

Une approche logistique au transport aérien visant la réduction de la consommation de fuel et donc les émissions de CO₂

Thomas Chaboud^{1,*}, Jean-Loup Farges¹

*thomas.chaboud@onera.fr

Ecole Nationale d'Ingenieurs de Tarbes - salle du Conseil
- 19 Janvier 2024 -



Améliorations des **aéronefs** (aérodynamique, motorisation) et de l'**ATM**, déjà **bien étudiées**

Gisement d'économie pratiquement ignoré au niveau du système :

- **Affectation** et **utilisation des véhicules**, i.e. la « logistique »
- Pour effectuer leur tâche principale, le transport de personnes et de fret

Petite part de cette optimisation réalisée par les compagnies aériennes :

- Privilégient des **logiques internes** (flottes, formation et affectation équipages, fréquences. . .)
- Intérêt pour la réaliser **gloablement** avec un objectif de **faible impact environnemental**

Point de vue socio-économique :

- Service du STA : possibilité offerte à des passagers de se rendre où ils le souhaitent
- Quasi-monopole de l'avion sur des liaisons → **dégradation** de qualité du service (vols plus longs ou fréquences moindres) **relativisable**
- Implique des **efforts importants** de réorganisation de l'industrie

Objectif :

- Evaluer les gains envisageables

Axes principaux d'amélioration logistique :

- taux de **remplissage** de chaque aéronef
- type d'**appareil** utilisé pour chaque mission
- **réglages** de ce type d'appareil pour cette mission :
 - vitesse et altitude de croisière
 - indice de coût

Approche :

- **Modélisation** du problème
- **Optimisation** sur le modèle

- 1 Nombres d'avions par intervalle de temps
- 2 Dates de décollage pour chaque vol

Temps

- N périodes de durée Δ : $[0, \Delta], [\Delta, 2\Delta], \dots [(N-1)\Delta, N\Delta]$
- Rythmes sociaux \rightarrow circulaire

Demande

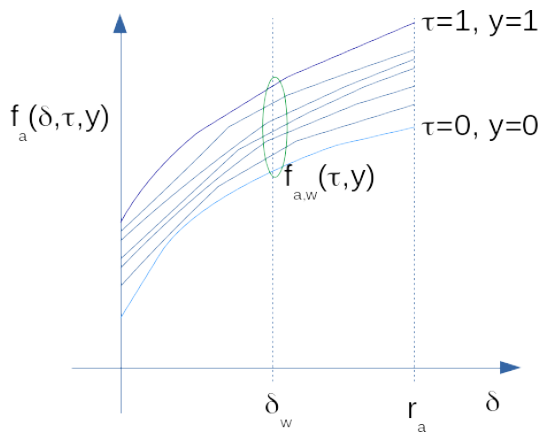
- Aéroports : \mathcal{N} ; Couples origine-destination : $\mathcal{W} \subset \mathcal{N} \times \mathcal{N}$, $w \in \mathcal{W}$
 - origine : $o_w \in \mathcal{N}$; destination : $d_w \in \mathcal{N}$; distance origine \rightarrow destination : δ_w
 - Nombre de passagers désirant se rendre de o_w à d_w durant la période $[t, t + \Delta]$: $D_{w,t}$

Types d'aéronefs : \mathcal{A} , $a \in \mathcal{A}$

- Nombre de passagers pouvant être transportés : c_a
- Distance pouvant être parcourue sans escale : r_a
- Fonctions, pour une distance δ , un taux de remplissage τ et un indice de coût y :
 - Consommation : $f_a(\delta, \tau, y)$ - Temps de vol : $T_a(\delta, \tau, y)$

Capacité aéroportuaire

- Nb. mouvements pouvant être effectués sur l'aéroport n pendant la période $[t, t + \Delta]$: $e_{n,t}$



Pré-calcul de la consommation pour le couple origine destination w et le type d'avion a

Pour chaque couple origine-destination w et chaque période $[t, t + \Delta]$

- Pour chaque type d'appareil a
 - Nombre : $x_{w,t,a}$
 - Réglage de l'indice de coût : $y_{w,t,a} \in [0, 1]$
- Taux de remplissage des aéronefs : $\tau_{w,t}$

- Limite d'autonomie : $\forall w \in \mathcal{W}, \forall t, \forall a \in \mathcal{A} \quad x_{w,t,a} = 0$ si $\delta_w > r_a$
 - types d'avions pouvant desservir w : $\mathcal{A}_w \subset \mathcal{A}$
- Satisfaction de la demande $\forall w \in \mathcal{W}, \forall t \quad \sum_{a \in \mathcal{A}} c_a x_{w,t,a} \geq D_{w,t}$
- Définition taux de remplissage des appareils : $\forall w \in \mathcal{W}, \forall t \quad \tau_{w,t} \sum_{a \in \mathcal{A}} c_a x_{w,t,a} = D_{w,t}$
- Conservation des appareils $\forall n \in \mathcal{N}, \forall t, \forall a \in \mathcal{A} \quad \sum_{w \in \mathcal{W} | d_w = n} x_{w,t,a} = \sum_{w \in \mathcal{W} | o_w = n} x_{w,t,a}$
- Respect de la capacité aéroportuaire : $\forall n \in \mathcal{N}, \forall t \quad \sum_{a \in \mathcal{A}} \sum_{w \in \mathcal{W} | o_w = n \vee d_w = n} x_{w,t,a} \leq e_{n,t}$
 - $\implies \forall w \in \mathcal{W}, \forall t, \forall a \in \mathcal{A} \quad x_{w,t,a} \in \{0, \dots, \min\{\lfloor \frac{e_{o_w,t}}{2} \rfloor, \lfloor \frac{e_{d_w,t}}{2} \rfloor\}\}$
 - borne supérieure pour $x_{w,t,a}$

Minimiser pour tous les aéronefs une pondération α entre :

- consommation de fuel
- temps de vol

$$\min \sum_{w \in \mathcal{W}} \sum_{a \in \mathcal{A}_w} \sum_t x_{w,t,a} (f_a(\delta_w, \tau_{w,t}, y_{w,t,a}) + \alpha T_a(\delta_w, \tau_{w,t}, y_{w,t,a}))$$

Minimiser une pondération β entre :

- la consommation de fuel pour tous les appareils
- le temps de vol de tous les passagers

$$\min \sum_{w \in \mathcal{W}} \sum_{a \in \mathcal{A}_w} \sum_t x_{w,t,a} (f_a(\delta_w, \tau_{w,t}, y_{w,t,a}) + \beta c_a \tau_{w,t} T_a(\delta_w, \tau_{w,t}, y_{w,t,a}))$$

Problème

- Pouvant être **décomposé en problèmes** d'optimisation par période **indépendants**
- Faisant sens que pour Δ relativement **élevé** > 1 jour

Nombre de vols desservant le couple origine-destination $w \in \mathcal{W}$: n_w

Pour chaque vol $i \in \{1, \dots, n_w\}$:

- Date de décollage : $t_{i,w} \in [0, N\Delta[$
- Durée : $T_{i,w}$
- Type d'appareil utilisé : $a_{i,w}$
- Indice de coût utilisé : $y_{i,w} \in [0, 1]$

Pour chaque couple origine-destination $w \in \mathcal{W}$

- Taux de remplissage commun à tous les vols : τ_w

- Autonomie des appareils utilisés : $\forall w \in \mathcal{W}, \forall i \in \{1, \dots, n_w\} \quad a_{i,w} \in \mathcal{A}_w$
- Satisfaction de la demande : $\forall w \in \mathcal{W} \quad \sum_{i=1}^{n_w} c_{a_{i,w}} \geq \sum_t D_{w,t}$
- Définition du taux de remplissage des appareils : $\forall w \in \mathcal{W} \quad \tau_w \sum_{i=1}^{n_w} c_{a_{i,w}} = \sum_t D_{w,t}$
- Conservation des appareils :
 $\forall n \in \mathcal{N}, \forall a \in \mathcal{A} \quad \sum_{w \in \mathcal{W} | d_w = n} \sum_{i=1}^{n_w} \mathbf{I}_{\{i | a_{i,w} = a\}} = \sum_{w \in \mathcal{W} | o_w = n} \sum_{i=1}^{n_w} \mathbf{I}_{\{i | a_{i,w} = a\}}$
 - \mathbf{I} : fonction indicatrice de l'ensemble en indice
- Durée de vol : $T_{i,w} = T_{a_i}(\delta_w, \tau_w, y_{i,w})$
- Respect de la capacité aéroportuaire :
 $\forall n \in \mathcal{N}, \forall t \quad \sum_{w \in \mathcal{W} | d_w = n} \sum_{i=1}^{n_w} \mathbf{I}_{\{i | t_{i,w} + T_{i,w} \equiv z \pmod{N\Delta}, z \in [t, t+\Delta]\}} + \sum_{w \in \mathcal{W} | o_w = n} \sum_{i=1}^{n_w} \mathbf{I}_{\{i | t_{i,w} \in [t, t+\Delta]\}} \leq e_{n,t}$

Minimisation d'une pondération β entre :

- la somme de la consommation de carburant pour tous les vols de tous les couples origine destination
- le temps de service de tous les passagers
 - temps de vol
 - temps d'attente moyen égal au demi intervalle moyen entre avions

$$\min \sum_{w \in \mathcal{W}} \sum_{i=1}^{n_w} f_{a_i}(\delta_w, \tau_w, y_{i,w}) + \beta c_{a_i} \tau_w \left[\frac{1}{2} \frac{N\Delta}{n_w} + T_{i,w} \right]$$

Problème :

- modèle est **relativement compliqué**
 - nombre de variables dépendant de la valeur de certaines variables
 - fait appel à des fonctions indicatrices d'ensemble qui demandent en pratique des tests d'appartenance à ces ensembles
- traduit une **réelle interaction** entre les différents intervalles de temps

Contraintes :

$$\forall w \in \mathcal{W}, \forall a \in \mathcal{A} \quad x_{w,t,a} = 0 \text{ si } \delta_w > r_a$$

$$\forall w \in \mathcal{W} \quad \sum_{a \in \mathcal{A}} c_a x_{w,t,a} \geq D_{w,t}$$

$$\forall w \in \mathcal{W} \quad \tau_{w,t} \sum_{a \in \mathcal{A}} c_a x_{w,t,a} = D_{w,t}$$

$$\forall n \in \mathcal{N}, \forall a \in \mathcal{A} \quad \sum_{w \in \mathcal{W} | d_w = n} x_{w,t,a} = \sum_{w \in \mathcal{W} | o_w = n} x_{w,t,a}$$

$$\forall n \in \mathcal{N} \quad \sum_{a \in \mathcal{A}} \sum_{w \in \mathcal{W} | o_w = n \vee d_w = n} x_{w,t,a} \leq e_{n,t}$$

$$\forall w \in \mathcal{W}, \forall a \in \mathcal{A} \quad y_{w,t,a} \in [0, 1]$$

Critère :

$$\min_{\mathbf{x}_t, \mathbf{y}_t} \sum_{w \in \mathcal{W}} \sum_{a \in \mathcal{A}_w} x_{w,t,a} (f_a(\delta_w, \tau_{w,t}, y_{w,t,a}) + \alpha T_a(\delta_w, \tau_{w,t}, y_{w,t,a}))$$

$\mathbf{x}_t, \mathbf{y}_t$ concatenation des $x_{w,t,a}, y_{w,t,a}$

Les contraintes sauf la dernière concernent uniquement les variables \mathbf{x}_t et $\tau_{w,t}$
 \mathbf{x}_t et $\tau_{w,t}$ fixées \rightarrow optimisations des variables \mathbf{y}_t indépendantes :

$$\min_{\mathbf{x}_t} \sum_{w \in \mathcal{W}} \sum_{a \in \mathcal{A}_w} \min_{y_{w,t,a}} x_{w,t,a} (f_a(\delta_w, \tau_{w,t}, y_{w,t,a}) + \alpha T_a(\delta_w, \tau_{w,t}, y_{w,t,a}))$$

Pour $x_{w,t,a}^*$, $\tau_{w,t}^*$ admissibles $y_{w,t,a}$ donné par :

$$\min_{y_{w,t,a} \in [0,1]} x_{w,t,a}^* (f_a(\delta_w, \tau_{w,t}^*, y_{w,t,a}) + \alpha T_a(\delta_w, \tau_{w,t}^*, y_{w,t,a}))$$

Simple problème monovariante :

- Exploration systématique de l'intervalle, dichotomie, méthode du nombre d'or...
- $x_{w,t,a}^* = 0 \implies \forall y_{w,t,a} \in [0, 1]$ critère = 0

- Chercher des solutions admissibles
- Pour chaque solution admissible $C = 0$, itérer sur w :
 - si $\exists a : x_{w,t,a}^* \neq 0$:
 - $\tau_{w,t}^* = \frac{D_{w,t}}{\sum_{a \in A} c_a x_{w,t,a}^*}$
 - calcul des $y_{w,t,a}^*$ correspondants par optimisation indépendante
 - ajout à C du critère relatif à w
 - Si $C <$ meilleur coût jusqu'à présent, meilleur coût jusqu'à présent $\leftarrow C$

Recherche de solutions admissibles :

- programmation par contraintes
- programmation en nombres entiers
- méthodes arborescentes
- méthodes heuristiques \rightarrow [méthode Tabou](#)

Basée sur l'association d'une **fonction de pénalisation** à chaque contrainte :

$$p_1(\mathbf{x}_t) = \sum_{w \in \mathcal{W}} \sum_{a \in \mathcal{A} : \delta_w > r_a} x_{w,t,a}$$

$$p_2(\mathbf{x}_t) = \sum_{w \in \mathcal{W}} \max\{D_{w,t} - \sum_{a \in \mathcal{A}} c_a x_{w,t,a}, 0\}$$

$$p_3(\mathbf{x}_t) = \sum_{n \in \mathcal{N}} \sum_{a \in \mathcal{A}} \left| \sum_{w \in \mathcal{W} | d_w = n} x_{w,t,a} - \sum_{w \in \mathcal{W} | o_w = n} x_{w,t,a} \right|$$

$$p_4(\mathbf{x}_t) = \sum_{n \in \mathcal{N}} \max\left\{ \sum_{a \in \mathcal{A}} \sum_{w \in \mathcal{W} | o_w = n \vee d_w = n} x_{w,t,a} - e_{n,t}, 0 \right\}$$

Comparaison de \mathbf{x}_t avec \mathbf{x}'_t :

- i le plus petit indice / $p_i(\mathbf{x}_t) \neq p_i(\mathbf{x}'_t)$
- si $p_i(\mathbf{x}_t) < p_i(\mathbf{x}'_t)$ \mathbf{x}_t meilleure que \mathbf{x}'_t , sinon \mathbf{x}'_t meilleure que \mathbf{x}_t

Ordre des fonctions de pénalisation **arbitraire** mais **influe** la recherche de solutions

Voisin de la solution courante :

- solution dont un seul des $x_{w,t,a}$ est différent de celui de la solution courante
- valeur absolue de la différence égale à un
- respect du domaine de variation de $x_{w,t,a}$

Au plus $2|\mathcal{W}||\mathcal{A}|$ voisins

Types de tabou :

- sur les changements, pour un certain nombre d'itérations il est interdit de faire le changement inverse d'un changement déjà effectué et
- sur les solutions, pour un certain nombre d'itérations il est interdit d'avoir comme solution courante une solution déjà considérée.

⇒ des solutions du voisinage pas considérées pour le choix de la solution courante suivante

La solution initiale :

- tous $x_{w,t,a} = 0$ à l'intérieur du domaine de variation
- pratique courante

Traitement d'un nombre restreint de couples origine-destination

Ordre de grandeur des quantités dimensionnant le problème **élevé** :

- $|\mathcal{N}| \approx 4\,000$ à niveau mondial et 250 à niveau Européen
- $|\mathcal{W}| \approx 10\,000$ pour l'Europe

→ réaliser l'optimisation sur une **sous-zone du monde** :

- ne considérer qu'une **portion de la capacité** aéroportuaire réelle dans le modèle de sous-zone

Expérimentations numériques sur un exemple jouet

Présentation de l'exemple - Une journée typique entre Toulouse Blagnac (LFBO) et Paris Orly (LFPO)

Créneau horaire	LFBO → LFPO	LFPO → LFBO
0	-	-
1	-	-
2	-	-
3	-	-
4	-	-
5	-	-
6	AF6101, AF6103	-
7	AF6105, AF6107	AF6102
8	-	AF6104
9	AF6111	AF6108
10	AF6113	AF6112
11	AF6117	-
12	AF6121	AF6116
13	-	-
14	AF6125	AF6122
15	-	AF6124, EC4847
16	AF6131	AF6126, AF6128
17	AF6133, EC4848	-
18	AF6135, AF6137	AF6132, AF6134
19	-	AF6136, EC4851
20	AF6141, AF6143, EC4852	AF6138, AF6140
21	AF6145	AF6142, AF6144
22	-	-
23	-	-

Modèles :

$$f_a(\delta, \tau) = f_{a,0} + f_{a,\delta}\delta + f_{a,\tau}\tau$$

$$T_a(\delta, \tau) = T_{a,0} + T_{a,\delta}\delta + T_{a,\tau}\tau$$

Paramètres :

Type d'avion	A318	A319	A320
c_a (passagers)	132	156	176
r_a (m)	5750000	6940000	6150000
$f_{a,0}$ (kg)	121.7	130.1	139.9
$f_{a,\delta}$ (kg/m)	0.0030	0.0044	0.0036
$f_{a,\tau}$ (kg)	0.2	0.2	0.2
$T_{a,0}$ (s)	1200	1200	1200
$T_{a,\delta}$ (s/m)	0.0038	0.0038	0.0038
$T_{a,\tau}$ (s)	0.2	0.2	0.2
i_a	0.04	0.04	0.04

Demande :

- $\delta_w = 584940$ passagers dans chaque sens

Capacité :

- Aéroports fermés, donc de capacité nulle, de 0h à 5h59 et de 23h à 23h59.
- Pendant leur heures d'ouvertures capacités :
 - Constantes
 - LFPO : 70 avions par heure
 - LFBO : 30 avions par heure
- Partie des capacités dédiées au trafic de l'exemple :
 - LFPO : 3 avions par heure ; 4,3% de la capacité totale
 - LFBO : 4 avions par heure ; 13,3% de la capacité totale

$N = 24$ et $\Delta = 3600 \rightarrow$ **problèmes d'admissibilité** de la situation actuelle :

- Equilibre entre avions entrants et sortants rarement assuré
- Dépassement de la capacité allouée

$N = 2$ et $\Delta = 3600 * 12 \rightarrow$ **moins problème** d'admissibilité de la situation actuelle :

- Pas d'équilibre
- Capacité allouée respectée

$N = 1$ et $\Delta = 3600 * 24 \rightarrow$ **aucun problème** d'admissibilité :

- Il y a 18 vols qui atterissent à LFBO et 18 vols qui en décollent.
- 36 mouvements à LFPO pour une capacité de 51

Illustre l'analyse qualitative du modèle

Contrainte de conservation des appareils : correspond à une réalité pour une longueur d'intervalles de temps $>$ journée

Difficile de se faire une **idée précise de la solution actuelle** :

- appareils utilisés peuvent varier d'un jour à l'autre
- réglage des indices de coût peut varier d'un vol à l'autre

→ hypothèses

6 A318, 6 A319 et 6 A320 dans chaque sens :

- demande pas satisfaite

9 A319 et 9 A320 dans chaque sens :

- demande satisfaite
- consommation de fuel entre 89 099 kg et 92 662 kg suivant réglage des indices de coût

Méthode tabou pour 100 000 itérations

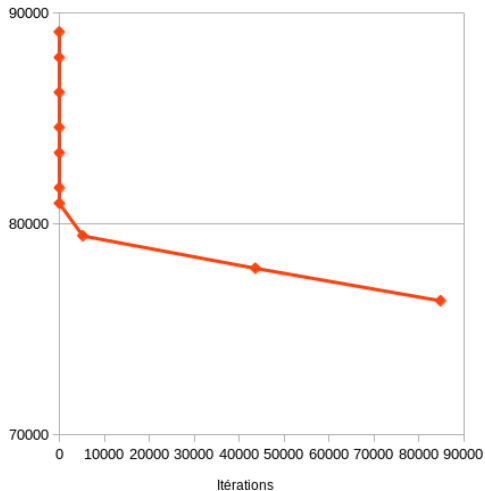
Longueur de liste taboue de 100 000

Variations :

- le type de tabou, soit état soit mouvement ;
- l'ordre dans lequel sont considérés les critères, soit $p_1 \gg p_2 \gg p_3 \gg p_4$ soit $p_1 \gg p_4 \gg p_3 \gg p_2$;
- la solution initiale, soit la solution actuelle soit une solution non admissible consistant à fixer tous les nombres d'avions à 0.

Expérimentations numériques sur un exemple jouet

Optimisation de la consommation - Tabou état ; initialisation solution actuelle ; ordre critères 1 » 2 » 3 » 4

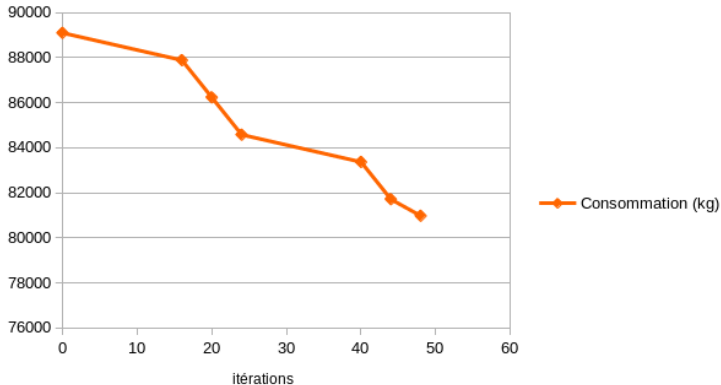


Consommation (kg)

→ 17 A320 dans chaque sens
Réglage des indices de coût 0.0

Expérimentations numériques sur un exemple jouet

Optimisation de la consommation - Tabou état ; initialisation solution actuelle ; ordre critères 1 » 4 » 3 » 2

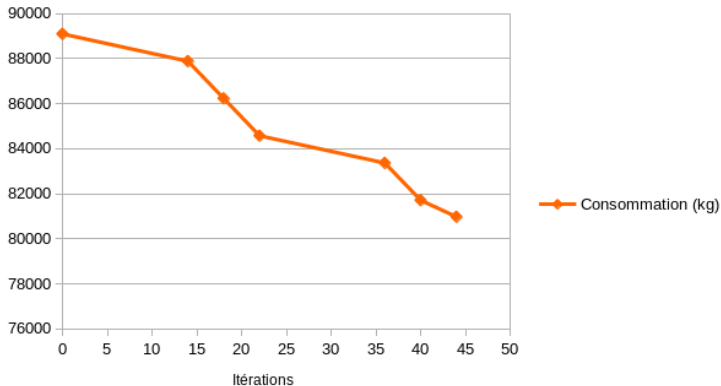


→12 A318 et 8 A320 dans chaque sens

Plus de voisins admissibles après un certain nombre d'itérations

Expérimentations numériques sur un exemple jouet

Optimisation de la consommation - Tabou mouvement ; initialisation solution actuelle ; \forall ordre critères



→ 12 A318 et 8 A320 dans chaque sens

Plus de voisins admissibles après un certain nombre d'itérations

Il vaut mieux :

- Initialiser l'algorithme par la solution **non admissible** plutôt que de la solution **actuelle**
- Ordonner les critères d'écart $p_1 \gg p_2 \gg p_3 \gg p_4$ plutôt que $p_1 \gg p_4 \gg p_3 \gg p_2$
- Utiliser un tabou sur l'**état** plutôt que sur le **mouvement**

Conclusion à pondérer par la taille réduite de l'exemple

Problèmes d'absence de voisins → valeur plus faible pour la longueur de la liste tabouée

Tabou	Initialisation	Ordre critères	Consommation (kg)	Itérations	Plus de voisins
État	0	1234	76 360	34	non
État	0	1432	76 360	34	oui
État	actuelle	1234	76 360	84 854	non
État	actuelle	1432	80 975	48	oui
Mouvement	0	1234	76 360	34	oui
Mouvement	0	1432	76 360	34	oui
Mouvement	actuelle	1234	80 975	44	oui
Mouvement	actuelle	1432	80 975	44	oui

Contribution :

- Développement de **deux modèles** : nombre d'avions et dates de décollage
- Développement d'une méthode d'**optimisation** pour le **premier modèle**
- **Démonstration** de l'optimisation pour le premier modèle **sur un exemple jouet**

Perspectives :

- Utiliser la **Base de données** de vols déposés de l'*Official Aviation Guide* pour construire des exemples réalistes et pertinents
- **Définir des fonctions** réalistes pour l'impact environnemental et temps de vol à partir d'un **grand nombre** de **simulations individuelles**
 - Tables ou réseaux de neurones
- Développer une méthode d'**optimisation** pour le modèle sur les **dates de décollage**
- Tirer des conclusions sur la **possible réduction** de la **consommation** de ressources et de l'**impact climatique** du trafic aérien