

Systemes de recommandation

Raphaël Fournier-S'niehotta

Sorbonne Université, raphael.fournier@lip6.fr

IP Paris
CES-IA
2025-2026



Plan

1 | Introduction

- 1 – Définition, exemples
- 2 – Données

2 | Filtrage collaboratif par le voisinage

- 1 – Filtrage collaboratif *user-based*
- 2 – Filtrage collaboratif *item-based*
- 3 – Complexité, efficacité algorithmique
- 4 – Comparaison entre *item-* et *user-based* CF
- 5 – Approches orientées graphes pour le filtrage par voisinage

3 | Filtrage collaboratif par modèle

- 1 – Introduction
- 2 – Modèles à facteurs latents

4 | Recommandation par le contenu

5 | Systèmes de recommandation hybrides

6 | Recommandation sociale

7 | Évaluation des systèmes de recommandation

8 | Thématiques avancées

- 1 – Reco séquentielle
- 2 – Embeddings
- 3 – LLM et recommandation
- 4 – Enjeux sociétaux

Introduction

Plan

1 | Introduction

1 – Définition, exemples

2 – Données

Définition

Un *système de recommandation* **filtre** les éléments (*items*) d'une collection à des utilisateurs (*users*).

- Utilisateurs-ices : presque toujours des personnes
- Éléments :
 - commerciaux (produits à vendre)
 - culturels (films, chansons, presse)
 - professionnels (articles scientifiques)

Quelques exemples

The screenshot shows a window titled "Gnus" with a menu bar (File, Edit, Apps, Options, Buffers, Tools, Article, Threads, Misc, Post, Score, Mscrypt, Help) and a toolbar. The main pane displays a message header and body. The header lists several articles from "The Ripper" in a table-like format. The body of the selected article is a recipe for "Popeye's Famous Fried Chicken" from a 1996 Usenet post.

	****	[30: The Ripper	] Popeye's Famous Fried Chicken
***	[[55:	Art Poe	] Quiche Lorraine
****	[[123:	Art Poe	] COLLECTION (4) Persimmon Desserts
***	[[97:	Art Poe	] COLLECTION (2) Brioche
NA	[[58:	Art Poe	] Corn Tortillas
NA	[[46:	Art Poe	] Flour Tortillas
**	[[40:	Robyn Walton	] *Czechoslovakian Cabbage Soup
**	[[57:	Robyn Walton	] Collection (2) Rice Pudding

--- Gnus_rec.food.recipes/17026 (143 more) 2:48pm (Summary)

From: The Ripper <ripper@Onramp.NET>
 Subject: Popeye's Famous Fried Chicken
 Newsgroups: rec.food.recipes
 Date: 1 Jan 1996 07:28:51 -0700
 Organization: Onramp
 Reply-To: The Ripper <ripper@Onramp.NET>
 Followup-To: rec.food.cooking

>From the book written by Todd Wilbur.

6 cups vegetable oil
 2/3 cup all-purpose flour
 1 tbsl salt
 2 tbsl white pepper
 1 tsp cayenne pepper
 2 tsp paprika
 3 eggs
 1 frying chicken w/skin, cut up

Heat the oil over medium heat in a deep fryer or in a wide, deep pan on the stove. In a large, shallow bowl, combine the flour, salt, pepper, and paprika. Break the eggs into a separate shallow bowl and beat until blended. Check the oil by dropping in a pinch of the flour mixture. If the oil bubbles rapidly around the flour, it is ready. Dip each piece of chicken into the eggs, then coat generously with the flour mixture. Drop each piece into the hot oil and fry for 15 to 25 minutes, or until it is a dark golden brown. Remove the chicken to paper towels or a rack to drain.

--- Gnus_rev.food.recipes/17026 Popeye's Famous Fried Chicken1:48pm (Article

- Usenet news
- Groupe de recherche GroupLens, à l'origine de datasets importants dans la communauté et de nombreux algorithmes.

Quelques exemples : Amazon

← → ↻ 📄 🔍 https://www.amazon.fr/Recommender-Systems-Textbook-Charu-Aggarwal/dp/3319296574/ref=sr_1_1?__mk_fr_FR=AMAZ | ...

Toutes Ventes Flash Chez Raphaël Coupons Beauté Amazon Basics Sports & Activités en plein-air Santé et produits d'hygiène Vendre sur Amazon

Livres anglais et étrangers Recherche détaillée Nos rubriques Nouveautés Meilleures ventes Bonnes affaires Livres audio Tous les livres Vendez !

Obtenez 10% de réduction sur votre premier achat effectué dans l'application Amazon

Recommender Systems: The Textbook (English Edition) et plus de huit millions d'autres livres sont disponibles pour le Kindle d'Amazon. En savoir plus

Retour aux résultats

Recommender Systems: The Textbook Relié – 4 avril 2016
Édition en Anglais de Charu C. Aggarwal (Auteur)
★★★★☆ 40 évaluations

Voir les formats et éditions

Format Kindle	Relié	Brosché
42,64 €	60,92 €	62,53 €
Lisez avec notre Appli gratuite	1 D'occasion à partir de 56,06 € 6 Neuf à partir de 60,92 €	4 Neuf à partir de 62,53 €



 Voir les 2 images

This book comprehensively covers the topic of recommender systems, which provide personalized recommendations of products or services to users based on their previous searches or purchases. Recommender system methods have been adapted to diverse applications including query log mining, social networking, news recommendations, and computational advertising. This book synthesizes both fundamental and advanced topics of a research area that has now reached maturity. The chapters of this book are organized into three categories:

Algorithms and evaluation: These chapters discuss the fundamental algorithms in

Signaler des informations incorrectes sur les produits

Les clients ayant acheté cet article ont également acheté



Practical Recommender Systems
→ Kim Falk



Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and ...

Neuf: 60,92 €
Tous les prix incluent la TVA.

Livraison à partir de 0,01 € : **jeudi 22 avr.** en France métropolitaine.
[Détails](#)

Livraison accélérée : **mercredi 21 avr.**
Commandez dans les 10 h et 3 mins [Détails](#)

Livrer à Fournier... - Villejuif 94800

Il ne reste plus que 15 exemplaire(s) en stock (d'autres exemplaires sont en cours d'acheminement).
Disponible au format Kindle. Les ebooks Kindle peuvent être lus sur n'importe quel appareil avec l'appli gratuite Kindle.

Quantité: 1

Ajouter au panier

Acheter cet article

Transaction sécurisée

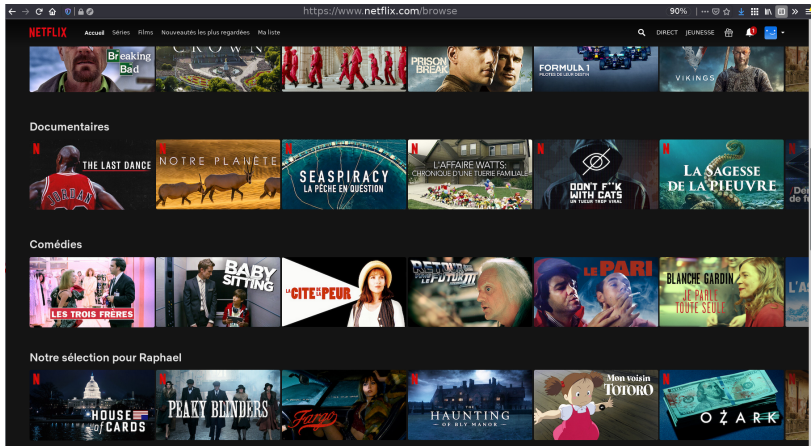
Expédié et vendu par Amazon.

☐ Livré en 1 jour ouvré

Profitez de tous les avantages de livraison en vous inscrivant à **Amazon Prime**

- Pionniers dans le domaine commercial
- échelle 1-5, explications, implicite/explicite

Quelques exemples : Netflix



- Explications détaillées, Netflix Prize

Quelques exemples : Google Actualités (news)

☰

Google Actualités

🔍 Rechercher des sujets, des lieux et des sources

🌐 À la une

👤 Pour vous

⭐ Favoris

🔍 Recherches enregistrées

🛡️ COVID-19

🇫🇷 France

🌍 International

📍 Vos actualités locales

📊 Économie

🔬 Sciences et technologies

📺 Divertissement

🚴 Sports

🏥 Santé

Langue et zone géographique

Français (France)

Paramètres

🕒 Comment les articles sont-ils classés ?

Pour vous
Recommandé en fonction de vos centres d'intérêt

La chance historique de Maxime Vachier-Lagrave au Tournoi des Candidats

L'Équipe.fr • Il y a 17 heures

- Kevin Bardi : «Maxime Vachier-Lagrave gagnant du tournoi des candidats ? Ce serait un aboutissement pour les échecs en France»

CNEWS • Il y a 1 heure

 Voir la couverture complète

Serie A : trois clubs demandent l'exclusion de la Juve, l'Inter et l'AC Milan !

Foot Mercato • Il y a 1 heure

- Trois clubs de Serie A veulent l'exclusion de la Juve, du Milan et de l'Inter

SO FOOT • Il y a 3 heures

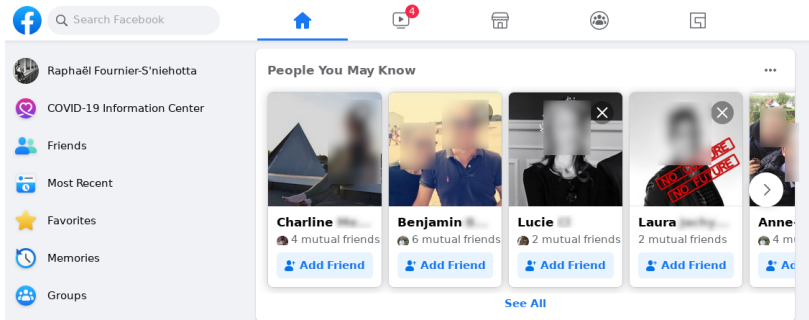
 Voir la couverture complète

Purificateur d'air Eclipse : Rowenta voudrait-il faire de l'ombre à Dyson ?

Les Numériques • Il y a 2 jours



Quelques exemples : Facebook



- Vise l'accroissement de la taille du réseau (pas directement des "ventes")

Mais aussi

Spotify, Deezer	Musique
LinkedIn	Réseaux Pro
Yelp	Restaurants
TripAdvisor	Voyages
Youtube	Vidéos en ligne

Motivation

- "Ces systèmes guident les gens vers des contenus intéressants grâce aux recommandations d'autres personnes." (Paul Resnick)

Quels problèmes cherche-t-on à résoudre ?

- surcharge d'information
- longue traîne
- expérience utilisateur
- reproduction d'un modèle hors ligne

Objectifs, défis

- Objectif premier : accroissement des ventes (contexte commercial)
- Manières plus ou moins directes!
 - Facilité d'accès aux contenus du système
 - Améliorer la pertinence de ce que l'utilisateur voit
 - Nouveauté
 - Surprise (légèrement différent)
 - Diversité

Défis :

- Taille des matrices
- Matrices creuses
- Diversité des objectifs à satisfaire

Interdisciplinarité

Le problème de la recommandation est proche de plusieurs disciplines :

- psychologie (expression du besoin, des goûts)
- marketing (accroissement des ventes)
- design (interfaces, graphiques ou non)
- statistiques (probabilités, modélisation)
- informatique (passage à l'échelle)

Modélisation du problème

- De très nombreuses approches existent!
- Les deux plus importantes : "prédiction" et "classement"

Prédiction

- On cherche à prédire l'évaluation qu'un utilisateur donnerait à un élément.
- Avec n items et m users, on a une matrice $m \times n$
- les données d'apprentissage sont les cases remplies,
- on cherche à remplir les cases vides

Classement

- On ne cherche plus l'évaluation d'un élément par une personne
- On détermine les k éléments les plus intéressants (**top- k**)
- Seul l'ordre compte (pas les écarts entre éléments)
- On peut utiliser une modélisation "prédiction" puis trier, pour faire un classement

Modélisation générique

	i1	i2	i3	i4
u1		3	5	2
u2	1	5	2	4
u3		3		
u4			5	2
u5		1	4	

	i1	i2	i3	i4
u1	1	3	5	2
u2	1	5	2	4
u3	2	3	1	4
u4	1	4	5	2
u5	2	1	4	3

u1

i1 1

u3

i4	4
i1	2
i3	1

	i1	i2	i3	i4
u1		1	1	1
u2	1	1	1	1
u3		1		
u4			1	1
u5		1	1	

	i1	i2	i3	i4
u1	0	1	1	1
u2	1	1	1	1
u3	0	1	1	1
u4	0	0	1	1
u5	1	1	1	0

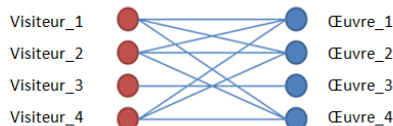
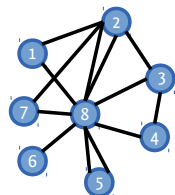
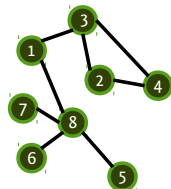
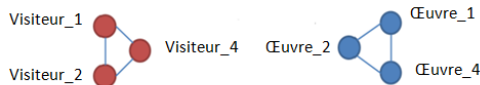
u3

i3
i4

u5

i1

Modélisation générique

 $K_o = 3$ $K_v = 3$ 

graphes de données *implicites* ou *explicites*

Données : échelles de valeurs

- Le système de recommandation que l'on *peut* mettre en place dépend beaucoup des données dont on dispose.
- Les évaluations (*ratings*) sont souvent sur une échelle de valeurs
- Parfois continue, le plus souvent discrète
- Valeurs négatives parfois autorisées ($\{-2, -1, 0, 1, 2\}$, $[-10; 10]$)
- Systèmes les plus courants : échelle de 1 à 5, ou 1 à 10
- Interprétation variable, échelles équilibrées (o/n), élément neutre (o/n)
- Valeurs catégorielles ordonnées
- Binarité 0-1
- Unarité

Plan

1 | Introduction

1 – Définition, exemples

2 – Données

Données : réactions explicites et implicites

	GLADIATOR	GODFATHER	BEN-HUR	GOODFELLAS	SCARFACE	SPARTACUS
U_1	1			5		2
U_2		5			4	
U_3	5	3		1		
U_4			3			4
U_5				3	5	
U_6	5		4			

(a) Ordered ratings

	GLADIATOR	GODFATHER	BEN-HUR	GOODFELLAS	SCARFACE	SPARTACUS
U_1	1			1		1
U_2		1			1	
U_3	1	1		1		
U_4			1			1
U_5				1	1	
U_6	1		1			

(b) Unary ratings

- L'expressivité de la 2e est plus faible : on ne sait pas que U_1 n'aime pas Gladiator.
- La 2e permet seulement d'exprimer des préférences "positives"

Données et sur-apprentissage

- Données unaires, implicit feedback
 - Analyse simplifiée en identifiant 0 et données manquantes
 - Sans ça, sur-apprentissage (pas assez de valeurs distinctes)
 - Biais introduit, mais assez faible
(contexte : la plupart des choses ne seront pas vues)
 - En général très faciles à collecter!
 - Nombreuses sources (achat, visite de page, *actions*)
- Données explicites, échelles plus grandes
 - analyse non simplifiée en identifiant 0, biais plus fort
 - Données plus délicates à collecter : contribution volontaire de l'utilisateur
 - Incitations explicites (questions, récompenses, etc.)
 - Incitations implicites (design d'interface)

Données : critiques

- Généralisation des systèmes de recommandation ces dernières années
- La dimension humaine est parfois oubliée
- Attention à ce qu'on note : Uberisation
- Crédit social, assurances : croisement de sources
- Sécurité, évidemment
- droit à l'oubli
- Weapons of Math Destruction (Cathy O'Neil, 2016)
- BlackMirror
- David Chavalarias, Toxic Data
- Éric Sadin, La vie algorithmique

La suite : les grands modèles de RS

Historiquement, 4 grandes familles de systèmes de recommandation :

1. le filtrage collaboratif, dont :
 - les méthodes "à mémoire" ou "avec voisinage"
(*neighbour-based collaborative filtering*)
 - les méthodes à modèle (*model-based collaborative filtering*)
 2. le filtrage par le contenu
(*content-based methods*)
 3. les méthodes reposant sur des connaissances externes
(*knowledge-based methods*)
 4. les systèmes hybrides, combinant des approches précédentes
(*ensemble/hybrid methods*)
- Apports récents : les LLM (cf plus tard)

Filtrage collaboratif par le voisinage

Filtrage collaboratif

- Par le voisinage (*neighbour-based collaborative filtering*)
 - User-based
 - Item-based

User-based

- On cherche des utilisateurs *similaires* à A
- on recommande des éléments à A en faisant une moyenne pondérée des notes de ces utilisateurs.
- On se limite en général à k utilisateurs.
- Les fonctions de similarité sont à calculer sur les lignes de la matrice des notes.

Item-based

- Pour connaître la note de A sur l'item I, on cherche un ensemble d'items similaires à I, que A a noté, et on calcule une moyenne pondérée.
- Les similarités sont calculées sur les colonnes.

Filtrage collaboratif par le voisinage

Principe élémentaire

- il est possible de trouver des relations (dépendances, corrélations) dans les interactions utilisateurs-items
 - Un utilisateur intéressé par un documentaire historique a plus de chance d'être intéressé par un autre documentaire historique ou des programmes éducatifs qu'un film d'action
 - Des catégories d'éléments présentent des corrélations significatives, que l'on peut utiliser pour faire des recommandations plus précises
 - Cela peut aussi se jouer à une granularité plus fine que les catégories
-
- Présuppose que l'on peut apprendre ces relations, grâce aux données
 - Plus on a de données, plus les recommandations seront robustes
 - Les modèles peuvent identifier des catégories d'utilisateurs aux comportements de consommation similaires

Avantages, inconvénients

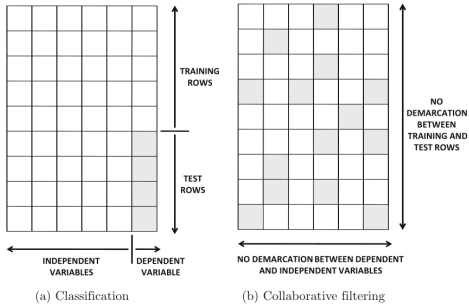
Avantages

- très simple à implémenter
- recommandations faciles à expliquer

Inconvénients

- peu efficace avec matrice très creuses
- trop peu d'utilisateurs ou d'items similaires : *couverture* faible
- souvent, seuls les top- k éléments suffisent, ce n'est pas toujours un gros problème

Proximité avec la classification

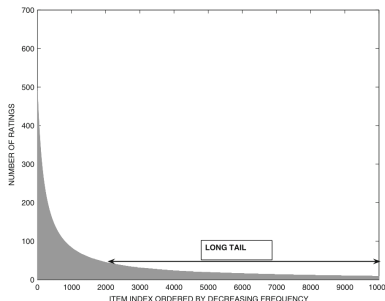


- Analyse de données manquantes
 - cas difficile, large, sparse

Inductif, transductif

- Dans un contexte *transductif*, les données de test sont incluses dans les données d'entraînement
- Il est souvent dur de faire des prédictions pour des données de test non présentes lors de l'entraînement
- Les modèles capables de faire des prédictions pour de nouvelles instances sont dits *inductifs* (naïve Bayes)
- L'enchevêtrement des données dans la matrice en recommandation fait qu'on est en transductif

Longue traîne et matrices



- Intérêt commercial limité pour les items fréquents (puisqu'ils sont déjà très vendus)
- Recommander la long tail
- Difficulté d'avoir des notes, suggestion d'items populaires
- Baisse de diversité
- Difficulté de calculer des voisinages fiables

Plan

2 | Filtrage collaboratif par le voisinage

1 – Filtrage collaboratif *user-based*

2 – Filtrage collaboratif *item-based*

3 – Complexité, efficacité algorithmique

4 – Comparaison entre *item-* et *user-based* CF

5 – Approches orientées graphes pour le filtrage par voisinage

User-based CF

Principe : les utilisateurs similaires ont des évaluations similaires pour des éléments donnés.

- On cherche un *voisinage* d'utilisateurs similaires à l'utilisateur cible
- On calcule la similarité entre cet utilisateur et tous les autres
- on en garde quelques uns

Difficile car :

- différentes manières de noter : certains notent ce qu'ils aiment (surtout), d'autres ce qu'ils n'aiment pas
- il faut que les ensembles notés coïncident

Notation pour la matrice

Soit $R = r_{uj}$ la matrice $m \times n$.

I_u est l'ensemble des indices des items notés par u .

L'ensemble noté par u et v est : $I_u \cap I_v$.

Exemple :

$I_u = \{1, 3, 5\}$, $I_v = \{1, 2, 3, 4\}$, $I_u \cap I_v = \{1, 3\}$.

Similarité : coefficient de corrélation de Pearson (PCC)

- On calcule d'abord la moyenne des notes de u , μ_u :

$$\mu_u = \frac{\sum_{k \in I_u} r_k}{|I_u|} \quad \forall u \in \{1 \dots m\}$$

- Puis la similarité elle-même :

$$\text{Sim}(u,v) = \frac{\sum_{k \in I_u \cap I_v} (r_{uk} - \mu_u) \cdot (r_{vk} - \mu_v)}{\sqrt{\sum_{k \in I_u \cap I_v} (r_{uk} - \mu_u)^2} \cdot \sqrt{\sum_{k \in I_u \cap I_v} (r_{vk} - \mu_v)^2}} \quad \forall (u,v) \in \{1 \dots m\}^2$$

- On pourrait garder le top- k des utilisateurs avec le meilleur PCC
- Mais nombre très variable de ratings pour un élément donné
- On cherche les top- k pour chaque élément

Étape 2 : calcul de la note

- Manière simple : on fait une moyenne pondérée des notes des utilisateurs
- Éventuellement les k plus proches
- Poids : les PCC entre utilisateurs
- Problème : les échelles de notes individuelles
- Solution : évaluations centrées

$$s_{uj} = r_{uj} - \mu_u \quad \forall u \in \{1 \dots m\}$$

- On calcule une évaluation pondérée sur ces notes (positive ou négative)
- La note finale prédite $\hat{r}_{uj}$ est obtenue en rajoutant la moyenne :

$$\hat{r}_{uj} = \mu_u + \frac{\sum_{v \in P(j)} \text{Sim}(u,v) \cdot s_{vj}}{\sum_{v \in P(j)} |\text{Sim}(u,v)|}$$

Exemple UBCF

On cherche $\hat{r}_{31}$ et $\hat{r}_{36}$ dans l'exemple suivant (notes $[0;7]$) :

Item-Id $\Rightarrow$	1	2	3	4	5	6	Mean Rating	Cosine($i, 3$) (user-user)	Pearson($i, 3$) (user-user)
User-Id $\Downarrow$									
1	7	6	7	4	5	4	5.5	0.956	0.894
2	6	7	?	4	3	4	4.8	0.981	0.939
3	?	3	3	1	1	?	2	1.0	1.0
4	1	2	2	3	3	4	2.5	0.789	-1.0
5	1	?	1	2	3	3	2	0.645	-0.817

$$\text{Cosine}(1, 3) = \frac{6 * 3 + 7 * 3 + 4 * 1 + 5 * 1}{\sqrt{6^2 + 7^2 + 4^2 + 5^2} \cdot \sqrt{3^2 + 3^2 + 1^2 + 1^2}} = 0.956$$

$$\begin{aligned} \text{Pearson}(1, 3) &= \\ &= \frac{(6 - 5.5) * (3 - 2) + (7 - 5.5) * (3 - 2) + (4 - 5.5) * (1 - 2) + (5 - 5.5) * (1 - 2)}{\sqrt{1.5^2 + 1.5^2 + (-1.5)^2 + (-0.5)^2} \cdot \sqrt{1^2 + 1^2 + (-1)^2 + (-1)^2}} \\ &= 0.894 \end{aligned}$$

- PCC plus discriminant que Cosinus
- Le signe peut être informatif : (dis)similarité
- top-2 utilisateurs proches de u_3 : u_1 et u_2

Exemple UBCF

- Sans centrer :

$$\hat{r}_{31} = \frac{7 * 0.894 + 6 * 0.939}{0.894 + 0.939} \approx 6.49$$

$$\hat{r}_{36} = \frac{4 * 0.894 + 4 * 0.939}{0.894 + 0.939} = 4$$

- On privilégierait donc l'item 1, plutôt que le 6
- les prédictions suggèrent que u_3 aimera 1 et 6 plus que *tous* les autres.
- attention : biais, $\{u_1, u_2\}$ est un groupe optimiste.

- En centrant :

$$\hat{r}_{31} = 2 + \frac{1.5 * 0.894 + 1.2 * 0.939}{0.894 + 0.939} \approx 3.35$$

$$\hat{r}_{36} = 2 + \frac{-1.5 * 0.894 - 0.8 * 0.939}{0.894 + 0.939} \approx 0.86$$

- même résultat, 1 mieux que 6
- mais! $r_{36} = 0.86$, moins que les autres ratings
- u_1 et u_2 avaient aussi noté 6 moins que les autres

Attention : prédictions pour 6 éventuellement hors de l'intervalle des valeurs

Amplification des poids

- on amplifie parfois le poids des utilisateurs dans la moyenne pondérée

$$\text{Sim}(u,v) = \text{Pearson}(u,v)^\alpha \quad \text{avec } \alpha > 1$$

- On peut aussi filtrer le "voisinage" (*peer group*) d'un utilisateur de différentes façons
- on peut éliminer des notes faiblement ou négativement corrélées

Impact de la longue traîne

- Les éléments populaires apparaissent souvent dans les ensembles d'éléments en commun entre deux utilisateurs
- Pourtant, ils sont peu discriminants
- Recommandation de moindre qualité (sélection du voisinage, calcul de note)

Solution (cf *Information retrieval*) :

- Termes peu informatifs et fréquents (*stop-words*, "le", "un-e", "de", etc.) évacués avec Inverse Document Frequency (tf.idf)
- Ici : Inverse User Frequency. Pour chaque élément j , noté m_j fois, on définit :

$$w_j = \log\left(\frac{m}{m_j}\right) \quad \forall j \in \{1 \dots n\}$$

- Ce poids est introduit dans le PCC :

$$\text{Pearson}(u,v) = \frac{\sum_{k \in I_u \cap I_v} w_k (r_{uk} - \mu_u) \cdot (r_{vk} - \mu_v)}{\sqrt{\sum_{k \in I_u \cap I_v} w_k \cdot (r_{uk} - \mu_u)^2} \cdot \sqrt{\sum_{k \in I_u \cap I_v} w_k \cdot (r_{vk} - \mu_v)^2}}$$

Plan

2 | Filtrage collaboratif par le voisinage

1 – Filtrage collaboratif *user-based*

2 – Filtrage collaboratif *item-based*

3 – Complexité, efficacité algorithmique

4 – Comparaison entre *item-* et *user-based* CF

5 – Approches orientées graphes pour le filtrage par voisinage

Item-based CF

- Les voisinages sont construits en termes d'items, et non d'utilisateurs
- Comme précédemment, on calcule des évaluations centrées s_{uj}
- On définit l'ensemble U_i des utilisateurs qui ont évalué i
- On calcule une similarité cosinus :

$$\text{cosA}(i, j) = \frac{\sum_{u \in U_i \cap U_j} s_{ui} \cdot s_{uj}}{\sqrt{\sum_{u \in U_i \cap U_j} s_{ui}^2} \cdot \sqrt{\sum_{u \in U_i \cap U_j} s_{uj}^2}}$$

- Un PCC entre colonnes pourrait aussi être utilisé, mais les résultats sont généralement moins bons

Item-based CF

- Pour prédire la note $\hat{r}_{ut}$ de l'utilisateur u sur l'objet t , on calcule :
 - un ensemble $Q_t(u)$ contenant les top- k éléments
 - puis :

$$\hat{r}_{ut} = \frac{\sum_{j \in Q_t(u)} \text{cosA}(j, t) \cdot r_{uj}}{\sum_{j \in Q_t(u)} |\text{cosA}(j, t)|}$$

- On utilise les propres notes de l'utilisateur pour faire la prédiction
- Dans le cas de films, les top- k éléments seront souvent des films du même genre

Item-based CF

On cherche $\hat{r}_{31}$ et $\hat{r}_{36}$:

Item-Id $\Rightarrow$	1	2	3	4	5	6
User-Id $\Downarrow$						
1	1.5	0.5	1.5	-1.5	-0.5	-1.5
2	1.2	2.2	?	-0.8	-1.8	-0.8
3	?	1	1	-1	-1	?
4	-1.5	-0.5	-0.5	0.5	0.5	1.5
5	-1	?	-1	0	1	1
Cosine(1, j) (item-item)	1	0.735	0.912	-0.848	-0.813	-0.990
Cosine(6, j) (item-item)	-0.990	-0.622	-0.912	0.829	0.730	1

$$\text{AdjustedCosine}(1, 3) = \frac{1.5 * 1.5 + (-1.5) * (-0.5) + (-1) * (-1)}{\sqrt{1.5^2 + (-1.5)^2 + (-1)^2} \cdot \sqrt{1.5^2 + (-0.5)^2 + (-1)^2}} = 0.912$$

- les items 2 et 3 sont les plus proches de 1
- les items 4 et 5 sont les plus proches de 6

Item-based CF

On obtient :

$$\hat{r}_{31} = \frac{3 * 0.735 + 3 * 0.912}{0.735 + 0.912} = 3$$
$$\hat{r}_{36} = \frac{1 * 0.829 + 1 * 0.730}{0.829 + 0.730} = 1$$

- Évaluations dans l'intervalle et plus en phase avec les autres notes de l'utilisateur
- En général les listes de recommandations UBCF et IBCF sont proches

Plan

2 | Filtrage collaboratif par le voisinage

1 – Filtrage collaboratif *user-based*

2 – Filtrage collaboratif *item-based*

3 – Complexité, efficacité algorithmique

4 – Comparaison entre *item-* et *user-based* CF

5 – Approches orientées graphes pour le filtrage par voisinage

Complexité

- Approche gloutonne : on calcule les notes de tous les éléments pour un utilisateur donné, puis on classe.
- Possible, mais coûteux
- Réutilisation de calculs intermédiaires

En pratique : une phase *offline* et une phase *online* :

- En offline, les similarités entre utilisateurs et voisinage sont pré-calculés
- En online, on calcule les notes et on classe

Complexité

- Soit $n' \ll n$ le nombre max d'évaluations d'items par les utilisateurs
- Soit $m' \ll m$ le nombre max d'évaluations reçues par un élément
- Calculer d'un voisinage en $\mathcal{O}(m \cdot n')$, de tous en $\mathcal{O}(m^2 \cdot n')$
- En item-based : $\mathcal{O}(n^2 \cdot m')$
- En online, chaque note est calculée en $\mathcal{O}(k)$, k taille du voisinage considéré
- Donc $\mathcal{O}(k \cdot n)$ pour toutes, avant classement (tri).

Plan

2 | Filtrage collaboratif par le voisinage

1 – Filtrage collaboratif *user-based*

2 – Filtrage collaboratif *item-based*

3 – Complexité, efficacité algorithmique

4 – Comparaison entre *item*- et *user*-based CF

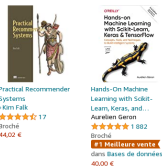
5 – Approches orientées graphes pour le filtrage par voisinage

Quelques éléments de comparaison

- Utiliser *les propres notes* de l'utilisateur est généralement meilleur que *les notes des autres utilisateurs similaires*
- Mais cela peut conduire à privilégier des éléments trop (ou toujours) similaires à ceux déjà vus : moins de diversité et de surprise!
- Stabilité meilleure en IB. Plus d'users que d'items, donc les items auront des ensembles d'users en commun plus larges. Et plus d'utilisateurs arrivent dans le système, donc moins de recalcul de voisinage.
- Explicabilité meilleure en item-based :

Because you watched "Secrets of the Wings," [the recommendations are] {List} .

Les clients ayant acheté cet article ont également acheté



- En user-based, on ne connaît pas les *utilisateurs similaires*

Avantages et inconvénients de ces méthodes

Avantages

- Facilité d'implémentation, de débogage
- Interprétabilité raisonnable (vs méthodes à modèle)
- Stabilité

Inconvénients

- Phase offline couteuse en temps et espace
- Couverture limitée (matrice creuse)

Réduction de dimension

- On cherche une représentation à base de facteurs latents dans un espace de basse dimension *latent factor models*
- une distance entre facteurs latents d'utilisateurs peut-être calculée, même avec peu d'items communs
- efficacité accrue pour les calculs de voisinages

Deux possibilités :

- réduction de dimension sur les lignes **ou** les colonnes de la matrice
- réduction sur les deux simultanément (cf plus tard)
- Méthodes possibles : SVD ou ACP

Réduction de dimension : SVD

- Augmentation de valeurs manquantes de la matrice (avec les moyennes de ligne ou colonne) : on obtient une matrice R_f
- On calcule une matrice de similarité $S = R_f^T R_f$
- S est semi-définie positive, peut s'écrire :

$$S = P \Delta P^T$$

- Avec :
 - P est une matrice $n \times n$, avec les vecteurs propres de S (orthonormés)
 - Δ est une matrice diagonale avec les valeurs propres non nulles de S
- Soit P_d une matrice $n \times d$ contenant les vecteurs correspondant aux valeurs propres les plus grandes
- La représentation réduite de R_f est $R_f P_d$ ($m \times d$)
- Chaque utilisateur a une représentation en dimension d
- On l'utilise pour calculer les voisinages, avant calcul de prédictions.

Plan

2 | Filtrage collaboratif par le voisinage

1 – Filtrage collaboratif *user-based*

2 – Filtrage collaboratif *item-based*

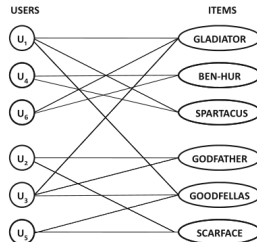
3 – Complexité, efficacité algorithmique

4 – Comparaison entre *item-* et *user-based* CF

5 – Approches orientées graphes pour le filtrage par voisinage

Graphes

	GLADIATOR	GODFATHER	BEN-HUR	GOODFELLAS	SCARFACE	SPARTACUS
U_1	1			5		2
U_2		5			4	
U_3	5	3		1		
U_4			3			4
U_5				3	5	
U_6	5		4			



- Les graphes disposent d'outils et de concepts dédiés, que l'on peut mobiliser
- Variétés d'algorithmes différents
- Problème lié à la notion de *prédiction de liens* en SNA

Marches aléatoires, chemins

Marches aléatoires

- Méthodes probabilistes, telles que le Personal PageRank ou SimRank
- Efficacité car connexité peut-être large dans un graphe

Chemins

- Affinité basée sur les nombres de chemins et leurs longueurs :
- Centralité de Katz

$$\text{Katz}(i, j) = \sum_{t=1}^{\infty} \beta^t n_{ij}^{(t)}$$

- $n_{ij}^{(t)}$ nombre de chemins entre i et j
- $\beta < 1$ paramètre
(inférieur à l'inverse de la plus grande v.p de A)

- La matrice des centralités Katz K se calcule :

$$K = \sum_{i=1}^{\infty} (\beta A)^i = (I - \beta A)^{-1} - I$$

Filtrage collaboratif par modèle

Plan

3 | Filtrage collaboratif par modèle

1 – Introduction

2 – Modèles à facteurs latents

Filtrage collaboratif par modèle

- Dans le FC par voisinage, pas de modèle, les données orientent l'apprentissage (*instance-based learning*)
- Ici :
 1. apprentissage (*training*), une construction du modèle
 - Apprentissage *classique* : arbre de décision, règles, classifieur Bayes, réseaux de neurones
 2. phase distincte de prédiction

Règles d'association

- Historiquement, règles d'association proposées dans le contexte du supermarché
- On considère un ensemble de transactions $T = \{T_1 \dots T_m\}$ définies sur n éléments de I .
- Chaque T est un sous-ensemble d'éléments de I , on cherche les corrélations de sous-ensembles
- Exemple : {Bread, Butter, Milk} et {Fish, Beef, Ham} sont fréquents
- Mary a acheté {Butter, Milk}, on peut penser qu'elle achètera Bread

Item $\Rightarrow$	<i>Bread</i>	<i>Butter</i>	<i>Milk</i>	<i>Fish</i>	<i>Beef</i>	<i>Ham</i>
Customer $\Downarrow$						
Jack	1	1	1	0	0	0
Mary	0	1	1	0	1	0
Jane	1	1	0	0	0	0
Sayani	1	1	1	1	1	1
John	0	0	0	1	0	1
Tom	0	0	0	1	1	1
Peter	0	1	0	1	1	0

Règles d'association

- Une règle se note $X \Rightarrow Y$ ($\{\text{Butter}, \text{Milk}\} \Rightarrow \{\text{Milk}\}$)
- On utilise deux notions pour caractériser les fréquences des sous-ensembles (*itemset*)
 - Le support de $X \subseteq I$, défini comme la fraction des transactions dont X est un sous-ensemble
 - La confiance, définie comme la probabilité conditionnelle que T contienne Y sachant qu'elle contient X .
Obtenue en divisant le support de $X \cup Y$ par celui de X
- On dit qu'une règle est une règle d'association de support minimal s et de confiance minimale c si :
 - Le support de $X \cup Y$ est d'au moins s
 - La confiance $X \Rightarrow Y$ est au moins c

Classifieur Bayésien naïf

- On oublie l'ordre des notes, on considère qu'il s'agit de l catégories $v_1 \dots v_l$
- On cherche r_{uj} , avec une valeur parmi $v_1 \dots v_l$
- On doit déterminer la probabilité que r_{uj} prenne chacune de ses valeurs, sachant que l'on dispose d'un ensemble de notes I_u :

$$P(r_{uj} = v_s | \text{notes de } I_u) \quad \forall s \in \{v_1, \dots, v_l\}$$

- On transforme avec :

$$P(A|B) = \frac{P(A) \cdot P(B|A)}{P(B)}$$

- en :

$$P(r_{uj} = v_s | \text{notes de } I_u) = \frac{P(r_{uj} = v_s) \cdot P(\text{notes de } I_u | r_{uj} = v_s)}{P(\text{notes de } I_u)}$$

- On gardera la plus grande probabilité

Plan

3 | Filtrage collaboratif par modèle

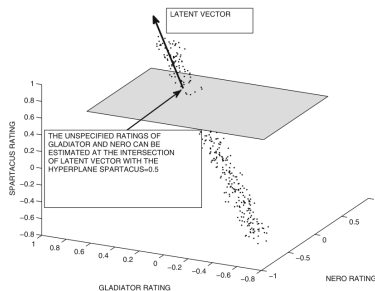
1 – Introduction

2 – Modèles à facteurs latents

Modèles à facteurs latents

- L'idée est de bénéficier du fait que des parties importantes des lignes/colonnes sont grandement corrélées (redondances)
- Pré-supposés :
 - On peut approximer la matrice complète avec une matrice de rang faible
 - Un sous-ensemble d'entrées de la matrice suffit pour obtenir une matrice complète de rang faible
 - Cette matrice de rang faible fournit des estimations robustes des entrées manquantes de la matrice initiale

Intuition géométrique



- Notes corrélées, rang 1 (droite)
- Ici, une seule note (Spartacus 0.5) suffit pour estimer Nero et Gladiator!
- Intersection entre le vecteur latent (droite) et l'hyperplan (parallèle aux axes) tel que Spartacus ait 0.5

- En pratique : on n'a pas besoin de toute la matrice pour estimer les vecteurs latents principaux
- Orthogonalité des vecteurs latents

Principe de la factorisation de matrices

- Une matrice R de rang $k \ll \min(m, n)$ peut toujours être écrite sous la forme :

$$R = UV^T$$

- U est une matrice $m \times k$, V $n \times k$
- Les colonnes de U sont des vecteurs d'une base de l'espace de dim k des colonnes de R
- Une ligne de V contient les coefficients pour combiner ces vecteurs en une colonne de R .
- Il existe un nombre infini de factorisations, correspondants à divers ensembles de vecteurs
- La SVD est un exemple, dans lequel il y a orthogonalité des colonnes/lignes

Un peu d'algèbre linéaire

		NERO	JULIUS CAESAR	CLEOPATRA	SLEEPLESS IN SEATTLE	PRETTY WOMAN	CASABLANCA
HISTORY	1	1	1	1	0	0	0
	2	1	1	1	0	0	0
	3	1	1	1	0	0	0
BOTH	4	1	1	1	1	1	1
	5	-1	-1	-1	1	1	1
ROMANCE	6	-1	-1	1	1	1	1
	7	-1	-1	-1	1	1	1

R

 $\approx$

		HISTORY	ROMANCE
1	1	0	
2	1	0	
3	1	0	
4	1	1	
5	-1	1	
6	-1	1	
7	-1	1	

U

 $\times$

		NERO	JULIUS CAESAR	CLEOPATRA	SLEEPLESS IN SEATTLE	PRETTY WOMAN	CASABLANCA
HISTORY	1	1	1	1	0	0	0
ROMANCE	0	0	1	1	1	1	1

V^T

- les utilisateurs 1-3 aiment les films historiques, neutre sur Romance
- 4 aime les 2 genres
- 4-7 aiment Romance, pas films historiques
- nombreuses corrélations!
- si on multiplie par -1, interprétations plus délicates

Un peu d'algèbre linéaire

- chaque colonne de U est appelée vecteur latent, chaque ligne facteur latent
- la i ème ligne u_i de U est un facteur utilisateur, contenant "l'affinité" de l'utilisateur i pour chacun des k concepts (genres)
- chaque ligne v_j de V est un facteur "item", contenant l'appartenance des films à chaque genre

Apprentissage

- On cherche à résoudre :

$$\text{minimiser } J = \frac{1}{2} \|R - UV^T\|^2$$

- Sans contraintes sur U et V
- "loss" quadratique, diverses SGD peuvent le résoudre
- MAIS : valeurs manquantes!
- Si on pouvait factoriser R en UV^T complètes, on pourrait prédire les entrées manquantes de R :

$$\hat{r}_{ij} = \sum_{s=1}^k u_{is} \cdot v_{js}$$

- l'erreur pour un item est :

$$e_{ij} = r_{ij} - \hat{r}_{ij}$$

- d'où :

$$\text{minimiser } J = \frac{1}{2} \sum_{(i,j) \in S} e_{ij}^2$$

- noter le "seulement sur les valeurs de S"

Calculer : SGD

Algorithm *SGD*(Ratings Matrix: R , Learning Rate: α)

begin

Randomly initialize matrices U and V ;

$S = \{(i, j) : r_{ij} \text{ is observed}\}$;

while not(convergence) **do**

begin

Randomly shuffle observed entries in S ;

for each $(i, j) \in S$ in shuffled order **do**

begin

$e_{ij} \leftarrow r_{ij} - \sum_{s=1}^k u_{is} v_{js}$;

for each $q \in \{1 \dots k\}$ **do** $u_{iq}^+ \leftarrow u_{iq} + \alpha \cdot e_{ij} \cdot v_{jq}$;

for each $q \in \{1 \dots k\}$ **do** $v_{jq}^+ \leftarrow v_{jq} + \alpha \cdot e_{ij} \cdot u_{iq}$;

for each $q \in \{1 \dots k\}$ **do** $u_{iq} = u_{iq}^+$ and $v_{jq} = v_{jq}^+$;

end

Check convergence condition;

end

end

- U et V mises à jour simultanément, convergence plus rapide que batch
- SGD préférable pour données larges et temps de calcul goulet d'étranglement
- $\alpha = 0.005$ (learning rate), peut être adapté à chaque étape
- seuil de convergence à fixer astucieusement, trop d'itérations peuvent dégrader la qualité
- initialisation dans $(-1, 1)$?

Régularisation

- Pénaliser les gros coefficients dans U et V
- Ajout d'un terme $\frac{\lambda}{2} (||U||^2 + ||V||^2), \lambda > 0$

Principe de l'ALS

Alternate Least Squares (Moindre Carrés Alternés)

- plus stable que SGD
- moins sensible à l'initialisation et la taille des pas
- moins efficace que SGD sur grandes données explicites
- version pondérée avec implicit feedback possible

Principe

- U fixé, on traite le problème comme un problème de moindre carrés sur V. On détermine ainsi les k facteurs latents de V. Il faut résoudre n problèmes, mais ils sont indépendants (parallélisation)
- V fixé, on traite le problème comme un problème de moindre carrés sur U. On détermine ainsi les k facteurs latents de U. Il faut résoudre m problèmes, mais ils sont indépendants (parallélisation)

NMF : non-negative Matrix Factorisation

- Outre la SVD, il existe d'autres factorisations, comme la NMF
- même fonction à optimiser, mais contraintes sur U et V :

$$U > 0, V > 0$$

- plus interprétable que d'autres méthodes
- marche bien avec échelles (1-5) mais surtout "like sans dislike" (implicit)

$$u_{ij} \leftarrow \frac{(RV)_{ij}u_{ij}}{(UV^TV)_{ij} + \epsilon} \quad \forall i \in \{1 \dots m\}, \forall j \in \{1 \dots k\}$$
$$v_{ij} \leftarrow \frac{(R^TU)_{ij}v_{ij}}{(VU^TU)_{ij} + \epsilon} \quad \forall i \in \{1 \dots n\}, \forall j \in \{1 \dots k\}$$

- $\epsilon \sim 10^{-9}$
- les valeurs dans U et V sont fixées à celles de la fin de l'itération précédente : mise à jour simultanées
- initialisation avec valeurs faibles dans $[0, 1]$.

Factorisation de matrices : résumé

Method	Constraints	Objective	Advantages/Disadvantages
Unconstrained	No constraints	Frobenius + regularizer	Highest quality solution Good for most matrices Regularization prevents overfitting Poor interpretability
SVD	Orthogonal Basis	Frobenius + regularizer	Good visual interpretability Out-of-sample recommendations Good for dense matrices Poor semantic interpretability Suboptimal in sparse matrices
Max. Margin	No constraints	Hinge loss + margin regularizer	Highest quality solution Resists overfitting Similar to unconstrained Poor interpretability Good for discrete ratings
NMF	Non-negativity	Frobenius + regularizer	Good quality solution High semantic interpretability Loses interpretability with both like/dislike ratings Less overfitting in some cases Best for implicit feedback
PLSA	Non-negativity	Maximum Likelihood + regularizer	Good quality solution High semantic interpretability Probabilistic interpretation Loses interpretability with both like/dislike ratings Less overfitting in some cases Best for implicit feedback

Recommandation par le contenu

Recommandation Content-based

- Situations où l'on dispose de caractéristiques descriptives pour les éléments
- Exemple : genre de films, artistes d'une chanson (parolier, arrangeur, mélodiste, etc.), etc.
- Les seules notes de l'utilisateur suffisent!
- Particulièrement utile pour les éléments nouveaux (peu de notes)
- similarité avec ce que les utilisateurs ont déjà apprécié

Deux sources de données :

- les méta-données
- un profil utilisateur

Étapes

1. Pré-traitement des éléments

- Représentation vectorielle avec mots-clefs
- Très dépendant du domaine
- Poids, structure
- Cf Recherche d'Information (NFE204)
- Feature selection (Gini, χ^2 , entropie)

2. Modélisation des profils

- Combinaison de feedback et d'attributs
- Souvent proches des techniques classiques de classement ou régression
- Pour chaque utilisateur, un modèle est entraîné ("documents étiquetés")
- Nearest-neighbors, Classifieur Bayésien naïf, Règles d'associations, ou régression (linéaire, par ex.)

3. Filtrage / recommandation

Avantages, inconvénients

Avantages

- Les autres ne comptent plus!
- Cold start pour les éléments
- Explications grâce aux caractéristiques des éléments
- Les classifieurs textuels abondent, facilité d'implémentation et d'intégration dans des systèmes existants

Inconvénients

- Sur-spécialisation : enfermement dans des "bulles", absence de nouveauté
- Cold-start utilisateur
- Pour les utilisateurs, il faut un certain nombre de notes pour éviter le sur-apprentissage

Systèmes de recommandation hybrides

Recommandation hybride

- Les systèmes de filtrage par le contenu et de filtrage collaboratif ont des performances avantages et inconvénients divers
- Des sources de données diverses
- Combiner plusieurs systèmes est presque une évidence
- On cherche à compenser les faiblesses d'un système par un autre
- On parle de **systèmes hybrides**

Recommandation hybride

Il y a plusieurs façons de construire des systèmes hybrides :

- L'approche "ensembliste", où on combine les résultats de plusieurs systèmes sans les modifier (un content-based et un CF, par exemple). Utilisée traditionnellement en ML.
- L'approche monolithique, dans laquelle on tente de modifier des algorithmes existants avec des caractéristiques d'autres systèmes (un collaborative filtering avec prise en compte d'attributs)

On peut combiner des systèmes de même type (exemple : plusieurs content-based). Les systèmes ayant gagné le Netflix prize combinaient des approches de voisinage et de facteurs latents.

Recommandation hybride

Il y a également différentes manières de combiner :

- approche "weighted" : pondération des scores données par plusieurs systèmes
- approche "switching" : selon les possibilités et les besoins, on utilise l'un ou l'autre des systèmes de reco mobilisé (exemple : éviter le cold-start, ou choisir le système avec la meilleure accuracy)
- approche cascade : un système de reco raffine les recommandations proposées par un autre (biais dans l'apprentissage), avant une sortie unifiée
- approche "feature augmentation" : les résultats d'un système servent d'entrée (supplémentaire) pour le suivant
- approche meta : le modèle d'un système sert d'entrée à un autre. Exemple : content-based pour améliorer la sélection de voisinage en CF.

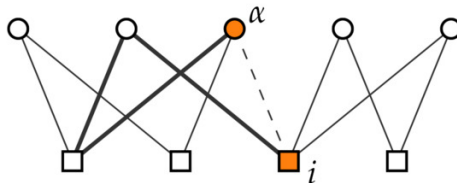
Recommandation sociale

Recommandation sociale

"Social" a de nombreux sens dans le domaine de la recommandation, différents et importants :

- Le contexte social de l'utilisateur :
 - Temps : les recommandations devraient être différentes selon le contexte temporel (heure de la journée, semaine de l'année, jour de la semaine, etc.)
 - Lieu : les recommandations gagnent en précision en tenant compte du lieu (voyage, achats, etc.)
 - Entourage : cinéma (film différent en famille, avec des amis)
- Le "réseau social" :
 - Autorité, importance (PageRank)
 - Prédiction de liens dans un graphe (biparti)
 - Influence
 - Réseau de confiance

Prédiction de liens



- Internet, le Web, et les réseaux sociaux ont donné une structure forte à de nombreuses activités humaines
- faire de la recommandation peut être vu comme "chercher à prévoir les liens **pertinents** pour le réseau... mais pas encore apparus
- dans certains cas, comme Facebook, susciter des liens est même central pour la plateforme

Prédiction de liens

Plusieurs indicateurs peuvent être calculés pour estimer la probabilité qu'un lien apparaisse :

- *Common neighbors* : nombre de voisins en communs

$$CN(i,j) = |N_i \cap N_j|$$

non normalisé (problème des grands degrés)

- Indice Jaccard (normalisé pour les degrés de i et j) :

$$Jacc(i,j) = \frac{|N_i \cap N_j|}{|N_i \cup N_j|}$$

mais dans les voisinages, les degrés peuvent être forts

- Adamic-Adar (version pondérée de CN) :

$$AdamicAdar(i,j) = \sum_{k \in N_i \cap N_j} \frac{1}{\log(N_k)}$$

(base log peu importante)

Prédiction de liens

Quand il y a peu de liens, on peut s'en remettre à des mesures reposant sur les chemins dans le graphe :

- Mesure de centralité (Katz)
- Mesure avec marches aléatoire (personalized PageRank)

On peut aussi approcher la prédiction de liens comme un problème de classification (supervisée) :

- Création d'un dataset avec de features (similarités diverses, degrés, etc.)
- La présence/absence d'un lien est une variable binaire
- Une régression logistique, modifiée pour tenir compte du déséquilibre de classes, peut être utilisée

Enfin, on peut approcher le problème avec de la factorisation de matrices.

Influence

- Dans un réseau d'interactions humaines, le bouche à oreille permet la propagation de messages
- Certains messages se diffusent plus (vite) que d'autres (cascades)
- Analogie avec l'épidémiologie, les réseaux informatiques (diffusion)
- Les facteurs les plus importants pour la diffusion :
 - La centralité de l'acteur
 - La force des liens (amitiés longues, statut social)
- Problème de recherche : *influence propagation models*.
On cherche un ensemble de nœuds S (de taille k) tel que la propagation de l'information soit maximisée dans le réseau (par influence)
 - Modèle à seuil
 - Modèle à propagation unique

Confiance, homophilie

- Utiliser la structure du réseau social "amical" des utilisateurs
- **Homophilie** : les utilisateurs sont généralement connectés à d'autres utilisateurs ayant les mêmes goûts
- Les recommandations de proches sont plus fiables, a priori, que celles de n'importe qui
- Ce "réseau social" n'est pas toujours existant, mais peut aider face au cold-start.
- On peut essayer d'inférer la confiance entre utilisateurs, à partir des liens existants. Il existe des plateformes où l'on demande explicitement aux utilisateurs de dire à quels utilisateurs ils font confiance (Epinions).

La confiance peut permettre de trouver/modifier les peer-groups à partir desquels on calcule les moyennes pour prédire les notes.

Bilan de la recommandation sociale

Avantages

- Amélioration de la qualité des recommandations proposées
- Notamment : les utilisateurs "controversé", ceux qui ne sont pas d'accord avec les autres
- Cold start : si on dispose du réseau social mais pas de notes, on peut proposer des recommandations aux nouveaux utilisateurs
- Résistance aux attaques : la recommandation repose sur des liens "fiables", il est plus dur de piéger le système avec des "faux profils" (Amazon), puisque les faux profils ne sont en général pas liés aux utilisateurs réels.

Inconvénients

- Difficulté d'avoir des données

Évaluation des systèmes de recommandation

Évaluation de systèmes de recommandation

- Méthodes "online" (à chaud)
 - A/B testing (taux de conversion)
 - Complexité dans les grands systèmes
- Méthodes "offline" (à froid)
 - Datasets larges, connus, robustes
- Études utilisateurs (user studies)

Remarques

- Similitude avec l'évaluation de la classification/régression
- Toutefois, aspect "pratique" : multi-facettes
- Il faut un processus clair pour avoir la "bonne" évaluation

Études utilisateurs

- Des sujets d'études sont recrutés, doivent accomplir des tâches précises
- Retours collectés avant et après, et résultat de l'interaction
- Notes, classement, appréciations générales

Avantages

- Divers scénarios / interfaces testables
- Précision du retour

Inconvénients

- Utilisateurs averti que "c'est un test" (biais)
- Difficulté à recruter / tester de nombreux utilisateurs (représentativité de l'échantillon)

Évaluation à chaud

- Avec "les vrais utilisateurs" du système en place
 - Moins de biais (échantillon)
 - Souvent employé pour comparer divers algorithmes
- A/B testing :
 - On prend plusieurs (deux) échantillons de même tailles/profils
 - Chaque algo est testé sur un échantillon
 - Un algo est souvent "une modification de l'ancien" et l'autre algo est "celui en place"

Remarques

- On compare souvent avec un "taux de conversion" (clic sur des articles, par exemple)
- Similitude avec les essais cliniques en médecine (essai randomisé contrôlé, ou randomized controlled trial ou RCT), avec "groupe contrôle"
- La segmentation peut ne pas être stricte (un utilisateur reçoit A ou B aléatoirement)

Évaluation à chaud

Avantages

- Qualité des observations
- Lien avec apprentissage par renforcement et multi-armed bandits (optimisation gloutonne)

Inconvénients

- Il faut en général beaucoup d'utilisateurs dans le système pour que ça marche
- Il faut la main sur le système pour mettre en place les tests
 - Évaluation académique (reproductibilité) limitée
 - Robustesse / généralisabilité réduites (manque de tests)

Évaluation à froid

- On utilise les données compilées sur un système
- Notes, user/item id, horodatage éventuel (peu de détails)
- En général, ça peut devenir un standard (réutilisation académique/industrie) :
 - Netflix Prize
 - MovieLens
 - LastFm, Flixster, etc.

Objectifs de l'évaluation

- Accuracy (justesse, pertinence)
 - métriques de régression, classification : MSE/RMSE
- Coverage (couverture)
 - sparsity
 - peut-être artificiellement réduite (prédiction par défaut)
 - % des utilisateurs/items pour lesquels on peut prédire k éléments
- Nouveauté
 - recommandations non vues avant / non connues
- "Sérendipité" (nouveau ET "moins évident")
- Diversité
 - Listes "un peu" variées (sinon, risque d'échec)
 - Améliore nouveauté et sérendipité
- Robustesse (résister aux attaques)
- Scalabilité (temps de calcul)

Justesse

- MSE

$$MSE = \frac{\sum_{(u,j) \in E} (\hat{r}_{uj} - r_{uj})^2}{|E|}$$

- Plus c'est bas, moins il y a d'erreur, mieux c'est

- RMSE : ramené en terme de notes.

- (R)MSE : pénalisé par grosses erreurs!

- MAE : Mean Absolute Error

$$MAE = \frac{\sum_{(u,j) \in E} |\hat{r}_{uj} - r_{uj}|}{|E|}$$

- Version normalisée entre 0 et 1 (en divisant par $r_{max} - r_{min}$)

Évaluation des classements

- **Corrélation de classements**
 - Pearson
 - Kendall (+1/-1 si même ordre, sommés pour toutes paires d'items pour u)
- **Utilité : corriger l'impact du "bas du classement"**
 - (N)DCG : Discounted Cumulative Gain :

$$DCG = \frac{1}{m} \sum_{u=1}^m \sum_{j \in I_u} \frac{2^{rel_{uj}} - 1}{\log_2(v_j + 1)}$$

rel_{uj} : pertinence (note brute)

- MAP@k (Mean Average Precision) : fraction d'éléments pertinents pour une liste de k éléments pour chaque utilisateur, moyennée
- **AUC : Area Under (Receiver Operating) Curve**
 - évaluations binaires

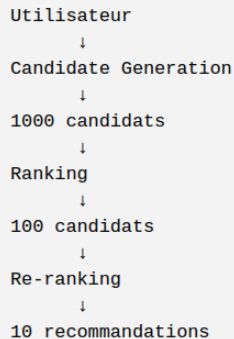
Thématiques avancées

Pourquoi les systèmes historiques ne suffisent plus ?

- Millions d'utilisateurs
- Millions d'items
- Contraintes de latence (<100 ms)
- Flux continu de nouveaux contenus

Peut-on encore calculer une note pour chaque couple utilisateur-item ? Non
Les systèmes modernes reposent sur plusieurs étages.

Architecture générale



- On ne cherche plus le meilleur item parmi 10 millions.
- On cherche d'abord 1000 candidats plausibles.

Candidate Generation

Objectif :

Trouver rapidement quelques centaines ou milliers de candidats.

Exemples :

- nearest neighbors
- embeddings
- factorisation matricielle
- graphes

Contraintes :

- rappel élevé
- latence faible

Ranking

Objectif : Classer précisément les candidats.

Features :

- utilisateur
- item
- contexte
- historique

Modèles :

- Gradient Boosting
- DNN

Re-ranking

Optimisation finale :

- diversité
- nouveauté
- équité
- règles métier

Exemple :

Netflix évite de proposer dix films quasi identiques.

Plan

8 | Thématiques avancées

1 – Reco séquentielle

2 – Embeddings

3 – LLM et recommandation

4 – Enjeux sociétaux

Du profil à la séquence

Vision classique :

- Utilisateur → goûts → recommandation

Vision moderne :

- Item 1
- Item 2
- Item 3
- → prochain item ?

Pourquoi les séquences ?

- Vidéo A
- → Vidéo B
- → Vidéo C
- → ?

Le contexte récent devient essentiel.

Markov Chains

principe :

$$P(i_t | i_{t-1})$$

- Avantages :
 - simple
 - interprétable
- Limites :
 - mémoire courte

RNN et GRU4Rec

Idée : Encoder l'historique entier.

- Applications :
 - e-commerce
 - streaming
- Limites :
 - entraînement difficile
 - parallélisation limitée

Transformers

Idée : Attention sur tout l'historique.

Exemples :

- SASRec
- BERT4Rec

Aujourd'hui : architecture dominante.

Plan

8 | Thématiques avancées

1 – Reco séquentielle

2 – Embeddings

3 – LLM et recommandation

4 – Enjeux sociétaux

Pourquoi les embeddings ?

Problème :

Les identifiants utilisateurs et items n'ont pas de sens géométrique.

Solution :

Apprendre une représentation dense.

Intuition

Film $\rightarrow$ vecteur 64 dimensions

Propriétés :

- proximité
- analogies
- clustering

Embeddings utilisateur-item

Apprendre u, v tels que $\text{score} = u \cdot v$

La factorisation matricielle devient un cas particulier.

Recherche par voisins proches

utilisateur → vecteur → nearest neighbors

Technologies :

- Faiss
- ScaNN
- Annoy

Embeddings multimodaux

Items décrits par :

- texte
- image
- audio
- vidéo

Exemples :

- Spotify
- Pinterest
- TikTok

Plan

8 | Thématiques avancées

1 – Reco séquentielle

2 – Embeddings

3 – LLM et recommandation

4 – Enjeux sociétaux

Pourquoi les LLM changent la donne

Avant :

- clics
- notes
- achats

Maintenant :

- langage naturel

Recommandation conversationnelle

Exemples :

- Je cherche un film comme Interstellar mais plus court.
- Je veux un cadeau pour un adolescent qui aime les mangas.

Le besoin utilisateur devient explicite.

Profil utilisateur à partir du texte

Sources :

- avis
- commentaires
- historique

Extraction automatique :

- goûts
- contraintes
- intentions

Embeddings de texte

Exemple : "science-fiction spatiale"

→ vecteur Puis : requête $\leftrightarrow$ items Dans le même espace latent.

RAG pour la recommandation

requête

↓ retrieval

↓ candidats

↓ LLM

↓ explication

Le LLM ne remplace pas le moteur, il l'orchestre.

Limites des LLM

- hallucinations
- coût
- latence
- personnalisation limitée

Plan

8 | Thématiques avancées

1 – Reco séquentielle

2 – Embeddings

3 – LLM et recommandation

4 – Enjeux sociétaux

Bulles de filtres

Risques :

- homogénéisation
- polarisation

Fairness

Questions :

- exposition des créateurs
- diversité culturelle
- discrimination

Réglementation

Europe :

- RGPD
- DSA
- AI Act

Impact :

- transparence
- auditabilité
- explicabilité

Sujets avancés non traités

- Prise en compte élaborée du temps et du lieu
- Recommandation de groupe
- Résistance aux attaques

Références

Merci

Ce cours repose notamment sur :

- le livre Recommender systems, the textbook, de Charu C. Aggarwal. Springer, 2016.

