, 2003.
- [11] Y. Ibuka, M. Li, J. Vietri, G.B. Chapman, A.P. Galvani, Free-riding behavior in vaccination decisions : An experimental study. *PloS one* 9 pp. e87164, 2014.
- [12] E. Klein, R. Laxminaryan, D.L. Smith, C.A. Gilligan, Economic incentives and mathematical models of disease. *Environment and Development Economics* 12 pp. 707-732, 2007.
- [13] M. Kobayashi, T.E. Carpenter, B.F. Dickey, R.E. Howitt, A dynamic, optimal disease control model for foot-and-mouth disease : I. Model description. *Preventive Veterinary Medicine* 79 pp. 257-273, 2007.
- [14] L. Laguzet, G. Turinici, Individual Vaccination as Nash Equilibrium in a SIR Model with Application to the 2009-2010 Influenza A (H1N1), *Bulletin of Mathematical Biology*, 77, pp. 1955-1984, 2015.
- [15] A. Le Menach, E. Vergu, R.F. Grais, D.L. Smith, A. Flahault, Key strategies for reducing spread of avian influenza among commercial poultry holdings : lessons for transmission to humans. *Proceedings of the Royal Society B, Biological Science* 273, pp. 2467-2475, 2006.
- [16] M-F. Le Potier, P. Blanquefort, E. Morvan, E. Albina, Results of a control programme for the porcine reproductive and respiratory syndrome in the French 'Pays de la Loire' region. *Veterinary microbiology*, 55 pp. 355-360, 1997.
- [17] G. Nodelijk, Porcine Reproductive and Respiratory Syndrome (PRRS) with special reference to clinical aspects and diagnosis : A review. *Veterinary Quarterly*, 24, pp. 95-100, 2002.
- [18] E.L. Plambeck, S.A. Zenios, Performance-based incentives in a dynamic principal-agent model. *Manufacturing & service operations management* 2, pp. 240-263, 2000.
- [19] O. Rat-Aspert, C. Fourichon, Modelling collective effectiveness of voluntary vaccination with and without incentives, *Preventive Veterinary Medicine*, 93, pp. 265-275, 2010.
- [20] O. Rat-Aspert, S. Krebs, Individual and collective management of endemic animal diseases : an economic approach, In : *2012 Conference of the International Association of Agricultural Economists*, August 18-24, 2012, Foz do Iguacu, Brazil
- [21] R. Sabbadin, A.F. Viet, A Tractable Leader-Follower MDP Model for Animal Disease Management, In : *27th AAAI Conference on Artificial Intelligence*, pp. 1320-1326, 2013.
- [22] R. Sabbadin, A.F. Viet, Leader-Follower MDP model with factored state space and many followers - followers abstraction, structured dynamics and state aggregation, In : *22nd European Conference on Artificial Intelligence (ECAI 2016)*, pp. 116-124, 2016.
- [23] K. Tharakunnel, S. Bhattacharyya, Single-leader-multiple-follower games with boundedly rational agents. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 33, pp. 1593-1603, 2009.
- [24] M.J. Tildesley, N.J. Savill, D.J. Shaw, R. Deardon, S.P. Brooks, M.E.J. Woolhouse, B.T. Grenfell, M.J. Keeling, Optimal reactive vaccination strategies for a foot-and-mouth outbreak in the UK. *Nature* 440, pp. 83-86, 2006.
- [25] N. Toft, A.R. Kristensen, E. Jørgensen, A framework for decision support related to infectious diseases in slaughter pig fattening units. *Agricultural Systems* 85, pp. 120-137, 2005.
- [26] A.-F. Viet, L. Jeanpierre, M. Bouzid, A.-I. Mouadib, Using Markov Decision Process to define an adaptive strategy to control the spread of an animal disease. *Computer and Electronics in Agriculture*, 80, pp. 71-79, 2012.
- [27] A. Vonk Noordegraaf, J.A.A.M. Buijtels, A.A. Dijkhuizen, P. Franken, J.A. Stegeman, J. Verhoeff, An epidemiological and economic simulation model to evaluate the spread and control of infectious bovine rhinotracheitis in the Netherlands. *Preventive Veterinary Medicine* 36 pp. 219-238, 1998.
- [28] C. Wernz, A. Deshmukh, Unifying temporal and organizational scales in multiscale decision-making. *European Journal of Operational Research* 223, pp. 739-751, 2012.

# HUMANS : suite logicielle pour la scénarisation d'environnements virtuels pour la formation à des situations socio-techniques complexes

D. Lourdeaux<sup>1</sup>

A. Benabbou<sup>1</sup>

L. Huguet<sup>1</sup>

R. Lacaze-Labadie<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Sorbonne universités, Université de Technologie de Compiègne, CNRS

Heudiasyc UMR 7253, CS60319, 60203 Compiègne Cedex, France

{domitile.lourdeaux - azzeddine.benabbou - lauriane.huguet - remi.lacaze-labadie}@hds.utc.fr

## Résumé

*Les environnements virtuels permettent aux apprenants d'expérimenter, de s'entraîner et de voir l'impact de leurs décisions. L'un des challenges informatiques est de pouvoir scénariser ces environnements en orientant le scénario vers des situations d'apprentissage. L'approche HUMANS vise pour cette scénarisation un ensemble d'objectifs souvent considérés comme contradictoires : la liberté d'action pour favoriser l'apprentissage par l'erreur, le caractère dynamique et l'efficacité du contrôle exercé sur le scénario pour garantir des apprentissages, la cohérence des comportements pour permettre l'explicabilité et l'adaptabilité du système nécessaire pour la variabilité des scénarios.*

## Mots Clefs

Environnement virtuels, formation, scénarisation, situations complexes, personnalisation.

## Abstract

*Virtual environments can provide dynamic situational training by offering training subjects the possibility to experiment with different behaviors and outcomes. To enable several pedagogical strategies, such as a trial-and-error approach or a situated learning approach, the system has to be able to cope with user agency. Combining pedagogical control with user agency, all the while ensuring that the simulation stays coherent, is fundamentally problematic when complex situations are addressed. To tackle the authoring bottleneck, rather than making explicit the whole set of possible scenarios, the HUMANS approach involves the dynamic computation of situations that varies depending on pedagogical rules.*

## Keywords

Virtual environnements, training, orchestration, complex situations, personalization.

## 1 Introduction

La réalité virtuelle permet aux apprenants d'expérimenter, de s'entraîner et de voir l'impact de leurs décisions. Elle est souvent utilisée pour former à des gestes techniques ou à des compétences techniques, mais elle est encore peu exploitée pour former à des situations socio-techniques com-

plexes (e.g. pressions temporelles, risques, équipes hétérogènes, expertises diverses). Dans ces situations où il n'y a pas toujours de solutions idéales, les opérateurs doivent s'adapter rapidement et prendre des décisions difficiles. Pour gérer ce type de situations, il est important de former les opérateurs à des compétences techniques mais aussi à des compétences non-techniques (e.g. leadership, travail en équipe, gestion du stress, prise de décision).

Afin de faciliter l'apprentissage de ces compétences par l'expérience personnelle, il est nécessaire de confronter l'apprenant avec une diversité de situations potentielles de développement [24], i.e. adaptées à son niveau de connaissance et de maîtrise de la tâche à réaliser en lui fournissant des ressources pour l'accomplir. Pour ne pas mettre l'apprenant en situation d'échec mais dans des situations de développement potentiel, les situations doivent être contrôlées pour être suffisamment difficiles mais pas trop et pour cibler les compétences adaptées à chaque apprenant.

Pour supporter ce type d'apprentissage, l'écriture des scénarios nécessite un travail conséquent. Cet effort nécessaire pour le passage à l'échelle de scénarios cohérents et précisément contrôlés constitue ce qu'on appelle l'*authoring bottleneck*<sup>1</sup> [22], et montre la nécessité de mettre en place des systèmes de scénarisation génériques et indépendants des applications, capables de créer des environnements adaptables, sans avoir à définir explicitement l'intégralité des scénarios possibles. Nous nous intéressons au processus de scénarisation de ces situations en environnement virtuel. La scénarisation est un processus comprenant à la fois la spécification du ou des déroulements possibles ou souhaitables de la simulation, et le contrôle (exécution, suivi et correction) du déroulement des événements en temps interactif. Un système de scénarisation est composé d'un ou plusieurs langages de scénarisation, pour modéliser le contenu scénaristique et les objectifs scénaristiques, et d'un moteur de scénarisation pour gérer dynamiquement la réalisation du scénario [3].

Dans cet article nous présentons la suite logicielle HUMANS (HUMAN Models based Artificial eNvironments Software platform), un système de scénarisation visant un ensemble d'objectifs souvent considérés comme contradictoires :

1. goulet d'étranglement de l'écriture

- la liberté d'action permettant l'apprentissage par l'erreur,
- le caractère dynamique et l'efficacité du contrôle du scénario pour garantir des apprentissages,
- la cohérence des comportements représentatifs de ceux observés sur le terrain et le transfert depuis et vers des situations réelles,
- l'explicabilité pour favoriser des apprentissages réflexifs, i.e. l'amener à réfléchir sur sa tâche et ses apprentissages,
- et l'adaptabilité du système, nécessaire pour la variabilité des scénarios.

## 2 Travaux connexes

Deux grandes catégories d'approches de systèmes de scénarisation sont souvent opposées : les approches orientées scénario et les approches centrées personnages. Les approches dites orientées scénario, mettent l'accent sur la qualité globale du scénario. Un contrôleur de scénario modifie dynamiquement les caractéristiques des personnages parfois sans cohérence entre leurs états mentaux et ce qui se passe dans l'environnement [16]. Or, [21] ont montré que l'incohérence dans les motivations des personnages affectait l'expérience de l'utilisateur et sa compréhension. Par ailleurs, dans des contextes de formation, il est alors difficile d'avoir des comportements explicables pour le jeu. Dans les approches centrées personnages, le scénario émerge des interactions entre l'utilisateur et les personnages virtuels. Le contrôle est distribué, chaque personnage étant responsable de ses propres prises de décision. Ces approches se focalisent sur la création de personnages virtuels dotés de processus décisionnels évolués (I-Storytelling [10], EmoEmma [18]). Si ces personnages s'adaptent dynamiquement et offrent une grande liberté d'action, le contrôle scénaristique reste difficile. De nombreux travaux visent des systèmes hybrides avec des personnages semi-autonomes aux comportements pseudo-cognitifs centrés scénario comme dans Scenario Adaptor [17], ISAT [16], IN-TALE [19] ou centrés personnages comme FearNot! [2], MRE [13]. Dans ces cas encore, il est difficile d'assurer la cohérence des comportements et d'avoir des comportements explicables. Des travaux novateurs ont été menés par [11] qui propose une planification sociale très évoluée avec un contrôle motivationnel ou encore dans Thespian qui propose un système de calcul des caractéristiques des personnages virtuels et de planification des événements à l'initialisation. Thespian garantit le passage par des points clés de l'histoire [21]. Toutefois, le système de [11] nécessite de définir explicitement des macro-actions de manière très contraignantes et Thespian ne permet pas l'adaptation dynamique du scénario et la réorientation du scénario en temps interactif.

**Positionnement.** Notre système de scénarisation doit assurer à la fois la liberté d'action de l'apprenant, le contrôle dynamique de la simulation, la cohérence des comportements présentés et l'adaptabilité de l'environnement vir-

tuel. Le verrou lié à ces travaux naît de l'incompatibilité entre ces différents objectifs : le contrôle s'oppose à l'adaptabilité, la liberté d'action va à l'encontre du contrôle, l'alliance du contrôle et de l'adaptabilité met en péril la cohérence, et ainsi de suite. Notre système de scénarisation doit être générique et indépendant des applications. Dans le cadre de nos travaux, le contrôle vise à personnaliser les situations d'apprentissage pour un seul apprenant.

## 3 L'approche HUMANS centrée personnages

Pour conserver la liberté d'action et assurer l'adaptabilité et l'explicabilité des comportements, nous faisons l'hypothèse qu'il est possible de générer dynamiquement et automatiquement des situations d'apprentissage à partir de modèles de connaissances qui sous-tendent la simulation. L'originalité de nos travaux est de centrer notre approche sur l'activité humaine et les facteurs humains. La suite logicielle HUMANS vise à créer des **environnements virtuels informés** prenant en compte ou rendant compte des **comportements humains** variés, en particulier en situations dégradées impliquant des compromis, des actions pouvant être erronées ou non-optimales. HUMANS est composée de moteurs décisionnels s'articulant autour de modèles qui leur permettent de disposer de représentations communes (figure 1).

### 3.1 Moteurs HUMANS

HUMANS est composé de quatre moteurs décisionnels : REPLICANTS gère les personnages virtuels autonomes, SELDON la scénarisation à travers deux sous-moteurs (TAILOR et DIRECTOR), WORLD MANAGER l'exécution du monde et MONITOR les traces de l'apprenant.

**REPLICANTS : Personnages virtuels autonomes.** Pour faciliter l'adaptabilité, les personnages virtuels sont autonomes et dotés de processus cognitifs. Ils peuvent réaliser des activités individuelles ou collectives (co-activité, collaboration, coopération). Ils ont des émotions, des personnalités diverses, des relations sociales. Ils peuvent être stressés, fatigués, expérimentés. Ils ont des comportements « humains » et peuvent faire des compromis, transgresser des règles de sécurité, faire des erreurs, générer des perturbations, faciliter le travail d'équipe ou pallier les comportements erronés des autres personnages ou de l'apprenant [12], [15], [14], [8].

**SELDON : Scénarisation.** Pour contrôler les situations de développement et conserver la cohérence du monde, le modèle de scénarisation, SELDON, oriente indirectement le déroulement des événements en réalisant des ajustements ponctuels sur l'état du monde ou sur les personnages sans leur donner d'ordres [3]. SELDON se décompose en deux processus : TAILOR sélectionne les objectifs scénaristiques et DIRECTOR orchestre ces objectifs.

a. TAILOR utilise la trace d'activité de l'apprenant pour diagnostiquer un profil dynamique [9]. Pour créer ce

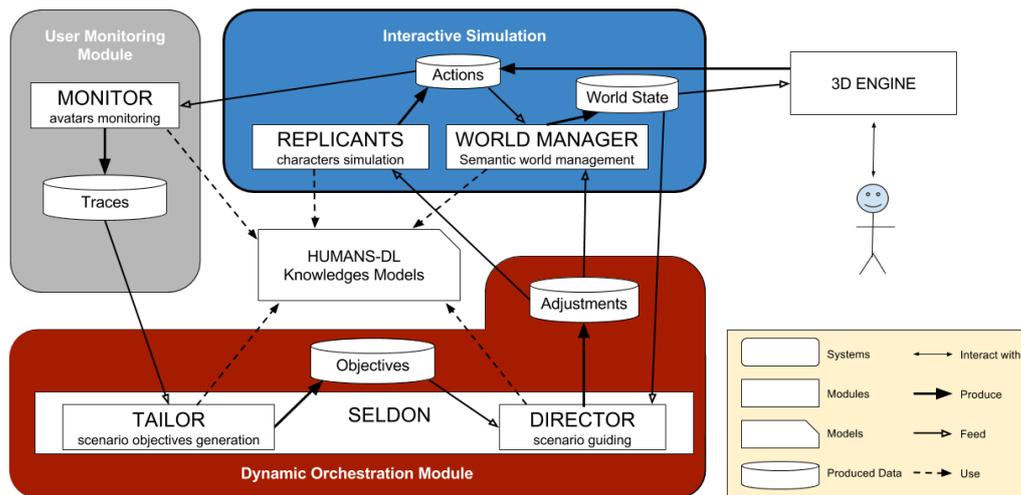


FIGURE 1 – Organisation générale de HUMANS

profil, nous proposons une formalisation mathématique et algorithmique de la théorie de Zone Proximale de Développement [24]. Un espace vectoriel de classes de situations est associé à des valeurs de croyance sur la capacité de l'apprenant à gérer ces situations. Les croyances sont calculées grâce à des mécanismes reposant sur la théorie des fonctions de croyances. À partir de ce modèle, un algorithme génétique sélectionne des objectifs scénaristiques sous la forme d'espaces de scénario dans la zone proximale de développement (figure 2). Il cherche à déterminer les situations et les propriétés du scénario jugées comme pertinentes pour l'apprenant. Par exemple, si l'apprenant n'arrive pas à gérer une classe de situation, le moteur sélectionne des situations du même ordre, voire plus simples. Au contraire, si l'apprenant gère correctement les situations, le moteur étend la zone proximale de développement avec des situations plus difficiles, plus critiques, etc. TAILOR propose alors à DIRECTOR des objectifs scénaristiques sous forme de valeurs de désirabilité sur des situations particulières et de contraintes globales sur les propriétés du scénario (e.g. complexité, criticité).

b. Pour répondre à ces objectifs, DIRECTOR utilise les modèles qui sous-tendent la simulation pour prédire son évolution via un moteur de planification [3]. Il calcule un scénario à partir de prédictions et d'un ensemble d'ajustements possibles (figure 3). Trois types d'ajustements sont possibles : les happenings (déclenchement d'événements exogènes sans impact sur la cohérence du système), les late commitments et les contraintes d'occurrence. Le late commitment permet de préciser progressivement durant la simulation les états laissés incertains à l'initialisation. La modification des contraintes d'occurrence permet d'outrepasser les choix aléatoires des comportements probabilistes. Ces ajustements sont transmis aux moteurs d'exécution du monde et de génération des comportements des personnages virtuels pour influencer leur évolution. DIREC-

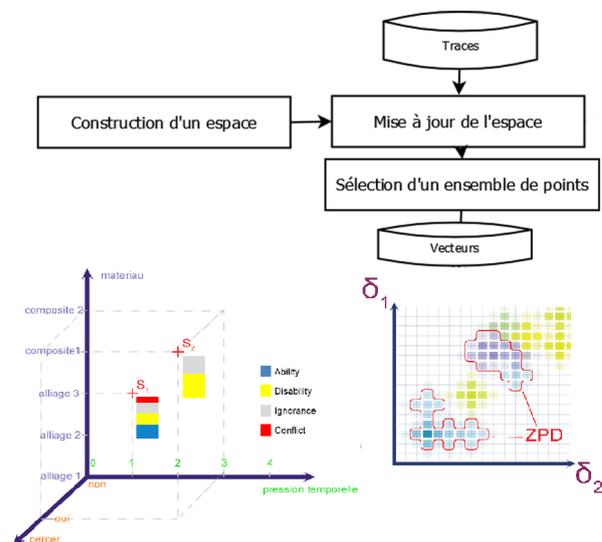


FIGURE 2 – TAILOR : sélection des espaces de scénario

TOR compare l'évolution de l'état du monde avec le scénario planifié. Dans le cas où le scénario effectif dévie du scénario planifié, le moteur planifie un nouveau scénario tenant compte des changements. DIRECTOR repose sur des opérateurs de planification et les modèles de connaissances.

**MONITOR : suivi de l'apprenant.** MONITOR enregistre les actions de l'apprenant, de détecter les bonnes et les mauvaises pratiques, les conséquences effectives ou les probabilités de conséquences sur le système technique et humain et de faire un retour en temps réel au formateur en mode « jeu » (figure 8) à l'apprenant [1].

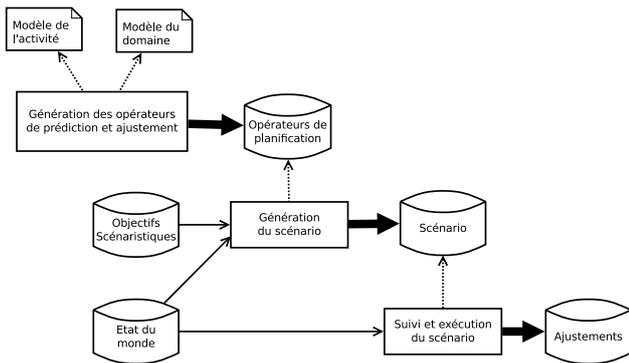


FIGURE 3 – Processus DIRECTOR

**WORLD MANAGER : gestion du monde.** Le moteur d'exécution du scénario, WORLD MANAGER maintient la cohérence et l'état du monde décrit par le modèle du monde. Il prend en compte les demandes d'action de l'apprenant ou des personnages virtuels pour mettre à jour l'état du monde en fonction des règles de fonctionnement [9]. Ce moteur offre également une interface aux autres moteurs décisionnels qui souhaitent obtenir des informations sur le modèle sémantisé du monde, ses règles de fonctionnement ou sur son état courant. Il crée automatiquement des faits qui sont valides avec l'état du monde courant. On dispose ainsi d'un pouvoir génératif suffisant pour générer procéduralement du contenu riche à la volée. Une ouverture des scénarios permise par l'indécision portée par les valeurs des états dits committables (non initialisés au démarrage) offre un mécanisme de résilience face aux actions de l'utilisateur, ou des entités autonomes, allant à l'encontre du scénario prescrit.

### 3.2 Modèles de connaissance

Dès lors que l'on souhaite introduire dans des environnements virtuels des entités devant interpréter leur environnement, la question du raisonnement sur des connaissances structurées se pose. Pour raisonner HUMANS s'appuie sur des modèles de connaissances regroupés sous l'appellation HUMANS-DL : le modèle d'activité, le modèle du monde, le modèle de causes/conséquences. Ils sont directement interprétables par les moteurs décisionnels et s'articulent entre eux.

**Approche orientée connaissance.** Les connaissances à représenter et à exploiter dans les environnements virtuels pour l'apprentissage humain concernent trois domaines : la scénarisation pédagogique (diagnostic, rétroactions, adaptation, etc.), la génération des comportements des personnages virtuels et les différents objets composant la scène virtuelle, les actions qui y sont possibles et les effets potentiels. Une contrainte forte réside dans le fait que les connaissances dans ces domaines doivent pouvoir être traitées de façon coordonnée, ce qui implique des représentations et des processus de traitement compatibles qui communiquent ou partagent certaines des don-

nées. Par exemple, l'état du monde virtuel et les actions autorisées à un instant constituent des données importantes, à la fois pour permettre aux personnages virtuels d'adapter leur comportement au contexte et pour identifier les actions entreprises par l'apprenant. Ces connaissances doivent être exprimées par des représentations symboliques sémantiquement interprétables. Ces modèles sont souvent renseignés par l'informaticien : il est l'interface entre l'environnement virtuel et les experts (du domaine, formateurs, etc.). Il doit transcrire dans des formalismes interprétables des connaissances complexes qui nécessitent des analyses très pointues. En informatique, plusieurs formalismes graphiques ou mathématiques ont été proposés pour modéliser ces connaissances dans les environnements virtuels (réseaux à propagation de marques, automates, réseaux de Petri, etc. voir un état de l'art complet dans [3]). Même si les formalismes tels que les automates rencontrent un grand succès dans le domaine de l'animation comportementale, notamment grâce à leur puissance d'expression et le caractère calculable et vérifiable, ils ne favorisent pas toujours la prise en compte des facteurs humains. Par ailleurs, ces modèles sont souvent illisibles dès que la tâche décrite devient un peu complexe : la taille des automates ou des réseaux de Petri augmentant de manière exponentielle en fonction de la taille de l'application, ils deviennent illisibles même par un spécialiste. Enfin, hormis les automates hiérarchiques parallèles ou réseaux de tâches hiérarchiques, le pouvoir d'abstraction de ce type de représentation est faible. Notre approche est un peu différente car nous souhaitons proposer des langages auteur pour permettre aux experts, spécialistes de l'analyse d'activité, du domaine ou encore de la pédagogie, de décrire ces expertises. Nous avons souhaité, ne pas fournir un seul modèle et un seul formalisme capable d'unifier toutes ces connaissances que seul un informaticien serait capable de renseigner. Nous proposons ainsi des modèles qui facilitent la manipulation de concepts communs avec des vues différentes pour chaque domaine (ergonomie, risque, didactique, pédagogie, fonctionnement technique, etc.). Ces modèles visent une conception collaborative. Chaque expert peut ainsi saisir ses modèles avec le même outil et sur la base du même modèle mais avec des approches différentes et des regards croisés.

**ACTIVITY-DL** est le modèle pour décrire l'activité de l'apprenant et des personnages virtuels autonomes [3]. L'activité est la mise en œuvre d'une procédure ou d'un ensemble d'actions en contexte réel. La modélisation de l'activité décrit l'observation de cette activité. L'activité se distingue de la procédure prescrite en ce qu'elle intègre également les comportements non nominaux mais qui sont malgré tout observables en contexte réel. Ainsi, l'activité décrit les écarts à la procédure s'illustrant par des arrangements ou des violations. Ces écarts nécessitent d'être caractérisés pour préciser dans quelles conditions ces comportements sont tolérables du point de vue de l'activité observée. ACTIVITY-DL est inspiré des langages de modélisation ergonomiques (MAD, GTA) et des HTN (voir

un état de l'art sur ces formalismes dans [7]). Il repose sur une représentation des tâches sous forme d'arbre. Les tâches abstraites sont des compositions de sous-tâches sur plusieurs niveaux. Au niveau le plus bas, les feuilles correspondent aux actions effectives réalisées par les opérateurs, et donc réalisables dans l'environnement. Celles-ci sont directement liées aux actions décrites dans le modèle du monde en WORLD-DL. Ce langage permet de définir d'une part chaque tâche avec ses conditions (préconditions, conditions d'arrêt) et son contexte d'exécution, et d'autre part une organisation hiérarchique entre ces tâches suivant une dimension temporelle en s'appuyant sur les opérateurs temporels d'Allen et une dimension logique (figure 4).

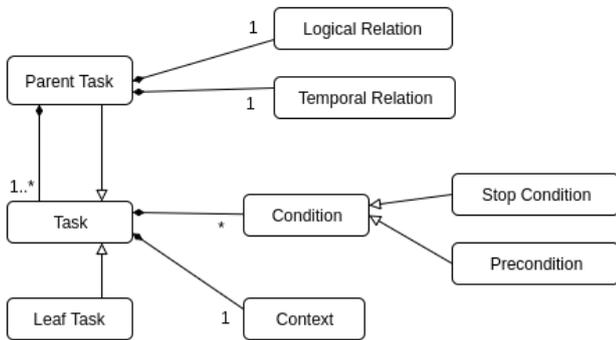


FIGURE 4 – ACTIVITY-DL

**WORLD-DL** permet de décrire à la fois les entités qui composent le monde, les actions possibles, les relations qu'elles entretiennent, mais également les comportements qui régissent l'évolution de ces entités, les conditions dans lesquelles les actions sont possibles et les effets qu'elles provoquent [9]. WORLD-DL s'appuie sur les standards de représentation OWL et RDF qui sont des formalismes informatiques, ce qui permet à la représentation d'être interprétable. En outre, la description des comportements du système dans une syntaxe telle que celle des règles JENA, un moteur de règles java, les rend explicites et donc accessibles et inspectables par des moteurs décisionnels tiers. Notamment, ces moteurs peuvent effectuer des requêtes et opérer des inférences sur le modèle pour générer leurs propres comportements. La posture ontologique, mise en œuvre au travers de OWL, offre une large expressivité. Et les primitives que nous avons définies pour la gestion de la partie dynamique du système offrent la possibilité de concevoir simplement des comportements non triviaux. Un des éléments important de ce méta-modèle est le late-commitment qui consiste à préciser progressivement durant la simulation des états laissés incertains à l'initialisation. Dans la plupart des environnements virtuels, le scénario de la simulation est limité par les conditions initiales. Cependant, il existe dans certains cas des états qu'il n'est pas nécessaire de définir dès le début de la simulation (états committable figure 5). Le late commitment, pro-

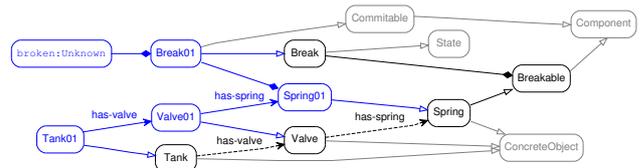


FIGURE 5 – Exemple d'état committable en WORLD-DL

posé par [23], consiste à ajouter, au cours de la simulation, un ensemble de faits qui seront considérés rétrospectivement comme faisant partie des conditions initiales. Ces faits sont ajoutés en fonction des besoins du scénario, à partir d'un ensemble de *framing operators* qui définissent les éléments pouvant y être ajoutés. Notre modèle du late commitment s'inspire de ce principe, mais se rapproche davantage des travaux de [20] sur l'Initial State Revision (ISR), en cela que ce dernier déclare explicitement les états considérés comme indéfinis et les ensembles de valeurs pouvant être prises par ces états. L'ISR propose la génération d'un scénario hors-ligne, la nécessité de spécifier les valeurs des états apparaît au cours du processus de planification, lorsque ces états interviennent dans les préconditions d'une action.

**CAUSALITY-DL** permet la description de chaînes de causalité significatives. Il ne s'agit pas de décrire exhaustivement les changements d'état du monde possibles, comme pourrait le faire un graphe d'état, mais uniquement ce qui est pertinent pour une application donnée. Il sert à spécifier les relations de causalité entre les événements d'intérêt qui peuvent survenir dans l'environnement virtuel, ainsi que les barrières qui peuvent empêcher la propagation de la causalité entre ces événements. CAUSALITY-DL utilise des éléments de l'ontologie du modèle du monde représenté en WORLD-DL, et est inspiré de formalismes d'analyses de risques : nœuds papillons et arbres de causes. Dans le cadre de la scénarisation, ce modèle permet de spécifier en amont un espace de trames scénaristiques d'intérêt (scénarios accidentels ressortis des analyses de risques, par exemple). Étant donné qu'il permet d'associer des valeurs aux événements (probabilité, complexité, etc.), il est également utilisé pour calculer les propriétés des différentes trames scénaristiques (crédibilité, complexité, gravité). La crédibilité est ici considérée comme la fréquence d'occurrence (événements courants, rares, improbables, etc.). Les modèles de causalité sont des graphes orientés acycliques dont les nœuds se réfèrent à des événements représentés dans le modèle du monde. Ces événements peuvent être liés par des relations de subsomption ou de causalité. Les relations de causalité sont également déterminées par des portes logiques indiquant la conjonction ou la disjonction, et sont conditionnées par la levée d'un ensemble de barrières, elles-aussi correspondant à des événements du modèle du monde (figure 6).

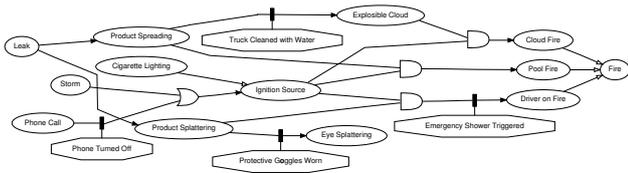


FIGURE 6 – Exemple représenté en CAUSALITY-DL

### 3.3 Généricité

HUMANS a été utilisée dans divers cas d'application de formation : prévention des risques, montage aéronautique, garde d'enfants, gestion de crise, sauvetage de blessés, gestion d'hémorragie post-partum et conduite automobile. HUMANS est modulaire, selon les applications ou besoins, tous les moteurs ne sont pas utilisés. Il est ainsi possible d'utiliser HUMANS comme soutien au formateur avec des conseils ou pour remplacer le formateur pour de la formation en autonomie. Nous détaillons ici certains de ces projets.

**Formation à la prévention des risques.** Le projet V3S a permis de développer deux environnements virtuels pour la formation à la prévention des risques : démontage de tuyaux et chargement de matières dangereuses sur des sites à haut risque [4]. Ce projet a permis de mettre en œuvre des personnages virtuels autonomes aux comportements erronés (e.g. compromis, violation, erreurs de connaissances), le suivi de l'apprenant et le moteur de planification DIRECTOR [3]. Pour illustrer le fonctionnement de DIRECTOR, imaginons que TAILOR souhaite déclencher une fuite. DIRECTOR pourrait choisir de déclencher une fuite de vanne. Il pourrait alors prévoir comme ajustements : un réservoir plein, un ressort usé pour empêcher la vanne de revenir et un événement pour stresser l'opérateur qui risque alors de ne pas accompagner la vanne (figure 7). DIRECTOR vérifie, ensuite, si tout se passe comme prévu .

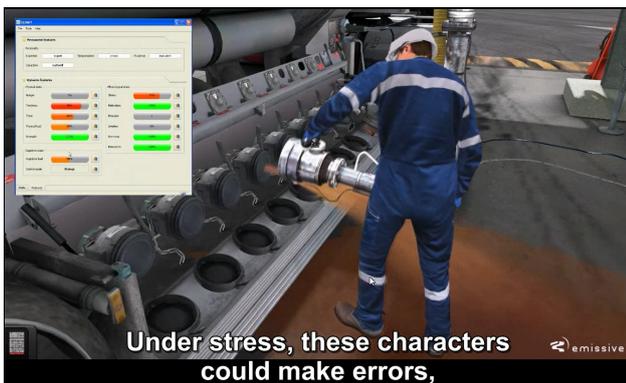


FIGURE 7 – Exemple d'ajustements - projet V3S

**Formation des assistantes de vie à la garde d'enfants.** Dans le projet SIMADVF, le moteur de suivi de l'apprenant

détecte les actions erronées de l'apprenant, de déterminer les conséquences plus ou moins graves de ses actions, de sélectionner des événements perturbateurs et de proposer un rejeu avec des explications sur les conséquences potentielles ou avérées des actions de l'apprenant [1] (figure 8).



FIGURE 8 – Rejeu - projet SIMADVF

**Formation au montage aéronautique.** Le projet NIKITA a permis d'élaborer le moteur de sélection d'objectifs scénaristiques, TAILOR. TAILOR identifie un profil dynamique de l'apprenant et sélectionne les situations mettant en jeu des compétences les plus adaptées (figure 9).



FIGURE 9 – Profil apprenant - projet NIKITA

**Formation au sauvetage de blessés.** Le projet VIC-TEAMS a pour objectif de former, en environnement virtuel, des leaders médicaux au sauvetage de blessés suite à un afflux massif de blessés (e.g. au combat, suite à des attentats ou catastrophes naturelles ou industrielles). Les membres de l'équipe sont joués par des personnages virtuels autonomes (figure 10). Dans ce projet les deux focus traités sont : la dimension collective et le stress. Le moteur décisionnel des personnages virtuels est capable de générer des comportements d'équipes variés. Ils peuvent reproduire des comportements erronés liés aux compétences non-techniques (e.g. croyances erronées sur le monde ou l'activité collective, mauvaises communications, comportements impactés par le stress). Le moteur de scénarisation

planifie, selon les compétences non-techniques de l'apprenant, des comportements "aidants" ou "perturbateurs" pour maintenir un certain niveau de difficulté et de stress. L'incertitude de l'évolution des situations est un facteur difficile pour prendre des décisions et notre objectif est non pas d'aider l'apprenant à trouver la solution idéale mais de l'aider à prendre conscience des choix qui s'offrent à lui et à prendre plus sereinement des décisions dans le futur.



FIGURE 10 – Équipes - projet VICTEAMS

**Formation aux situations critiques en conduite et en médecine.** MacCoy Critical est un projet pluridisciplinaire qui vise à étudier et à améliorer les dispositifs de formation utilisant la simulation et les environnements virtuels. Nous nous intéressons en particulier à l'entraînement aux compétences non-techniques dans les situations critiques. Le projet s'applique à deux domaines aux forts enjeux en santé publique et en sécurité qui sont la conduite automobile et la médecine. L'enjeu est de proposer un système de scénarisation capable de générer dynamiquement les situations critiques sans avoir à les écrire en amont. Nous avons défini, avec les partenaires du projet, des dimensions qui caractérisent ces situations. Parmi ces dimensions, nous trouvons les dilemmes [6]. Les situations dilemmatiques peuvent être définies comme étant des situations où il n'existe pas vraiment de "bonne" solution. C'est à dire des situations où le protagoniste est confronté à un choix exclusif dont les conséquences seront toujours négatives. Afin de générer ces situations, nous avons proposé une approche générative qui repose sur les modèles décrits précédemment [5]. Le modèle d'activité est utilisé pour identifier les tâches contradictoires, afin de garantir l'exclusivité du choix, et le modèle de causalité permet d'identifier les tâches dont la non-réalisation conduirait à des conséquences négatives. La figure 11 illustre un exemple de dilemme en conduite automobile.

## 4 Conclusion

Nous avons présenté l'approche HUMANS, un système de scénarisation d'environnements virtuels pour la formation qui répond à quatre objectifs : la liberté d'action de l'utilisateur, le caractère dynamique du contrôle, la cohérence

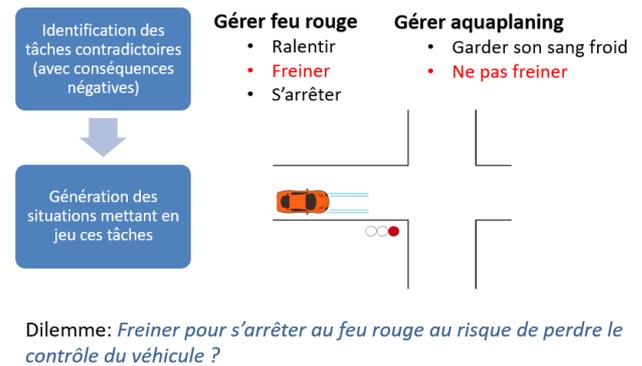


FIGURE 11 – Exemple de génération de dilemme - projet MacCoy Critical

des comportements et l'adaptabilité. HUMANS s'appuie sur une approche émergente et modulaire. La plate-forme a été exploitée dans des contextes de formation professionnelle variés.

Aujourd'hui, nous nous intéressons plus particulièrement à la scénarisation de situations critiques ou de crise impliquant des personnages virtuels autonomes engagés dans des décisions collectives. Nous visons à adapter ces situations selon le profil dynamique de l'apprenant (e.g. stress, compétences, émotions). La scénarisation que nous visons est une sorte de Kobayashi Maru inspiré de la simulation pour l'entraînement des officiers de Starfleet dans l'univers de fiction de Star Trek. Le but de cette simulation est d'analyser la réaction des officiers face à une situation sans issue. Le système cherche alors à générer des situations dans lesquelles il n'est pas possible de gagner. La différence ici est qu'en situation de formation, nous cherchons à générer des situations limites mais dans lesquelles l'apprenant ne doit pas sortir complètement perdant. Il faut donc trouver le compromis entre challenge, stress et apprentissage.

## Remerciements

Les auteurs remercient l'ANR, la DGA, la DGCIS, la Région Hauts-de-France et le FEDER financeurs de ces travaux. Les auteurs remercient les co-directeurs de thèse, tous les anciens doctorants qui ont contribué à construire HUMANS : Lydie Edward, Kahina Amokrane, Margot Lhommet, Camille Barot, Kevin Carpentier, Lucile Callebort et tous les étudiants qui ont contribué aux développements. Les auteurs remercient les partenaires des différents projets qui ont permis l'avancement de ces travaux.

## Références

- [1] K. Amokrane-Ferka, D. Lourdeaux, and G. Michel. Tracking and dynamic scenario adaptation system in virtual environment. In Springer, editor, *Proceeding of The 16th International Conference on Artificial Intelligence in Education*, volume 7926, pages 758–761, Memphis, États-Unis, Jul 2013.

- [2] R. Aylett, R. Figueiredo, S. Louchart, J. Dias, and A. Paiva. Making it up as you go along-improvising stories for pedagogical purposes. In *Intelligent Virtual Agents*, pages 304–315, 2006.
- [3] Camille Barot. *Scénarisation d’environnement virtuel. Vers un équilibre entre contrôle, cohérence et adaptabilité*. PhD thesis, Université de Technologie de Compiègne, Compiègne, February 2014.
- [4] Camille Barot, Domitile Lourdeaux, Jean-Marie Burkhardt, Kahina Amokrane, and Dominique Lenne. V3S : a virtual environment for risk management training based on human-activity models. *PRESENCE : Teleoperators and Virtual Environments*, 2013.
- [5] Azzeddine Benabbou, Domitile Lourdeaux, and Dominique Lenne. Dynamic generation of dilemma-based situations in virtual environments. In *Intelligent Tutoring Systems*, page 526. Springer, 2016.
- [6] Jean Marie Burkhardt, Valentin Corneloup, Catherine Garbay, Yannick Bourrier, F Jambon, Vanda Luengo, A Job, Ph Cabon, A Benabbou, and D Lourdeaux. Simulation and virtual reality-based learning of non-technical skills in driving : critical situations, diagnostic and adaptation. *IFAC-PapersOnLine*, 49(32) :66–71, 2016.
- [7] J.M. Burkhardt, D. Lourdeaux, S. Couix, and M. Rouillé. La modélisation de l’activité humaine finalisée. In *Le traité de la réalité virtuelle : Volume 5, L’humain virtuel*. Les Presses-Mines Paris, 2009.
- [8] Lucile Callebert, Domitile Lourdeaux, and Jean-Paul A. Barthès. A trust-based decision-making approach applied to agents in collaborative environments. In *Proceedings of the 8th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2016), Volume 1, Rome, Italy, February 24-26, 2016.*, pages 287–295, 2016.
- [9] Kevin Carpentier. *Scénarisation personnalisée dynamique dans les environnements virtuels pour la formation*. PhD thesis, Université de Technologie de Compiègne, Compiègne, January 2015.
- [10] M. Cavazza, F. Charles, and S. J Mead. Character-based interactive storytelling. *IEEE Intelligent Systems*, 17(4) :17–24, 2002.
- [11] Hsueh-Min Chang and Von-Wun Soo. Planning to influence other characters in agent-based narratives. In *Integrating Technologies for Interactive Stories Workshop, International Conference on Intelligent Technologies for Interactive Entertainment*, pages 12—17, 2008.
- [12] Lydie Edward. *Modélisation décisionnelle de personnages virtuels autonomes évoluant dans un environnement pour la présentation des risques sur les sites SEVESO*. PhD thesis, Université de Technologie de Compiègne, 2011.
- [13] R. Hill, J. Gratch, W. L. Johnson, C. Kyriakakis, C. LaBore, R. Lindheim, S. Marsella, D. Miraglia, B. Moore, J. Morie, J. Rickel, M. Thiébaux, L. Tuch, R. Whitney, J. Douglas, and W. Swartout. Toward the holodeck : integrating graphics, sound, character and story. In *Proceedings of the fifth international conference on Autonomous agents*, AGENTS ’01, pages 409–416, New York, NY, USA, 2001. ACM.
- [14] Lauriane Huguet, Nicolas Sabouret, and Domitile Lourdeaux. Simuler des erreurs de communication au sein d’une équipe d’agents virtuels en situation de crise. In *Rencontres des jeunes chercheurs en Intelligence Artificielle (RFIA 2016)*, Actes Rencontres des Jeunes Chercheurs en Intelligence Artificielle, Clermont-Ferrand, France, June 2016.
- [15] Margot Lhomme. *REPLICANTS : Humains virtuels cognitifs, émotionnels et sociaux. De l’empathie cognitive à l’empathie affective*. PhD thesis, Université de Technologie de Compiègne, 2012.
- [16] B Magerko, R. E. Wray, L. S. Holt, and B. Stensrud. Improving interactive training through individualized content and increased engagement. In *Interservice/Industry Training, Simulation & Education Conference (IITSEC)*, 2005.
- [17] J. Niehaus and M. Riedl. Scenario adaptation : An approach to customizing computer-based training games and simulations. In *14th International Conference on Artificial Intelligence in Education (AIED 2009) Workshops Proceedings*, page 89, 2009.
- [18] D. Pizzi and M. Cavazza. Affective storytelling based on characters’ feelings. In *Proceedings of the AAAI Fall Symposium on Intelligent Narrative Technologies*, 2007.
- [19] M. O Riedl, A. Stern, D. Dini, and J. Alderman. Dynamic experience management in virtual worlds for entertainment, education, and training. *International Transactions on Systems Science and Applications, Special Issue on Agent Based Systems for Human Learning*, 4(2) :23–42, 2008.
- [20] Mark Owen Riedl. *Narrative generation : balancing plot and character*. PhD thesis, North Carolina State University, 2004. AAI3154351.
- [21] Mei Si. *Thespian : a decision-theoretic framework for interactive narratives*. PhD thesis, University of Southern California, 2010.
- [22] Ulrike Spierling and Nicolas Szilas. Authoring issues beyond tools. In *Interactive Storytelling*, pages 50–61. Springer, 2009.
- [23] Ivo Martinus Theodorus Swartjes. *Whose story is it anyway? : how improv informs agency and authorship of emergent narrative*. PhD thesis, Enschede, May 2010. SIKS Dissertation Series No. 2010-20.
- [24] L. S. Vygotsky. *Mind in Society*. Harvard University Press, Cambridge, MA, 1978.

# Interroger intuitivement le Web des Données avec SimplePARQL

Thomas Raimbault

Sonia Djebali

DE VINCI RESEARCH CENTER — ESILV  
Pôle Universitaire Léonard De Vinci, Paris – La Défense

{thomas.raimbault, sonia.djebali}@devinci.fr

## Résumé

*SimplePARQL est une approche intuitive d'interrogation du Web des Données ne nécessitant pas une connaissance préalable de la structure des bases RDF ni des identifiants des ressources. SimplePARQL est une généralisation du langage de requêtes SPARQL utilisant, en plus des mots-clés SPARQL, des termes du langage naturel au sein des triplets. Nous proposons la plateforme `universal-endpoint.com`, qui permet d'interroger des bases RDF du Web des Données avec des requêtes SimplePARQL. Les requêtes SPARQL sont aussi acceptées.*

## Mots Clefs

SimplePARQL, SPARQL intuitif, Web des Données, Linked Data, RDF

## Abstract

*SimplePARQL is an intuitive approach to query the Web of Data, where knowing the ontology (classes and properties) and resources' identifiers from an RDF base are not required. SimplePARQL is a generalisation of SPARQL query language using keywords in addition to SPARQL elements. We implemented our approach on the platform `universal-endpoint.com`, where SimplePARQL (and SPARQL) queries can be written and executed.*

## Keywords

Intuitive SPARQL, Web of Data, Linked Data, RDF bases

## 1 Introduction

Le travail de recherche présenté et mis en application dans cet article est tiré de l'article théorique [3], publié en anglais en 2015, portant sur la nouvelle approche SimplePARQL. L'approche SimplePARQL offre la possibilité d'interroger intuitivement les bases RDF du Web des Données, à travers les endpoints SPARQL [7] existants, sans nécessiter une connaissance préalable de la structure ontologique de ces bases et/ou des identifiants des ressources. Le Web des Données – encore appelé Linked Data ou Web Sémantique [2] – est constitué de centaines de bases RDF [5] inter-liées formant un vaste réseau de milliards

de triplets RDF. Une base RDF est composée d'un ensemble de *triplets*, où chaque triplet s'exprime de la forme (sujet, prédicat, objet). Le sujet représente la *ressource* à décrire, le prédicat représente une *propriété* applicable à cette ressource, enfin l'objet représente la valeur. Chaque *ressource* est identifiée de manière unique, par un IRI<sup>1</sup> pour un accès à travers le Web, au sein de la base RDF où elle est stockée. Pour récolter et manipuler les données d'une base RDF, SPARQL<sup>2</sup> est le langage de requêtes recommandé par le W3C<sup>3</sup>. L'écriture d'une requête SPARQL est cependant complexe, et reste inaccessible à la plupart des utilisateurs potentiels du Web des Données. En effet (i) l'agencement des ressources entre elles n'est généralement pas connu d'avance; (ii) les identifiants des ressources ne sont en principe pas connus (les IRI n'ont qu'un rôle pratique d'identification unique).

Face à la difficulté d'écrire des requêtes SPARQL, il existe dans la littérature plusieurs outils d'aide à l'*exploration* du Linked Data sans la production de requêtes SPARQL. On peut citer les travaux Visual data Web [6], Sparklis [4], ou encore Freebase Easy [1]. Hélas, ces approches limitent l'exploration des bases aux ressources préalablement indexées (et souvent stockées) en interne. Seule la plateforme Freebase Easy propose aussi une interface (API) d'*exploitation* des données mais de manière *ad hoc* non SPARQL. On notera enfin que la plateforme Sparklis renseigne la requête SPARQL théorique associée à l'exploration en cours des données.

Notre contribution est double, et est exploitable de manière centralisée au sein d'une plateforme : `universal-endpoint.com`. D'une part, nous permettons l'écriture de pseudo requêtes SPARQL, que nous appelons requêtes *SimplePARQL*, plus intuitives à écrire que des requêtes SPARQL (ces dernières sont aussi acceptées), sans nécessiter une connaissance préalable des bases interrogées. D'autre part nous permettons la diffusion automatique d'une requête aux différentes bases RDF du Linked Open Data.

1. Internationalized Resource Identifier

2. Sparql Protocol and RDF Query Language

3. World Wide Web Consortium, <http://www.w3.org/>.

Cet article est organisé comme suit. La Section 2 présente notre approche et la plateforme permettant l'écriture intuitive des requêtes SimplePARQL. La Section 3 conclue cet article.

## 2 L'approche SimplePARQL

Dans les bases RDF, les ressources sont décrites par leurs liens aux autres ressources et leurs liens à des valeurs littérales. La sémantique des bases RDF est donc contenue dans ces relations. Cependant, il y a un écart entre la représentation structurée que perçoit l'utilisateur et celle physiquement présente dans une base RDF. Par exemple, l'information (Paris, capitale-de, France) pour l'utilisateur est concrètement stockée sous la forme (resource1,propriété2,resource3), (resource1,label,"Paris"), (resource3,label,"France"), (propriété2,label,"capitale-de"). Le but de notre approche est de réduire cet écart. Avec SimplePARQL les utilisateurs construisent des requêtes structurées (toujours en triplets) d'une façon intuitive et sans nécessiter une connaissance préalable du vocabulaire de la base et des IRI.

Supposons que nous souhaitons, via le endpoint SPARQL de *DBpedia*, connaître les peintres nés entre le 01-01-1700 et le 01-01-1900 en Allemagne et éventuellement ceux en plus décédés en Allemagne. La requête SPARQL suivante permet d'y arriver (résultats en FIGURE 1)<sup>4</sup>.

```
Requête 1 :
PREFIX rdf:<http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#>
PREFIX dbo:<http://dbpedia.org/ontology/>
PREFIX dbr:<http://dbpedia.org/resource/>
SELECT DISTINCT *
WHERE {
  ?x rdf:type dbo:Painter.
  ?x dbo:birthDate ?birth.
  ?x dbo:birthPlace ?cityBirth.
  ?cityBirth dbo:country dbr:Germany.
  OPTIONAL {
    ?x dbo:deathPlace ?cityDeath.
    ?cityDeath dbo:country dbr:Germany. }
  FILTER (str(?birth)>="1700-1-1"&&str(?birth)<"1900-1-1")
}
```

On constate sur cet exemple que sans connaître l'IRI des ressources `<http://dbpedia.org/resource/Painter>`, `<http://dbpedia.org/ontology/birthDate>`, *etc.*, l'utilisateur aurait du mal à formuler sa requête SPARQL ; et d'autant plus de mal avec d'autres bases RDF du Linked Data où les IRI n'ont pas de signification et sont juste des identifiants.

### 2.1 Des requêtes proches de l'humain

SimplePARQL fournit un système d'interrogation structuré en triplets des bases RDF en utilisant des requêtes plus naturelles et intuitives pour l'utilisateur. L'idée est de permettre aux utilisateurs de raisonner sur des données concrètes – du texte, des nombres, des dates, *etc.* – contenues au sein des littéraux, et rarement dans les IRI. Ainsi l'utilisateur peut écrire ses requêtes comme une conjonction de triplets, mais où cette fois-ci une ou plusieurs composantes d'un triplet peut être autre chose qu'une variable,

4. Pour plus d'informations sur le langage SPARQL <https://www.w3.org/TR/sparql11-overview/>

un IRI, un nœud blanc, ou un littéral. Nous avons appelé ce nouvel élément de la requête une *ressource imprécise*.

Concrètement, notre système « élargit » la requête SimplePARQL pour permettre de faire coïncider les *ressources imprécises* aux données concrètes associées aux ressources recherchées. Ainsi la requête SimplePARQL d'origine est transformée en *N* requêtes SPARQL possibles pour faire correspondre les *ressources imprécises* avec des ressources pertinentes dans la base RDF. La FIGURE 2 illustre notre approche et l'écart d'interprétation entre l'utilisateur et la structure physique en base.

Reprenons l'exemple de la requête SPARQL précédente "Requête 1", mais maintenant écrite en SimplePARQL :

```
Requête 2 :
SELECT *
WHERE { ?x a Painter
  ?x (birth Date) ?birth
  ?x (birth Place) "Germany"
  OPTIONAL {?x (death Place) "Germany"}
  FILTER (str(?birth)>="1700-1-1" &&str(?birth)<"1900-1-1")
}
```

Cette requête contient finalement une seule variable, ?x (l'objectif de la requête), et cinq *ressources imprécises* : Painter, (birth Date), (birth Place), (death Place) et "Germany". Les résultats d'une requête SimplePARQL sont présentés avec les justifications de "matching" des *ressources imprécises* sur des données concrètes, comme cela présenté en FIGURE 3.

Une requête SimplePARQL peut être composée de mots-clés SPARQL, de variables précédées par le symbole '?', d'IRI entre deux chevrons (< ... >), d'un IRI court<sup>5</sup>, de l'élément a<sup>6</sup>, de nœuds blancs, de littéraux entre double quotes, et de *ressources imprécises*. Une *ressource imprécise* peut être :

1. **Un mot unique** (*e.g.* Painter), ce qui signifie que toutes les ressources dans la base interrogée qui sont liées à un littéral contenant ce mot doivent être retournées.
2. **Plusieurs mots entre parenthèses** (*e.g.* (birth Place)), toutes les ressources liées à un littéral possédant ces mots (ordre et casse insensibles) doivent être retournées.
3. **Un ou plusieurs mots entre double quotes** (*e.g.* "Germany"), toutes les ressources liées à cette expression exacte doivent être retournées<sup>7</sup>.

### 2.2 Différents cas de conversion en SPARQL

Dans notre approche, une requête SimplePARQL est réécrite en un ensemble de requêtes SPARQL offrant la possibilité de matcher la *ressource imprécise* avec des ressources RDF dans la base interrogée. En fonction de la position de la *ressource imprécise* dans le triplet, des

5. Utilisation du mot-clé PREFIX pour les IRI courts

6. a ⇔ rdf:type ⇔ <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#type>

7. Dans ce cas, si la *ressource imprécise* est en position d'objet, il est équivalent à un littéral en SPARQL.

x	birth	cityBirth	cityDeath
dbr:Johann_Christian_Eberlein	"177"	dbr:Göttingen	dbr:Göttingen
dbr:Hanns_Bolz	"1885-01-22"	dbr:Aachen	dbr:Munich
dbr:Ludwig_von_Löffltz	"1845-06-21"	dbr:Darmstadt	
dbr:Paul_Weber_(artist)	"1823"	dbr:Darmstadt	dbr:Munich
...			

FIGURE 1 – Extrait des résultats à la requête SPARQL "Requête 1" en interrogeant *DBpedia*.

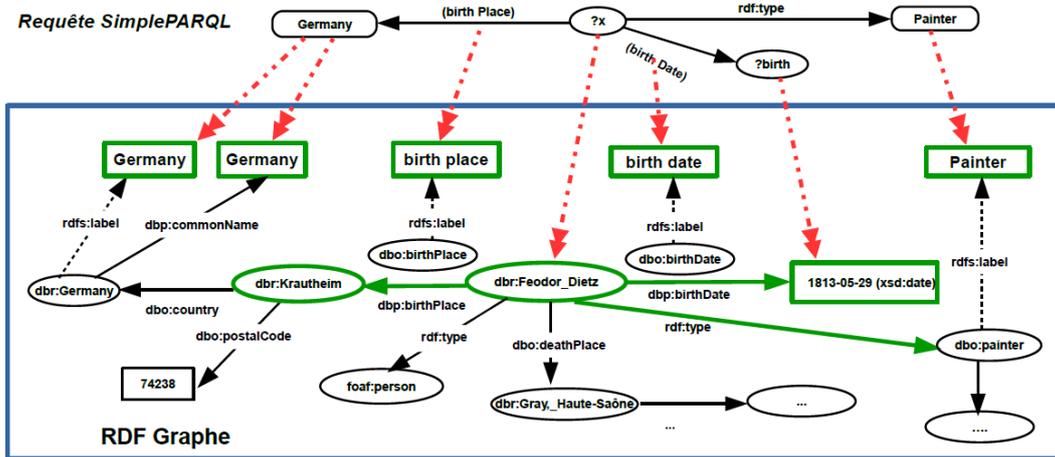


FIGURE 2 – Matching entre une requête SimplePARQL et la partie retournée dans la base RDF.

x	such as Painter is	such as (birth Date) is	birth	such as (birth Place) is	such as "Germany" is	such as (death Place) is	such as "Germany" is
http://dbpedia.org/resource/Hermann_Nestel	http://dbpedia.org/ontology/Painter because has label "painter"@en	http://dbpedia.org/property/birthDate because has label "birth date"@en	"1858-05-10"^^http://www.w3.org/2001/XMLSchema#date	http://dbpedia.org/property/birthPlace because has label "birth place"@en	"Stuttgart, Germany"@en		
http://dbpedia.org/resource/Otto_Ackermann_(painter)	http://dbpedia.org/ontology/Painter because has label "painter"@en-gb	http://dbpedia.org/property/birthDate because has label "birth date"@en	1872	http://dbpedia.org/property/birthPlace because has label "birth place"@en	"Berlin, Germany"@en	http://dbpedia.org/property/placeOfDeath because has label "PLACE OF DEATH"@en	"Düsseldorf, Germany"@en
http://dbpedia.org/resource/Wilhelm_Amberg	http://dbpedia.org/ontology/Painter because has label "painter"@en	http://dbpedia.org/property/birthDate because has label "birth date"@en	"1822-02-25"^^http://www.w3.org/2001/XMLSchema#date	http://dbpedia.org/property/birthPlace because has label "birth place"@en	"Berlin, Germany"@en		
...	...	...	...	...	...	...	...

FIGURE 3 – Extrait des résultats de la requête SimplePARQL "Requête 2" en interrogeant *DBpedia*.

requêtes SPARQL sont générées en se basant sur les règles de réécriture suivantes :

1. La *ressource imprécise* est en position du sujet ⇒ réécriture en trois requêtes SPARQL.

**Exemple** : 

```
SELECT ?objet ?relation
WHERE { (Feodor Dietz) ?relation ?objet. }
```

**Cas 1.1** : Chercher toutes les ressources liées par *rdfs:label* à un littéral contenant la *ressource imprécise*.

```
SELECT ?objet ?relation
WHERE {
  ?RessourceImp ?relation ?objet.
  ?RessourceImp rdfs:label ?label.
  FILTER (CONTAINS (UCASE (STR (?label)), UCASE ("Feodor")))
  && CONTAINS (UCASE (STR (?label)), UCASE ("Dietz")) }
```

**Cas 1.2** : Chercher les ressources liées par une propriété (pas uniquement *rdfs:label*) à un littéral contenant la *ressource imprécise*.

```
SELECT ?objet ?relation
WHERE {
  ?RessourceImp ?relation ?objet.
  ?RessourceImp ?tmp_var1 ?tmp_var2
  FILTER (CONTAINS (UCASE (STR (?tmp_var2)), UCASE ("Feodor")))
  && CONTAINS (UCASE (STR (?tmp_var2)), UCASE ("Dietz")) }
```

**Cas 1.3** : Chercher toutes les IRI contenant la *ressource imprécise* (à du sens avec *DBpedia*)

```
SELECT ?objet ?relation
WHERE {
  ?RessourceImp ?relation ?objet.
  FILTER (CONTAINS (UCASE (STR (?RessourceImp)), UCASE ("Feodor")))
  && CONTAINS (UCASE (STR (?RessourceImp)), UCASE ("Dietz")) }
```

2. La *ressource imprécise* est en position de prédicat  
 ⇒ réécriture en deux requêtes SPARQL.

**Exemple** : 

```
SELECT ?sujet ?objet
WHERE { (?sujet (birth Place) ?objet )
```

- Cas 2.1 : Chercher toutes les propriétés liées par `rdfs:label` à un littéral contenant la *ressource imprécise*.

```
SELECT ?sujet ?objet
WHERE {
?sujet ?RessourceImp ?objet.
?RessourceImp rdfs:label ?label.
FILTER (CONTAINS (UCASE (STR (?label)), UCASE ("birth"))
&& CONTAINS (UCASE (STR (?label)), UCASE ("Place"))) }
```

- Cas 2.2 : Chercher toutes les IRIs contenant la *ressource imprécise* (à du sens avec DBpedia)

```
SELECT ?sujet ?objet
WHERE {
?sujet ?RessourceImp ?objet.
FILTER (CONTAINS (UCASE (STR (?RessourceImp)), UCASE ("birth"))
&& CONTAINS (UCASE (STR (?RessourceImp)), UCASE ("Place"))) }
```

3. La *ressource imprécise* est en position d'objet ⇒  
 réécriture en trois requêtes SPARQL.

**Exemple** : 

```
SELECT ?sujet ?objet
WHERE { (?sujet ?relation "Germany" )
```

- Cas 3.1 : Chercher les littéraux (et les IRI pour *DBpedia*) contenant la *ressource imprécise*

```
SELECT ?sujet ?relation
WHERE {
?sujet ?relation ?RessourceImp.
FILTER (CONTAINS (STR (?RessourceImp), "Germany")) }
```

- Cas 3.2 : Chercher toutes les ressources liées par `rdfs:label` à un littéral contenant la *ressource imprécise*.

```
SELECT ?sujet ?relation
WHERE {
?sujet ?relation ?RessourceImp.
?RessourceImp rdfs:label ?label.
FILTER (CONTAINS (STR (?label), "Germany")) }
```

- Cas 3.3 : Chercher les ressources liées par une propriété (pas uniquement `rdfs:label`) à un littéral contenant la *ressource imprécise*.

```
SELECT ?sujet ?relation
WHERE {
?sujet ?relation ?RessourceImp.
?RessourceImp ?tmp_var1 ?tmp_var2.
FILTER (CONTAINS (STR (?tmp_var2), "Germany")) }
```

Si une requête SimplePARQL est composée de plusieurs *ressources imprécises* et/ou de plus d'un triplet, toutes les combinaisons possibles des cas de réécriture sont effectuées. Exemple, si un triplet est composé de deux *ressources imprécises*, le premier en position de sujet et le second en position de prédicat, alors le nombre de réécritures est de six : trois requêtes pour la réécriture du sujet, deux requêtes pour la réécriture du prédicat.

### 3 Conclusion et travaux futurs

Face à la difficulté d'interroger les bases RDF du Web des Données par des requêtes SPARQL non triviales à écrire,

du fait d'une organisation complexe entre les ressources et de leurs manipulations via des IRI, nous proposons la plateforme `universal-endpoint.com`. Avec cette plateforme, l'utilisateur a la possibilité d'interroger de manière intuitive des bases du Linked Open Data – sans nécessiter d'en être un expert – en rédigeant des requêtes SimplePARQL pouvant contenir des *ressources imprécises* en plus des éléments du langage SPARQL.

Concrètement, l'interrogation d'une requête SimplePARQL se fait via une réécriture transparente en plusieurs requêtes SPARQL à travers les endpoints des bases du Linked Data. Ces multiples interrogations SPARQL, nécessaires pour déterminer les éléments imprécis de la requête SimplePARQL formulée par l'utilisateur, ont un impact direct sur le temps d'exécution. Cependant aujourd'hui, des travaux récents comme le framework [8] permettent de réduire fortement les temps d'attente face à de multiples requêtes sur les serveurs SPARQL des bases du Linked Data.

Le endpoint SimplePARQL disponible sur notre plateforme n'offre pas aujourd'hui toute l'expressivité de SPARQL. Si cela était un choix délibéré au départ en terme de simplification d'écriture de requêtes, il s'avère à l'usage que c'est une limitation qu'il faut lever pour l'utilisateur expert du Web des Données.

### Références

- [1] Hannah Bast, Florian Baurle, Björn Buchhold, and Elmar Haußmann. Easy access to the freebase dataset. In *Proc. of WWW'14 Companion*, pages 95–98, 2014.
- [2] T. Berners-Lee, J. Hendler, and O. Lassila. The Semantic Web. *Scientific American*, 279(5) :34–43, 2001.
- [3] Sonia Djebali and Thomas Raimbault. Simpleparql : A new approach using keywords over sparql to query the web of data. In *Proc. of SEMANTICS'15*, pages 188–191. ACM, 2015.
- [4] Sébastien Ferré. Sparklis : a SPARQL Endpoint Explorer for Expressive Question Answering. In *Proc. of ISWC Posters & Demonstrations Track*, 2014.
- [5] G. Klyne, J. J. Carroll, and B. McBride. RDF 1.1 Concepts and Abstract Syntax, 2014. <http://www.w3.org/TR/rdf-concepts/>.
- [6] Steffen Lohmann, Philipp Heim, Timo Stegemann, and Jürgen Ziegler. The relfinder user interface : Interactive exploration of relationships between objects of interest. In *Proc. of Intelligent User Interfaces (IUI'10)*, pages 421–422. ACM, 2010.
- [7] E. Prudhommeaux and A. Seaborne. SPARQL Query Language for RDF, 2008. [www.w3.org/TR/rdf-sparql-query/](http://www.w3.org/TR/rdf-sparql-query/).
- [8] R. Verborgh, M. Vander Sande, O Hartig, J Van Herwegen, L De Vocht, B De Meester, G Haesendonck, and P Colpaert. Triple Pattern Fragments : a low-cost knowledge graph interface for the Web. *Journal of Web Semantics*, 37–38 :184–206, March 2016.

# Periodic split method: learning more readable decision trees for human activities

Matthieu Boussard<sup>1</sup>

Clodéric Mars<sup>1</sup>

Rémi Dèss<sup>1</sup>

Caroline Chopinaud<sup>1</sup>

<sup>1</sup> craft ai

matthieu@craft.ai cloderic@craft.ai remi@craft.ai caroline@craft.ai

## Abstract

*Placing your trust in algorithms is a major issue in society today. This article introduces a novel split method for decision tree generation algorithms aimed at improving the quality/readability ratio of generated decision trees. We focus on human activities learning that allow the definition of new temporal features. By virtue of these features, we present here the periodic split method, which produces similar or superior quality trees with reduced tree depth.*

## Keywords

Machine Learning, Decision trees, Split, Temporal data, C4.5

## Résumé

*La confiance dans les algorithmes est un problème de société majeur. Cet article introduit une nouvelle méthode de calcul de split pour la génération d'arbres de décisions permettant l'amélioration du rapport qualité/lisibilité des arbres générés. En nous focalisant sur l'apprentissage d'activité humaines, nous définissons des nouveaux attributs temporels. Grâce à ces nouveaux attributs, nous introduisons la méthode de split périodique qui permet de réduire la profondeur des arbres pour des performances similaires.*

## Mots Clef

Apprentissage automatique, Arbres de décisions, Split, Données temporelles, C4.5

## 1 Introduction

Trust in algorithms is a major question for societies today. Crucially, the justification of the decision made by an AI-based system regarding humans will become an essential requirement. When a system interacts with humans, it should be transparent enough to check decision results and detect illicit discrimination [3]. This topic has taken on such importance, that a law<sup>1</sup> was passed on March 14th in France; it states that “*rules making decision concerning individuals based on algorithms can be subject to explanation on user request*”

User-centric applications such as home automation, coaching or personal assistant services can take advantage of user data to provide personalized and adaptive interactions. To this end, applications must be able to continuously learn from a user's habits and preferences in order to predict their needs, in particular when bearing in mind the time factor.

Machine learning algorithms are powerful tools that autonomously find hidden rules or relations in data, and can be used to classify, predict or decide based on what they have learned. In this context, one of the difficulties is to balance predicting power and explainability. For instance, with sufficient data, deep-neural networks (DNNs) now have a impressive power to predict. However, the neural network on which decisions are being made can be considered as a “*black box*” where, even though it is possible to read every weight of the DNN, it is almost impossible to explain specific decisions.

Decision trees are a way to describe predictive models, and up to a certain size they can be understood and explained, and even considered “*white boxes*”. Algorithms like CART [1] or C4.5 [8] generate predictive decision trees from training data. Compared to “*black box*” learning algorithms, such as neural networks, they can learn quickly and perform well even when provided with a very limited amount of data. However, decision trees tend to be less accurate than the aforementioned

Decision tree learning algorithms are therefore very interesting in the context of learning from human behavior to enable automation, in the main because of their explainability. Furthermore, one area of particular importance lies in the repetitions and seasonality in the data. For instance, if we want to learn the sleeping habits of a person, we may want to learn when he/she falls asleep, when he/she wakes up in the morning, and whether he/she changes his/her sleeping habits during the weekend, etc. It is already possible to model time data such as the day of the week or the time of day as continuous values to generate decision trees with standard methods, though this can lead to decision trees that are unnecessarily complex and difficult to read, and does not accurately represent the periodic nature of repetitive time data.

In this paper we introduce a new representation and associated decision tree splitting method for periodic time properties such as the time of day or day of the week. This new

<sup>1</sup>LOI n° 2016-1321 du 7 octobre 2016 pour une République numérique

method aims to improve the quality of predictive decision trees in terms of explainability and simplicity, especially when applied to data describing human activity. The paper is organized as follows : section 2 presents the related works, section 3 the formal definition of a split, and finally we present the main contribution of the paper, the periodic split, in section 4, experiments are shown in section 5.

## 2 Related works

Much research has been carried out in the field of decision trees, in an effort to improve their quality/readability. We would like to present here related works, but also to distinguish this work from previous approaches using similar topics.

### 2.1 Spatial decision trees

In the initial C4.5 decision tree algorithms three types of data are taken into account : continuous, discrete and categorical. Each type leads to a different split method. To improve the quality of the split, it is possible to add new types. For instance, many researchers have worked on learning based on spatial data. In these cases, the classical splits perform poorly, and the typing of certain features as "*spatial types*" can improve results. For instance, in [5], the authors use oblique splits for spatial data because they are better suited to this type of data. In [7] the authors generate predicate functions to create new features and then learn the tree using both spatial and non spatial features.

### 2.2 Handling time in decision trees

This paper presents a new way of handling time in decision trees and differs from previous work by not applying first a transformation on the temporal information and then applying a classical decision tree algorithm, but instead, by modifying the way the splits are computed on a temporal feature

There are also various ways of representing temporal information. For instance, decision tree algorithms have been adapted to split on time series by introducing a similarity measure between time series [10]. However this work, as well as others interested in time series, does not focus on human activities, which is where our prime interest lies.

## 3 Splits and multisplits algorithms

Split algorithms are a crucial part of decision tree generation. Multisplit is an extension of the classical split aimed at improving the quality and readability of the resulting decision tree. In this section we formally define both.

Let  $S$  be a training set. A sample  $s \in S$  is a vector  $\vec{s} = \langle s_0, \dots, s_n, c \rangle$ , composed of  $i$  features and a class  $c$ . The value of the feature  $i$  for sample  $s$  is noted as  $val_i(s)$ . Classical kinds of feature value types are numerical (discrete or continuous) and categorical.

A split function over  $S$  takes an feature  $i$  and splits it into  $k$  subsets  $S = \bigcup_{j=0}^k S_j$  according to the values of  $val_i(s)$ .

For instance, equation 1 represents a split on a continuous feature according to a threshold value  $T$ .

$$\begin{cases} S_{inf} \{s \in S | val_i(s) \leq T\} \\ S_{sup} \{s \in S | val_i(s) > T\} \end{cases} \quad (1)$$

To build decision trees, classical algorithms, like C4.5, compute for every feature the maximum (possible) gain if  $S$  is split into subsets according to every possible split value. This gain is based on various measures, depending on the algorithm : for instance C4.5 uses information gain measures. Once every maximum gain has been computed, the split feature  $i$  is selected with its best split value  $T$  by selecting the couple with the best gain. Following this, two subsets are computed using Eq.1 and the algorithm proceeds recursively on the two created subsets.

However, as stated in [2], non-binary splits [4] on continuous features make the trees easier to understand and also seem to lead to more accurate trees in some domains. A  $n$ -split on a continuous value is described by Eq.2.

$$\begin{cases} S_0 \{s \in S | val_i(s) \leq T_0\} \\ S_1 \{s \in S | val_i(s) \in ]T_0, T_1]\} \\ \vdots \\ S_{n-1} \{s \in S | val_i(s) > T_{n-1}\} \end{cases} \quad (2)$$

Multisplit algorithms belong to two families depending on how their arity is defined. The number of splits, or cut points, can either be fixed in advance [4], or discovered automatically during the process [9]. We introduce a method that belongs to the former to create a ternary split on periodic data.

## 4 Split on periodic data

In this paper, we introduce a new split mechanism, namely the *periodic split operator*. This operator, given two bounds, will split data into two complementary subsets. The decision tree algorithm remains unchanged, but the possible splits are computed using Eq.3. The motivation behind introducing this new operator is that many common data types do not fit into classical, or even non-binary, splits. We will further discuss these types in section 4.1.

$$\begin{cases} S_{in} \{s \in S | val_i(s) \in [T_{min}, T_{max}]\} \\ S_{out} \{s \in S | val_i(s) \notin [T_{min}, T_{max}]\} \end{cases} \quad (3)$$

### 4.1 Relevant human periodic time types

The motivation behind introducing the periodic split is the need for a proper way of handling temporal data that occurs during day-to-day human activities. For instance, if we need to learn the sleeping habits of a person, as shown in Fig.2, he/she may fall asleep at 10pm, and wake up at 6am. In this use case the usual  $<$  and  $\geq$  operators don't make sense in terms of readability : 1am is after 10pm but 1 is not more than 22. The mathematical operators we use on

continuous values do not match how humans think about time.

We propose 4 temporal types, namely "*Time of day*", "*Day of week*", "*Day of month*" and "*Month of year*" for use in the model definition. These types define a period after which the feature value returns to its initial value. Periods for each type are represented in Fig.1.

In order to clarify and unify operators in the tree we propose the following notation for periodic intervals, with  $a$  and  $b$  between 0 and a period  $P$ ,  $[a, b[=$

$$\begin{cases} \{nP + r : n \in \mathbb{Z}, r \in \mathbb{R} | r \geq a \wedge r < b\} & \text{if } a < b \\ \emptyset & \text{if } a = b \\ (\{nP + r : n \in \mathbb{Z}, r \in \mathbb{R} | r \geq a \wedge r < P\} \cup \{nP + r : n \in \mathbb{Z}, r \in \mathbb{R} | r < b \wedge r \geq 0\}) & \text{if } a > b \end{cases} \quad (4)$$

A feature of type "*Time of day*" can be used to focus on activities occurring on a daily basis, permitting the detection of any partitioning  $S_{in}, S_{out}$  of the period  $]0, 24]$ , as follows :

$$\begin{cases} S_{in} = ]10pm, 6am] \\ S_{out} = ]6am, 10pm] \end{cases} \quad (5)$$

This notation is a short for :

$$\begin{cases} S_{in} = ]10pm, 12am] \cup ]12am, 6am] \\ S_{out} = ]6am, 10pm] \end{cases} \quad (6)$$

The other types are handled in the same way. Additionally, we always consider that a "*Day of month*" is in  $[1; 31]$  even if some months are shorter. This assumption has no impact on the split quality.

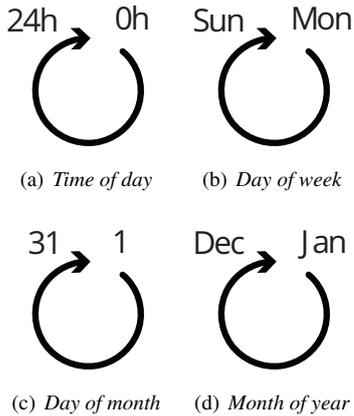


Figure 1: Usual time periods

Once a decision tree has been learned, we simply use the  $in$  operator to make a decision,

## 4.2 Algorithm

We provide a naive algorithm to compute splits on periodic types. While it is straightforward to use non-binary split

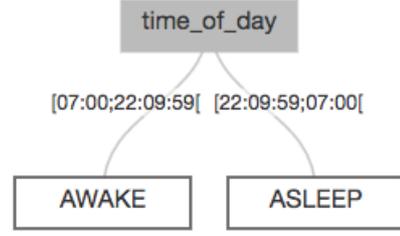


Figure 2: Example of periodic split

methods, for the sake of clarity, we stay focused on a simpler binary split algorithm. The interested reader can refer to [9] for further details on non-binary splits.

Since splits are a partition of the input dataset, one and only one partition will contain the start/end point of the period (an interval  $]a, b]$  with  $a > b$ ). We are only considering binary splits, hence we first find the non-looping split, while the other is the complement of this interval over the period. The algorithm to find the best gain for a periodic feature  $i$  is :

1. Sort  $S$  in ascending order according to  $val_i(s)$
2. For each  $a \in S'$ 
  - (a) For each  $b \in S' > a$
  - (b) Compute the information gain when splitting in  $]a, b]$  and  $]b, a]$
  - (c) Save the gain and the splits if better than current maximum
3. return best gain and intervals

## 5 Results

We use data from a connected watch (a Withings Activity) to predict whether a person is sleeping or not at a given moment in time. For clarity, we built a very simple model where each observation is defined by  $s = \langle time\_of\_day, day\_of\_week, state? \rangle$ , where state is either 'AWAKE' or 'ASLEEP' depending on the sleeping status of the person. The structure of the dataset is presented Table.1 : it is made of the status of a person, measured every 10 minutes. The overall activity for our two users is presented 4. We then compare the results obtained using classical splits against the periodic splits introduced in this paper. Data for two different and independent persons,  $c$  and  $s$ , are collected over a three month period and used for classification, while a fourth month is used for validation. We use the  $F1$  score (computed by  $2 * \frac{precision * recall}{precision + recall}$ ) and show how it evolves with the maximum depth of the tree. The results are presented in Fig.5. For a depth of 2, the two models using periodic intervals perform far better than those using classical continuous splits. This is because our method performs 2 successive binary splits in one single step. We have to increase the

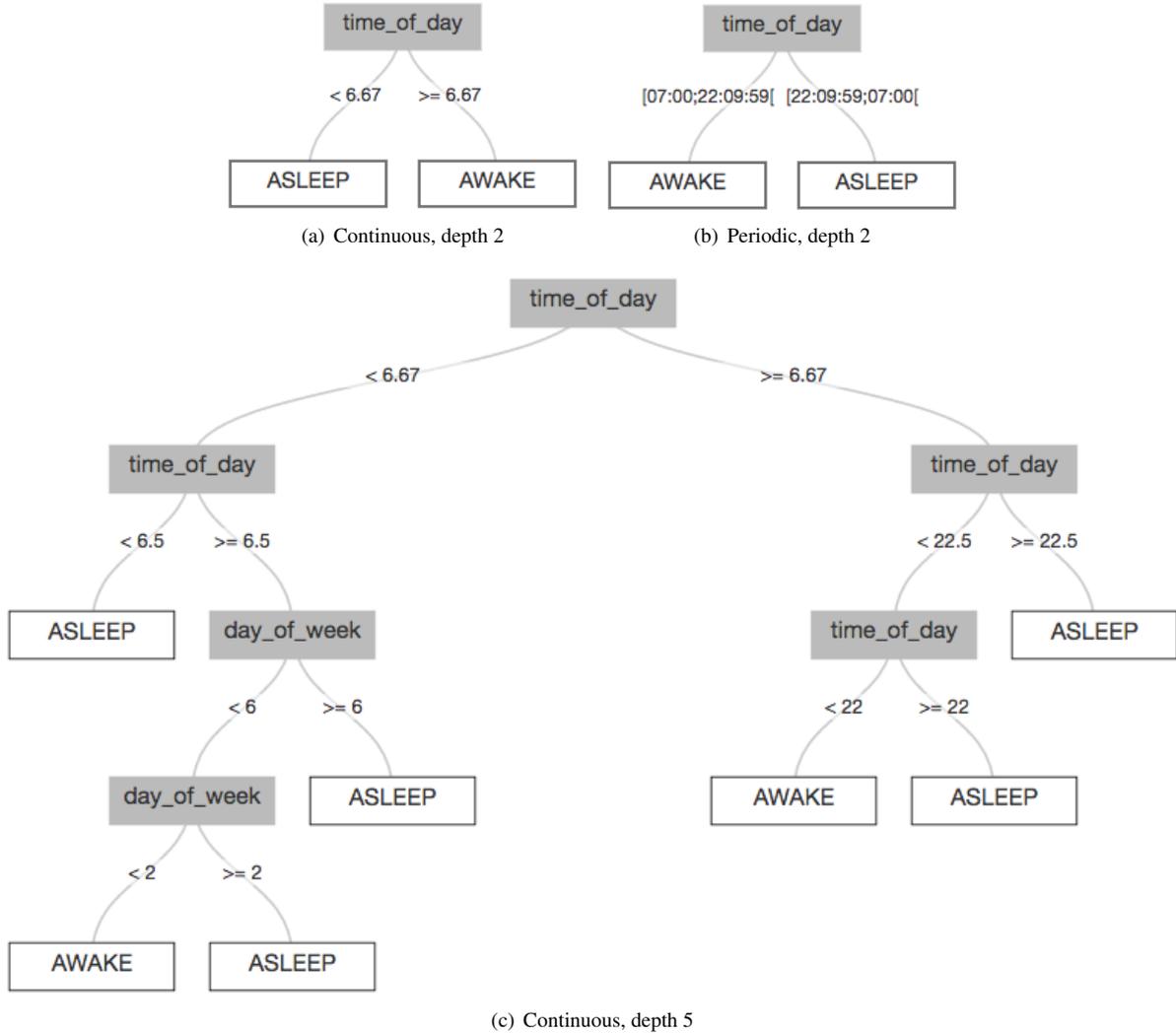


Figure 3: Impact of periodic types in generated decision trees, dataset *c*

depth to 5 before the continuous splits attain the same quality as the periodic methods. Further increasing the depth does not impact performance, both algorithms achieving the same quality.

## 6 Conclusions

In this article, we present a new split method for decision tree generation algorithms. We demonstrated it could be applied to C4.5 to achieve a better performance/depth ratio compared to the traditional continuous split method in a classification use case. The same periodic split method can be used in other decision tree generation algorithms both for classifications, using other scoring method such as the gini coefficient, or for regressions with the same advantages.

The naive implementation we describe in section 4.2 has a complexity of  $\mathcal{O}(n^2)$  which is fine for simple use cases but leads to bad performances on large data sets. Now that we have validated the gain of our approach, we are inves-

tigating different strategies to achieve a linear complexity by reducing the search space of the two split points thanks to simple precalculations.

We focused on the application of the periodic split method on time, using basic time units as periods : the day, the week, and the month. These periods have a high relevance when it comes to modeling human activities. However, further to this, other time periods can be significant, such as fortnights, lunar cycles, quarters. Beyond human activities other phenomena follow different time periods. We are investigating the usage of feature engineering techniques detecting periods in data sets such as autocorrelation [6] in conjunction with our algorithm. Other kinds of features could also benefit from the same split method; for instance, geodetic coordinates periodic splits could lead to a better understanding of geographic features.

Decision trees have a very interesting property when it comes to creating models that will interact with humans : when kept under a certain size, they are explainable, re-

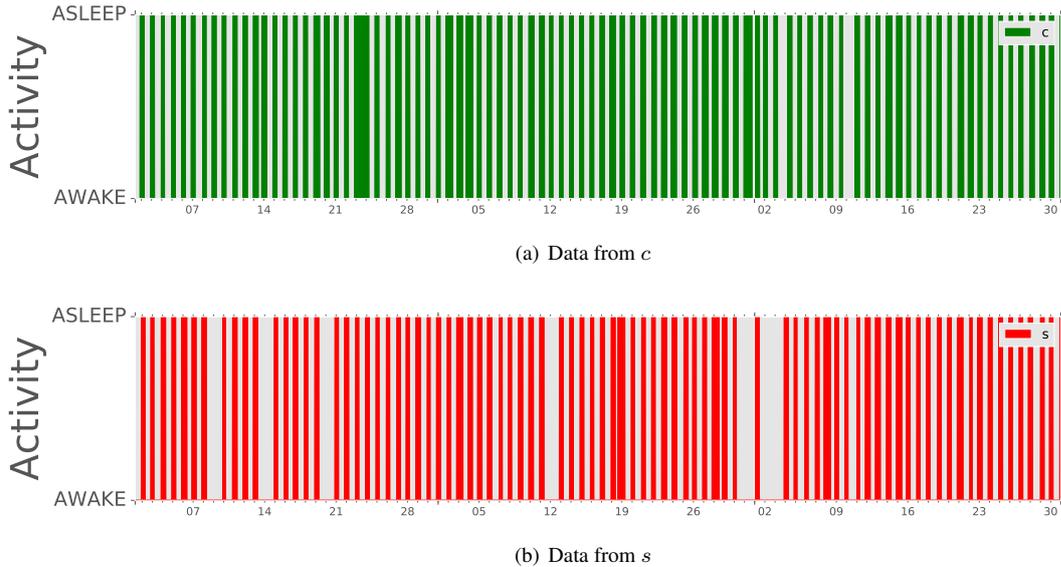


Figure 4: 3 month of sleep data for users  $c$  and  $s$

Datetime	State	Day of week	Time of day
2017-02-01 00:00:00	ASLEEP	2.0	0.000000
2017-02-01 00:10:00	ASLEEP	2.0	0.166667
2017-02-01 00:20:00	ASLEEP	2.0	0.333333
⋮			
2017-03-01 22:10:00	AWAKE	2.0	22.166667

Table 1: Sample of the sleep dataset

maining "white boxes". We have proven that the periodic split method we presented exhibits better results than the traditional methods for a constrained tree size, hence a net gain in explain ability. Furthermore, this new algorithm results in decision tree reasoning on time which is different from time boundaries and ranges. This representation is not only more compact but also more natural for humans to read, thus fostering the collaboration between humans and AI.

## References

- [1] L. Breiman, J. H. Friedman, R. A. Olshen, and C. J. Stone. *Classification and Regression Trees*. Wadsworth and Brooks, Monterey, CA, 1984.
- [2] Quinlan Quinlan Cs and J. R. Quinlan. Improved use of continuous attributes in c4.5. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 4:77–90, 1996.
- [3] FRANCE. Conseil d’Etat. *Le numérique et les droits fondamentaux*. Etudes et documents, Conseil d’Etat. La Documentation française, 2014.
- [4] Usama M. Fayyad and Keki B. Irani. On the handling of continuous-valued attributes in decision tree generation. *Machine Learning*, 8(1):87–102, 1992.
- [5] Jean Gaudart, Nathalie Graffeo, Guillaume Barbet, Stanilas Rebaudet, Nadine Dessay, Ogobara K Doumbo, and Roch Giorgi. SPODT: An R Package to Perform Spatial Partitioning. *Journal of Statistical Software*, 63(16), January 2015.
- [6] J. Kmenta. *Elements of Econometrics*, pages 298–334. Maxwell Macmillan international editions. Macmillan Publ, 1986.
- [7] Krzysztof Koperski, Jiawei Hah, and Nebojsa Stefanovic. An efficient two-step method for classification of spatial data. In *Symposium on Spatial Data Handling (SDH '98)*, pages 45–54, Vancouver, Canada, 1998.
- [8] J. Ross Quinlan. *C4.5: Programs for Machine Learning*. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA, 1993.
- [9] Juho Rousu and Tapio Elomaa. Efficient multisplitting revisited: Optima-preserving elimination of partition candidates. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 8(2):97–126, 2004.
- [10] Suzuki Einoshin Yokoi Hideto Takabayashi Katsuhiko Yamada, Yuu. Decision-tree induction from

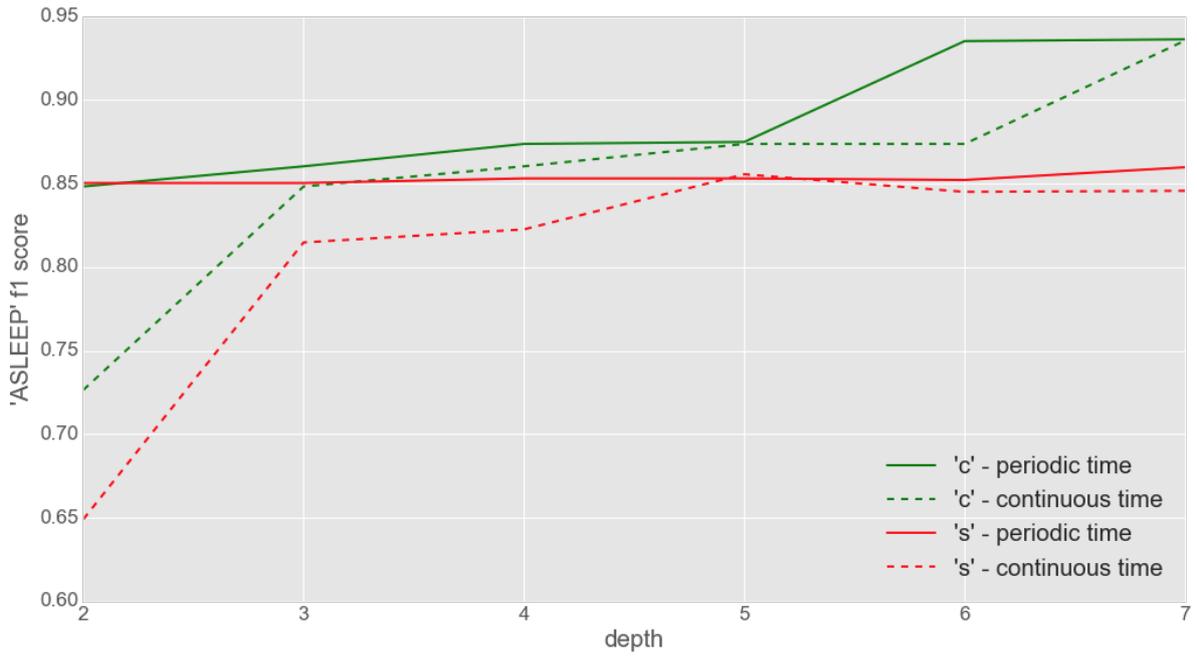


Figure 5: Comparison between periodic and classical splits

time-series data based on a standard-example split test. In *Twentieth International Conference on Machine Learning (ICML)*, page 840–847, 2003.

# **Démonstrations et Posters**



# Clay VR

Laurent Gaidon Jean-Baptiste Guignard Ophir Paz Kim Savaroché

HINS  
ophir.paz@hins.fr

## Résumé

Clay VR est un SDK pour la reconnaissance de gestes sur smartphone depuis n'importe quelle caméra intégrée. Il est conçu pour être utilisé en VR et en commande distale pour enrichir drastiquement les possibilités d'interactions de l'utilisateur — en affichant sa main détournée dans l'environnement virtuel. Cette expérience *touchless* permet de s'affranchir des problématiques liées aux périphériques d'entrées matériels, mais implique de nouveaux enjeux techniques. Ainsi, la solution proposée est basée sur un réseau de neurones récurrent contrôlé heuristiquement par un système expert.

## Mots clef

Reconnaissance gestuelle, VR, Computer vision, RNN, Système expert.

## Abstract

Clay VR is a SDK for gesture recognition on smartphones from any embedded lens (no need for additional hardware). It is designed for uses in VR and distal control to drastically enrich the user's interaction possibilities – it displays one's own hands contoured in a virtual environment. Such a touchless experience is control without the hardware, touch, pinpoint or remote-control pains, ensures immersion by preserving self-perception, but implies massive technical difficulties. Thus the presented solution is RNN-based, and heuristically jugulated by an expert system.

## Keywords

Gesture recognition, VR, Computer vision, RNN, Expert system.

## 1 Contexte

La reconnaissance des mains et, conséquemment, celle des gestes effectués par celles-ci sont des biométries essentielles à l'identification de l'utilisateur dans un environnement virtuel. Avec

l'essor de technologies disruptives comme la VR et l'AR, les organismes privés et publics affairés dans la quête immersive cherchent à offrir une expérience utilisateur toujours plus intuitive et naturelle, tant du côté de l'UX que de celui des contenus et de leur réalisme. Or, les réponses à cet effort d'intuitivité sont et restent matérielles. Elles consistent en l'ajout d'un *device* – manette, joystick, exosquelette, etc. – qui rappelle continuellement la rupture entre monde réel et monde virtuel. Une visualisation des mains en temps réel, sans recours à quelque *hardware* que ce soit, dans un environnement projeté ou mixte amenuiserait pourtant le sentiment de dissociation.

Pour une reconnaissance gestuelle (GR) ouverte au grand public, il est nécessaire d'analyser des images 2D capturées dans des environnements (notamment spatiaux et lumineux) changeants à l'extrême. La main des utilisateurs, dont les morphologies sont hétérogènes (1), varie continuellement dans l'espace (X, Y, Z).

## 2 Solution

Clay est une solution software de reconnaissance gestuelle sur smartphone. Elle permet, à partir d'une caméra 2D, de repérer et suivre les mains d'un utilisateur en temps réel, y compris en profondeur (Z), dans une zone de captation vidéo en vue d'interpréter ses gestes. Une fois le mouvement (pré-encodé ou appris) identifié, il est possible de le coupler à une action/instruction : augmenter ou baisser le son d'un fichier sonore, saisir un objet en 3D, activer des commandes embarquées dans un habitacle, etc.

La présente solution se concentre sur le procédé même de captation des mains. Elle se propose en particulier d'agir en amont des filtres d'interprétation. Sa finalité est, en effet, de permettre à cette solution logicielle – sans ajout de matériel de type PYR, de sonde, ou de caméra à profondeur de champ – de s'adapter aux variations, souvent radicales, de l'environnement (lumière, mouvement, arrière-plan, etc.) afin de fournir une représentation

stable et des mains sur un fond noir. Lesdites mains doivent être détournées, affichées en premier plan, et soustraites d'un fond remplaçable en fonction des contextes (notamment VR), ce qui place ce travail sous l'égide thématique de la computer vision, des NN ou RNN, des systèmes experts et de la logique floue.

Clay doit être multiplateforme, *i.e.* exploitable par n'importe quel appareil muni d'une caméra (y compris 2D frontale). La nature du langage de programmation utilisé étant directement corrélatif du résultat obtenu – en cela, il lui est constitutif, fidèlement à la conception « prothétique » de l'outil comme anthropologiquement constitutif (2) – l'anticipation de la portabilité (ou de la compatibilité d'emblée) du code au travers des systèmes d'exploitation est primordiale. Pour une programmation orientée « objet » et pour la création d'une architecture générique adaptable à tous les hardwares, C++ s'impose. Corrélativement, la mémoire vive strictement nécessaire au bon fonctionnement du programme est réservée et ne peut pas être empruntée par un autre processus lancé sur un smartphone. Cette allocation statique améliore le niveau de performances du système et, par conséquent, les filtres de traitement sont plus puissants pour un résultat plus pertinent. Une économie des ressources internes du *device* permet un traitement d'image à 60 FPS pour un rendu en temps réel.

Le système doit être capable de suivre les formes et de les identifier entre les *frames* successives. Le défi technique est de créer un système assez intelligent pour extraire des propriétés suffisantes permettant de différencier et identifier une main au milieu d'autres formes parasites. Ainsi si une forme a été repérée comme une main ouverte et que l'utilisateur la ferme pour montrer son poing alors un *matching* de formes permettra de savoir que malgré une différence notable, l'élément est le même.

Il ne faut pas simplement reconnaître des gestes mais être également capable de détecter l'intention de l'utilisateur sous-entendue par ce geste. Un déplacement de la main peut avoir une intention neutre dans le cas où l'utilisateur se détend les muscles. A contrario, il peut avoir un sens quand il souhaite effectuer un balayage vers la droite ou la gauche. En VR, les mouvements de la tête accentuent cette incertitude : la main ne change pas de position, mais bouge par rapport à la caméra.

Pour réussir ceci, le système peut être présenté sous trois étapes : la reconnaissance du geste, sa contextualisation et sa validation.



Figure 1 Les différentes phases de la solution ClayVR

## 2.1 Reconnaissance du geste

La première partie consiste à extraire les caractéristiques de l'image pour alimenter un réseau de neurones afin d'identifier le geste effectué. Dans un premier temps, l'extraction de ces *features* est réalisée en deux phases : isoler la forme de la main, puis analyser cette forme. Isoler le contour de la main sous-entend isoler les éléments au premier plan puis détourner la main. Cette dernière effectuée une succession d'analyses permettant de calculer des données comme sa position en X, en Y, en Z ou encore les coordonnées de ses doigts.

Les données étant extraites, elles alimentent un réseau de neurones récurrents pour être catégorisées par geste. Un outil probabiliste à apprentissage supervisé s'est en effet imposé pour déceler les patterns dont nous avons l'intuition (3), de part la quantité et la complexité des informations déduites de l'image. De plus, un geste s'étale par définition sur plusieurs frames et son identification nécessite de prendre en compte les variations des données dans le temps. Le RNN est donc apparu comme le plus approprié puisqu'il permet la classification de séquences de données.

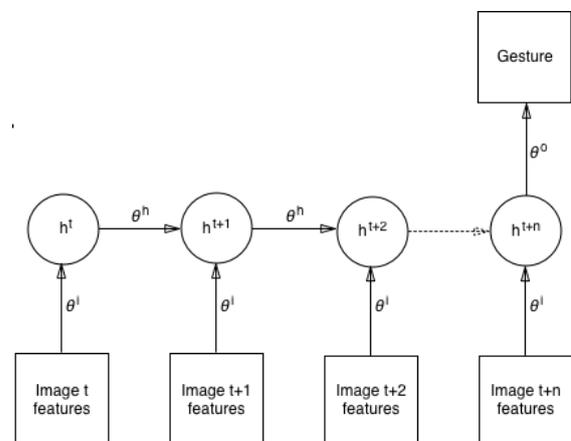


Figure 2 RNN utilisé en « many to one » dans Clay VR

Néanmoins l'apprentissage supervisé nécessite une phase d'apprentissage qui demande un jeu de données significatif et qualitatif. Contrairement à la reconnaissance d'un objet dans une image qui peut exploiter une base de données de photographies facilement accessibles, notre jeu d'entraînement est très spécifique. En effet, l'angle de la caméra est déterminant, les gestes n'ont pas le même aspect selon si le point de vue est devant ou au-dessus de l'appareil. Ajoutons à cela que la manière de faire des gestes est propre à chaque individu et au contexte dans lequel ils sont exécutés. Ceci nous a amené à créer une application spécifique qui permet de reproduire les conditions équivalentes à l'environnement de production afin d'obtenir des données pertinentes pour entraîner le système.

## 2.2 Contextualisation

Cependant la reconnaissance simple des gestes ne suffit pas. Un geste n'est pas systématiquement déclencheur d'une action précise. Par exemple, la forme d'une main en ombre chinoise, ne permet pas de faire la différence entre la droite côté paume et la gauche sur le dos. Pourtant pour reconnaître le *flip* de la main gauche, nous avons besoin de savoir que celle-ci est présente et qu'elle a été retournée. Cette contextualisation du geste est donc cruciale et peut être modélisée sous forme de prédicats logiques. L'utilisation d'un système expert, appliquant ces règles grâce à un chaînage avant, transforme un geste en signe contextualisé, porteur d'une intention.

## 2.3 Validation

Enfin, une fois le geste reconnu et remis dans son contexte, il nous reste à vérifier la cohérence globale de l'action demandée. Si le geste est synonyme de baisser le son mais qu'aucune musique n'est lancée alors il ne semble pas cohérent de d'influencer le volume sonore. Cette phase de validation permet d'assurer la liaison entre les gestes et l'état de l'application.

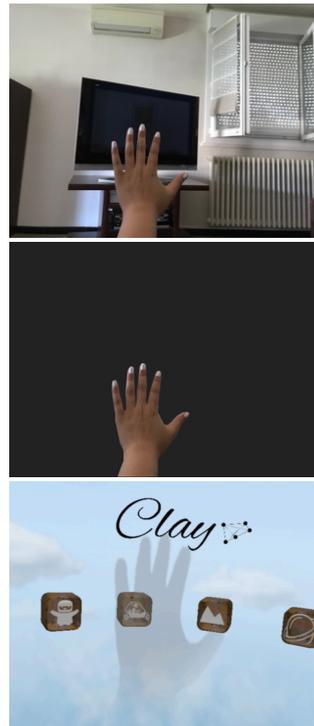


Figure 3 Hand Processing

## 3 Conclusion

La particularité et la difficulté de notre projet réside ainsi dans la liberté de mouvements de l'utilisateur. Contrairement à une manette dont les actions sont sans ambiguïté (2) grâce à des *inputs* prédéfinis, ClayVR a pour ambition d'être un outil prothétique. L'utilisateur doit oublier sa présence afin de profiter pleinement de l'expérience proposée. Si le système est perfectible alors l'utilisateur se distanciera de la solution software. Cette succession d'outils contrôle les résultats dans la seule intention d'interpréter correctement les gestes et déclencher l'action souhaitée.

## Bibliographie

1. **Elgammal, Ahmed, Muang, Crystal et Hu, Dunxu.** *Skin Detection - a Short Tutorial*. Piscataway, : s.n., 2009.
2. **Samuel, A. L.** *Some Studies in Machine Learning Using the Game of Checkers. II-Recent Progress A. s.l. : IBM Journal of Research and Development (Volume:44, Issue:1.2), 1959.*
3. **Simondon, Gilbert.** *L'individuation psychique et collective*. Paris : Aubier, 1989.
4. **Simondon, Gilbert .** *Du mode d'existence des objets techniques*. Paris : Aubier, 1958.
5. **Clark, Andy.** *Natural-Born Cyborgs. Minds, Technologies and the Future of Human*. Oxford/New York : Oxford UP, 2003.



# NELIDA : assistant opérationnel générique apprenant incrémentalement par l'interaction

Vincent Letard<sup>1,3</sup> Gabriel Illouz<sup>1,2,3</sup> Sophie Rosset<sup>1,3</sup>  
vincent.letard@limsi.fr, gabriel.illouz@u-psud.fr, sophie.rosset@limsi.fr

(1) LIMSI CNRS, F-91405 Orsay

(2) Université Paris-Sud, F-91405 Orsay

(3) Université Paris-Saclay

**Résumé :** Le système NELIDA<sup>a</sup> est un assistant opérationnel incrémental issu des travaux développés dans [Letard, 2017]. Son objectif est d'interpréter correctement les requêtes formulées en langue naturelle par ses utilisateurs, et de produire les actions attendues. Le système est également capable d'apprendre de nouveaux exemples grâce à l'enseignement de son utilisateur lorsque la réponse fournie est incorrecte, ou bien qu'aucune réponse n'a pu être produite. Ces nouveaux cas enrichissent la base d'exemples du système et la rendent progressivement plus adapté à son ou ses utilisateurs.

Le système présenté ici s'appuie sur le raisonnement par analogie formelle pour produire une réponse à partir d'une requête de l'utilisateur. L'approche est focalisée autour de la tâche de production d'une réponse pertinente, qui est modélisée comme une opération de transfert (traduction) depuis la requête en langue naturelle vers une commande dans un langage de programmation donné. Les langages utilisés sont le français et le langage `bash`, mais l'approche en est indépendante.

**Mots-clés :** Système de dialogue, Apprentissage incrémental, Raisonnement par analogie formelle, Système assistant

---

*a.* Never Ending Learning Incremental Dialogic Assistant

## Transfert de langages par analogie formelle

Le raisonnement par analogie formelle est une forme de raisonnement à partir de cas. En tant que tel, il permet de produire des résultats pertinents à partir d'ensembles d'exemples peu fournis et reste sensible

```
utilisateur : Imprime les pages 7 à 11 de mon_document.pdf
système    : printf "mon_document.pdf"
              Est-ce correct ?
utilisateur : Non
système    : Quelle est la commande correcte ?
utilisateur : lp -P 7,11 mon_document.pdf
système    : Ok, j'ai mémorisé.
utilisateur : Imprime les pages 1 à 10 de formulaire.pdf
système    : lp -P 1,10 formulaire.pdf
utilisateur : Supprime toutes les lignes vides de dev_temp/f.csv
système    : Je ne sais pas faire ça, pouvez-vous me montrer ?
```

EXEMPLE 1 – Interaction dialogique entre un utilisateur et le système NELIDA

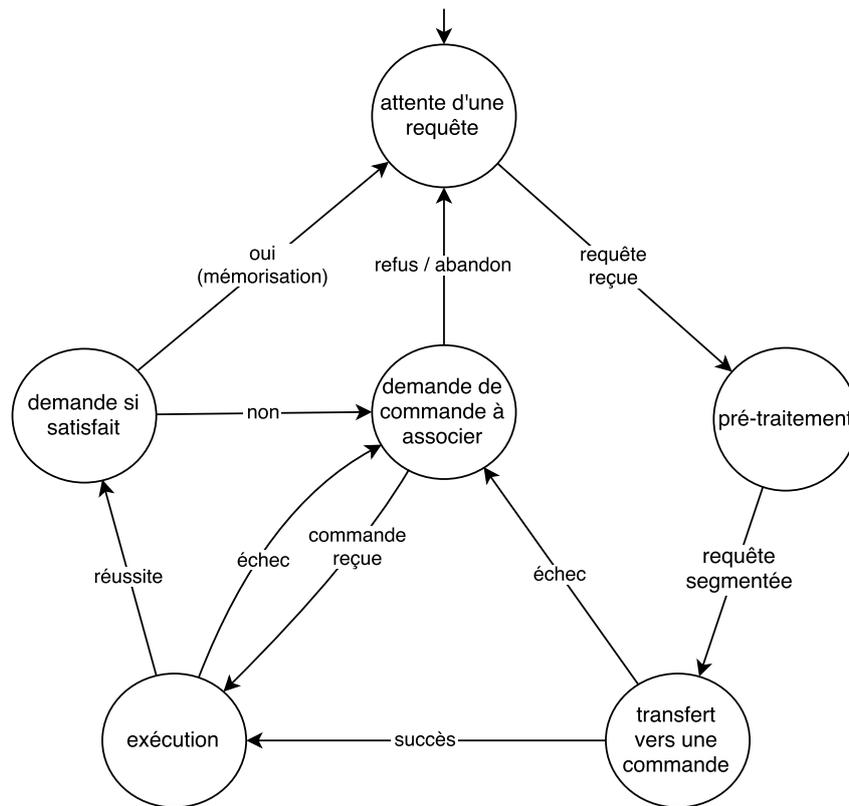


FIGURE 1 – Automate du dialogue suivi par NELIDA

aux exemples minoritaires. De plus, il s'agit d'une méthode intelligible dont il est aisé d'argumenter les productions, car l'analogie est un mode privilégié de la cognition humaine.

Lepage et Denoual ont proposé dans [Lepage et Denoual, 2005] une méthode de traduction automatique indépendante des langues source et cible fondée sur le raisonnement par analogie formelle. Dans [Letard *et al.*, 2015], nous avons montré la complémentarité de cette méthode avec le transfert analogique direct dans le cadre de l'application au transfert depuis une langue naturelle vers un langage formel. Le système NELIDA découle de cette combinaison, et inclut également la possibilité de produire des réponses approchées, proposée dans [Letard *et al.*, 2016] afin d'augmenter la couverture du système (*i.e.* la proportion de requêtes de l'utilisateur qui reçoivent une réponse).

## Généricité

L'approche de transfert de langages par analogie formelle, lorsqu'elle est appliquée sur les énoncés en tant que séquences de tokens, présente l'intérêt d'être indépendante des langages utilisés. Il en résulte un système pouvant simultanément être utilisé dans des langues différentes et en particulier dans un idiolecte précis : une langue propre à l'utilisateur ou à sa communauté. En revanche, son utilisation pour des langages de programmation différents ne peut pas être simultanée, car le contexte ou l'utilisateur ne sont pas indifférents au langage utilisé par NELIDA pour ses réponses.

## Incrément de la base d'exemples

Le comportement du système est guidé à l'aide d'un automate à états finis représenté sur la figure 1. L'exemple 1 donne un aperçu du comportement résultant. À chaque boucle d'interaction, le système s'assure auprès de l'utilisateur de la validité de sa réponse. Si la réponse n'est pas correcte, l'utilisateur est sollicité pour renseigner une commande permettant d'exécuter sa requête. L'association requête-commande est ensuite ajoutée à la base d'exemples pour permettre sa réutilisation immédiate pour la production de réponses à d'autres requêtes.

## Références

- [Lepage et Denoual, 2005] LEPAGE, Y. et DENOUAL, E. (2005). Purest ever example-based machine translation : Detailed presentation and assessment. *Machine Translation*, 19(3-4):251–282.
- [Letard, 2017] LETARD, V. (2017). *Apprentissage incrémental de modèles de domaines par interaction dialogique*. Thèse de doctorat.
- [Letard *et al.*, 2016] LETARD, V., ILLOUZ, G. et ROSSET, S. (2016). Reducing noise sensitivity of formal analogical reasoning applied to language transfer. *In Computational Analogy Workshop at ICCBR (ICCB-CA 2016)*, The Twenty-Forth International Conference on Case-Based Reasoning - Workshop Proceedings, page 11, Atlanta, United-States (GA). Alexandra Coman & Stelios Kapetanakis.
- [Letard *et al.*, 2015] LETARD, V., ROSSET, S. et ILLOUZ, G. (2015). Analogical reasoning for natural to formal language transfer. *In IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI 2015)*, page 8, Vietri sul Mare, Italy.

