

Ingénieur Mathématiques Appliquées et Calcul scientifique
MACS 3

RAPPORT DE STAGE DE FIN D'ÉTUDES

****RAPPORT CONFIDENTIEL****

Gestion d'un parc de véhicules électriques : Planification optimale de la recharge de véhicules électriques

Stagiaire : Rihab HAJRI

Maître de stage : Mr Philippe PREVOST
Tuteur universitaire : Mr Emmanuel AUDUSSE

Lieu de stage :

LEGRAND FRANCE
128 avenue du Maréchal de Lattre de Tassigny
87045 LIMOGES

Année 2017-2018

Remerciements

Je tiens à remercier sincèrement mon maître de stage, M. Philippe PREVOST, de m'avoir donné l'opportunité de réaliser ce stage et de m'avoir accueilli au sein de Legrand et surtout pour son aide et le temps qu'il m'a consacré tout au long de cette période pour répondre à toutes mes interrogations.

Je remercie également toute l'équipe du service Direction Innovation et Systèmes et les autres stagiaires pour leur accueil et leur bienveillance qui ont facilité mon intégration.

Je tiens enfin à remercier, toute l'équipe pédagogique de l'école d'ingénieur Sup Galilée, et les professeurs pour l'enseignement qu'ils m'ont fourni durant ces années d'études.

Table des matières

Introduction	5
1. Présentation de l'entreprise	
1.1 Histoire de Legrand	6
1.2 Legrand de nos jours	
1.3 Service Innovation et Systèmes	
1.4 Contexte du stage	
1.3 Objectif du stage	
2. Description du problème	
3. Architecture logicielle	10
4. Algorithme de charge	13
4.1 Idée de l'algorithme	
4.2 Les différentes étapes de l'algorithme	
4.3 Algorigramme de charge	
4.4 Codage de l'algorithme	
5. Algorithme de réservation	
5.1 Description de l'algorithme	23
5.2 Critère de choix de véhicule	
6. Algorithme dynamique	24
7. Résultats et tests	27
8. Points à améliorer dans l'algorithme	33
9. Conclusion	38
10. Bibliographie	39

INTRODUCTION

Face aux différents défis environnementaux auxquels est confronté le monde aujourd'hui, les innovations environnementales deviennent un de plus grand enjeu des entreprises et au cœur des stratégies de développement des plusieurs entreprises.

Dans le secteur automobile, les véhicules électriques deviennent un enjeu primordial et commence à faire une place sur le marché. Avec près de 3.1 millions de voitures électriques en circulation dans le monde en 2017, le marché de véhicule électrique continue à progresser. Les ventes de véhicules électriques particuliers affichent une augmentation de 29.9% en avril 2018 par rapport à la même période l'an dernier [1] et on estime qu'en 2030, 21 millions de voitures électriques seront vendus dans le monde.

Le recours aux véhicules électriques présente une solution d'avenir pour lutter contre les problèmes environnementaux et contribuer à la réussite de la transition énergétique. En effet, l'utilisation des véhicules électriques aide à réduire les émissions de gaz à effet de serre et les polluants de l'air et par conséquent lutter contre le réchauffement climatique et améliorer la qualité de l'air en ville.

Cependant, l'autonomie réduite et la recharge de batterie restent les principaux problèmes des véhicules électriques. Le temps de charge d'un véhicule électrique peut durer 30 minutes avec un chargeur rapide et jusqu'à 8 heures sur une prise domestique. Alors que les constructeurs redoublent leurs efforts pour augmenter l'autonomie et le temps de charge des véhicules électriques en proposant des bornes, des prises de charge et des batteries avec des technologies innovantes, un des problèmes de recharge des véhicules électriques réside dans l'impact qu'elle peut avoir sur le réseau électrique. En effet, si aujourd'hui le développement des véhicules électriques n'a pas encore un impact important sur la consommation d'électricité, l'utilisation massive des véhicules électriques dans quelques années plus tard entraînera des forts pics de consommation électrique.

Cela nécessite donc de développer des nouveaux outils et des systèmes de gestion intelligente de recharge des véhicules électriques qui permet de minimiser l'impact sur le réseau électrique et de réduire le coût financier de la recharge.

1. Présentation de l'entreprise

1.1 Histoire de Legrand

À l'origine l'entreprise était un simple atelier de Porcelaine créé en 1865 par Henri Barjoud de Lafond et Léonard Clidasson, à Limoges, ensuite l'affaire a été reprise par Frédéric Legrand, Charles Alary et Jean Joquel et la société Legrand est fondée en 1904.

En 1919, la société élargit son activité et crée une branche « Appareillage électrique » en s'associant avec Jean Mondotet, artisan de Limoges qui avait monté à Exideuil une petite usine d'interrupteurs utilisant du buis et de la porcelaine. Au fil du temps, la conception et la cuisson des pièces se professionnalisent et des fours dédiés à la fabrication de pièces isolantes pour l'électricité sont construits. Et en 1938, l'usine dispose du premier four-tunnel de Limoges, fonctionnant au gaz de ville et destiné à la cuisson de la porcelaine électrotechnique.

Après un sinistre qui a eu lieu le 25 août 1949, la société change de stratégie et concentre ses activités sur la seule production d'appareillage électrique d'installation.

À partir des années 1960, l'entreprise va commencer à s'implanter à l'étranger, d'abord en Europe, puis rapidement au Brésil et aux Etats-Unis. Elle est introduite à la Bourse de Paris en 1970.

Le groupe a progressivement développé ses produits pour devenir aujourd'hui spécialiste mondial des infrastructures électriques et numériques du bâtiment.



Logo présent sur la façade de Legrand en 1955



Siège social Legrand Limoges

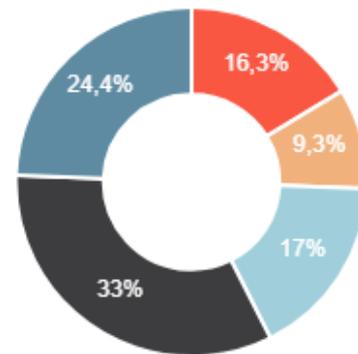
1.2 Legrand de nos jours

Aujourd'hui, Legrand est devenu Leader mondial des infrastructures électriques et numériques du bâtiment. Il développe des solutions et des produits innovants pour les bâtiments tertiaires, résidentiels et industriels. Son offre regroupe une large gamme de produits répartis en 7 grandes catégories : des interfaces utilisateurs, des solutions de distribution d'énergie, des offres de cheminement de câble, des UPS (Alimentation sans interruption), des systèmes de gestion du bâtiment, des infrastructures numériques et des composants d'installation. Chaque catégorie est gérée par une Strategic Business Unit (SBU) au sein de l'entreprise.

Le groupe est présent aujourd'hui sur 90 pays sur les 5 continents.



France Italie Reste de l'Europe
Amérique du Nord et Centrale Reste du monde



Chiffre d'affaires 2017 par zone géographique

Avec un chiffre d'affaires de 5.5 Mds € en 2017, le groupe continue sa stratégie de développement qui se base sur l'innovation continue. ça se traduit par le lancement de nouveaux produits à plus forte valeurs d'usage et l'accélération des initiatives liées aux nouvelles technologies, notamment le programme Eliot qui vise à accélérer le développement des solutions et des infrastructures connectées pour le bâtiment dans le but d'apporter plus de confort, d'esthétique et de sécurité, ainsi que d'autonomie pour les personnes âgées et les personnes handicapées. En 2017, le groupe compte déjà plus de 30 familles de produits connectés et consacre 4.8% du chiffre d'affaires à la R&D.

Pour continuer sa croissance et renforcer ses parts de marché, Legrand s'appuie également sur une stratégie d'acquisitions ciblées visant essentiellement des entreprises des petites et moyennes tailles, complémentaires de l'activité de groupe. Depuis 1954, Legrand a réalisé l'acquisition de 164 sociétés dont l'acquisition de Milestone AV Technologies en 2017 et qui représente la plus importante acquisition réalisée par le groupe.

Quelques exemples d'innovations récentes développées par Legrand :



1.3 Service Innovation et Systèmes

J'ai effectué mon stage au sein service Direction Innovation et Systèmes. Ce service a pour but de promouvoir et développer l'innovation qui est au cœur de la stratégie de croissance de l'entreprise.

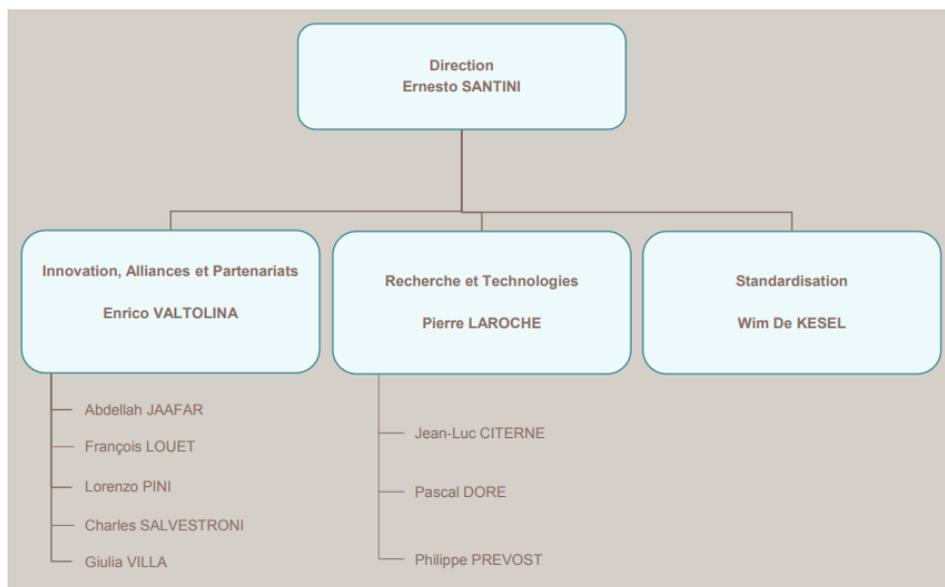
Le service travaille actuellement sur de nombreux domaines comme les infrastructures numériques, les systèmes résidentiels et l'assistance à l'autonomie. Il développe également des solutions pour optimiser l'efficacité énergétique des bâtiments et aider les utilisateurs à mieux gérer et réduire la consommation d'énergie.

Il est divisé en 3 pôles :

- Innovation, Alliances et Partenariats
- Recherche et Technologies
- Standardisation

Mon stage s'est déroulé dans le pôle Recherche et Technologies sous la direction de Mr Philippe Prévost, responsable support/ recherche technologique. Ce pôle est constitué de 4 membres :

- M. Pierre Laroche : Directeur Recherche et Technologies (R&D)
- M. Philippe Prévost : responsable support/ recherche technologique
- M. Pascal Dore : responsable support/recherche technologique
- M. Jean Luc Citerne : expert efficacité énergétique et développement durable.



Organigramme Direction Innovation et Systèmes

1.4 Contexte du stage

Le nombre de véhicules électriques va fortement augmenter dans les années à venir et cela nécessite un développement important des infrastructures de recharge. Afin de favoriser le déploiement des infrastructures de recharge des voitures électriques, la loi sur la transition énergétique oblige les entreprises à équiper une partie de leurs parkings d'infrastructures pour la recharge de véhicules électriques. Jusqu'à 2016, cette obligation concernait les « *bâtiments neufs à usage tertiaire, équipés d'un parc de stationnement bâti clos et couvert d'accès réservé aux salariés* »^[2]. Mais depuis 2017, l'obligation est étendue à tous les bâtiments neufs à usage principal tertiaire, bureaux, bâtiments industriels, bâtiments accueillant un service public ainsi que les ensembles commerciaux et les cinémas. Et elle s'applique à tous les parkings, qu'ils soient clos et couverts ou non. Avec cette loi, l'objectif est l'installation de 7 millions de points de charge d'ici 2030.

Ainsi, avec la montée en puissance des flottes de véhicules électriques, des systèmes de gestion efficace d'une flotte de véhicules électriques doivent être mis en place pour organiser les déplacements, garantir la disponibilité des véhicules et assurer la recharge avec une gestion optimale d'énergie.

Dans le cadre de ses projets efficacité énergétique, Legrand développe des solutions pour la recharge des véhicules électriques avec une gestion intelligente de l'énergie qui permet de réduire la consommation d'énergie et l'impact des véhicules électriques sur le réseau électrique.

1.5 Objectif du stage

Le but de mon stage est de développer et tester sous Matlab un algorithme pour l'optimisation de la recharge des véhicules électriques, Cet algorithme est en lien avec un système de réservation qui permet la gestion d'un parc des véhicules électriques. L'objectif de l'algorithme de charge est de générer pour chaque véhicule un planning de charge optimal qui respecte les différentes contraintes imposées et qui permet de satisfaire au mieux les demandes des usagers et minimiser le coût financier de la recharge des véhicules électriques.

2. Description du problème

Un parc de véhicules électriques est équipé de N véhicules électriques et N bornes de charge dédiées. Chaque borne de charge permet de charger un véhicule à une puissance de charge fixe P .

Une puissance maximale P_{max} est allouée à l'ensemble des bornes. L'abonnement électrique d'un bâtiment étant lié à sa puissance, l'objectif pour Legrand est de permettre une recharge d'un maximum de véhicules électriques avec une puissance d'abonnement minimale, d'où la nécessité d'un système de gestion de charges.

Chaque véhicule est caractérisé par sa puissance de charge (kw) et sa capacité de batterie (kWh). Chaque véhicule est associé à un planning de réservation et doit assurer un ensemble des déplacements sur une période de temps donnée. Donc, afin de garantir l'autonomie de chaque véhicule pendant tout le trajet, il faut les recharger avant chaque déplacement pour fournir la quantité d'énergie nécessaire. Mais, la recharge de tous les véhicules en même temps n'est pas possible car on est limité par la puissance maximale souscrite. Par conséquent, une planification optimale de la recharge est nécessaire.

Chaque réservation est caractérisée par :

- Une date de début et une date de fin notés respectivement HD et HF
- L'énergie nécessaire E pour assurer la réservation, calculée en fonction de la distance parcourue pendant le déplacement

Deux contraintes sont à prendre en compte pour la recharge des véhicules électriques :

- La disponibilité : le véhicule ne peut pas être rechargé s'il n'est pas présent sur le parking.
- La puissance totale utilisée pour charger les véhicules présents sur le parking ne doit pas dépasser la puissance maximale souscrite

On suppose qu'on s'occupe de gérer les réservations et la recharge des véhicules électriques sur une période de temps notée $[0, T]$.

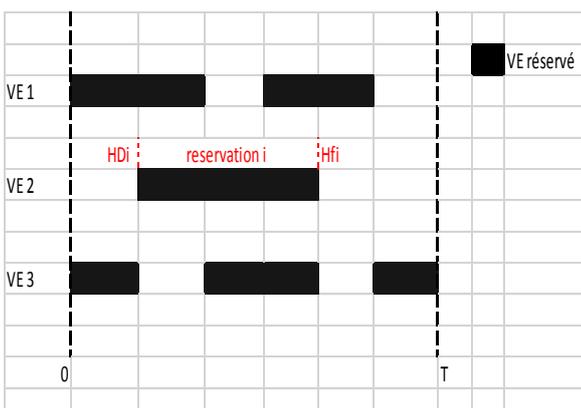
Cette période est discrétisée en intervalles de pas constant Δt (Par défaut 15 minutes). Le pas de temps est un paramètre réglable par l'administrateur. Cela impose de choisir les dates des réservations en fonction de pas de temps (par exemple, si $\Delta t = 30 \text{ minutes}$ les réservations ne peuvent commencer qu'à des heures pleines ou des demi-heures) ainsi que les dates de début de charge.

Un véhicule électrique qui se charge à une puissance P pendant l'intervalle de temps Δt stocke une quantité d'énergie égale à $\Delta t \times P$.

On représente les données par différents tableaux :

Table de réservation

Ce tableau décrit pour chaque véhicule les périodes de temps ou il est réservé



Δt	1	2	3	4	5	6	7	8	9	n									
VE1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
VE2	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
VE3	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1

Sur chaque intervalle de temps Δt :

- La valeur 1 indique que le véhicule est réservé
- La valeur 0 signifie que le véhicule est disponible (présent sur le parking)

Table de Puissance maximale souscrite et énergie disponible

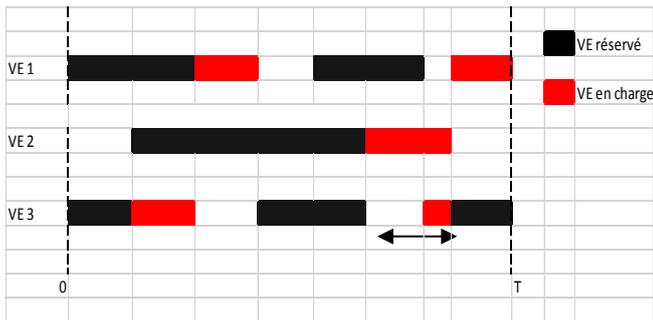
Le premier tableau indique la puissance maximale souscrite sur chaque intervalle du temps et dans le deuxième tableau, on trouve l'énergie disponible.



Pmax =	3	3	3	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	3	3	3	3	3
E =	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5

Table état de charge

Ce tableau décrit pour chaque véhicule, les périodes de temps où il est en charge



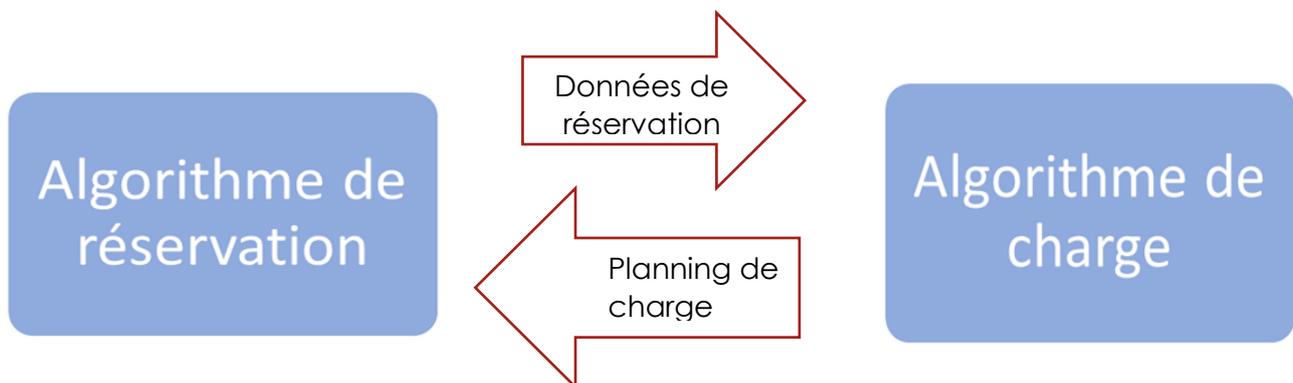
Etat_charge =																			
VE1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1
VE2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
VE3	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0

Le véhicule est en charge pendant un intervalle Δt si $EtatCharge_{ij} = 1$.

Sinon $EtatCharge_{ij} = 0$

3. Architecture logicielle

Le système de gestion de flotte de véhicules électriques est composé de deux algorithmes : l'algorithme de réservation et l'algorithme de charge. L'algorithme de charge dépend des informations envoyées par le système de réservation des véhicules et lui envoie le planning de charge généré.



À chaque nouvelle demande par le client, le système de réservation reçoit une nouvelle demande de réservation qui comprend : les dates de début et de la fin de la réservation souhaité et le nombre de kilomètres estimé. L'algorithme de réservation rajoute une marge en temps pour l'heure de retour de véhicule et une marge en km pour la distance parcourue (la marge est définie par l'administrateur) et calcule l'énergie nécessaire pour assurer l'autonomie de véhicule durant le déplacement. Cette marge de temps et d'énergie est nécessaire pour prendre en compte l'incertitude sur l'heure de retour et sur les kilomètres car au retour, le véhicule n'indique pas le nombre de kilomètres exact parcouru.

Ensuite, il génère une liste des véhicules disponibles pour la réservation demandée et envoie les informations suivantes comme entrée pour l'algorithme de charge :

- les détails de la réservation souhaitée : date de début et de fin de la réservation, charge nécessaire pour le déplacement.
- le dernier planning de réservation
- La liste des véhicules disponibles pour la nouvelle réservation demandée.

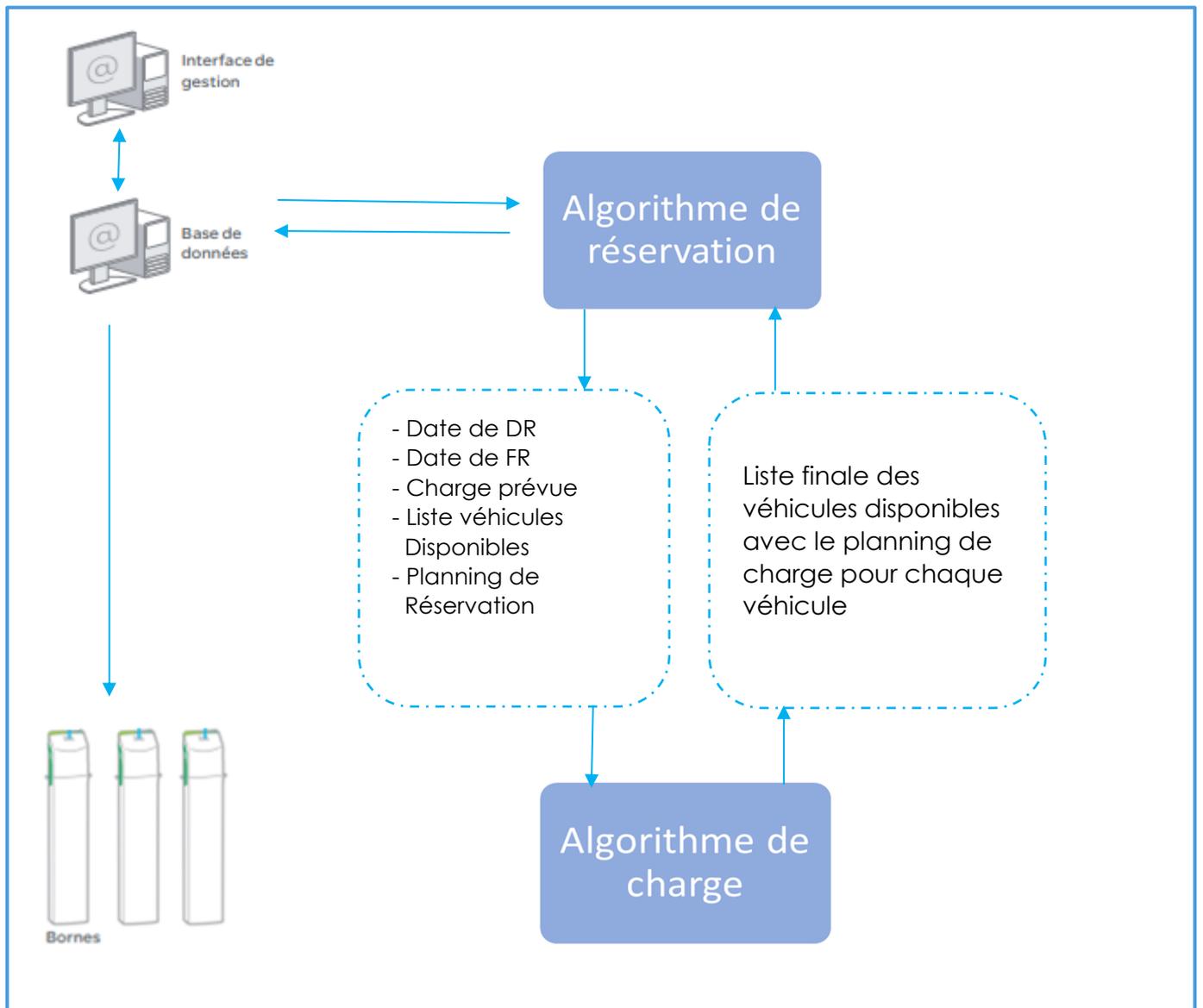
L'algorithme de charge recherche pour chaque véhicule i dans la liste des véhicules disponibles le planning de charge optimal.

Si aucun planning de charge n'existe pour assurer la recharge de tous les véhicules, le véhicule i est éliminé de la liste sinon le véhicule est sauvegardé avec un nouveau planning de charge.

Enfin, la liste finale des véhicules disponibles et le planning de charge associé à chaque véhicule de la liste sont renvoyés vers l'algorithme de réservation.

Dans ce cas trois possibilités se présentent :

- La liste est vide, dans ce cas aucun véhicule électrique n'est disponible pour la réservation et le système prévient l'administrateur
- Un seul véhicule est disponible, l'algorithme de réservation valide la réservation et envoie un nouveau planning de réservation de ce véhicule et le nouveau planning de charge généré par l'algorithme de charge
- Plusieurs véhicules sont disponibles. Dans ce cas, l'algorithme de réservation peut choisir le véhicule en fonction de ses critères propres (âge de véhicule, km cumulé du véhicule...) ou d'autres comme le stress engendré par les réservations sur les véhicules (critère détaillé par la suite) et retourne un nouveau planning de réservation de ce véhicule ainsi que le planning de charge correspondant.



Système de gestion d'un parc de véhicules électriques

4. Algorithme de charge

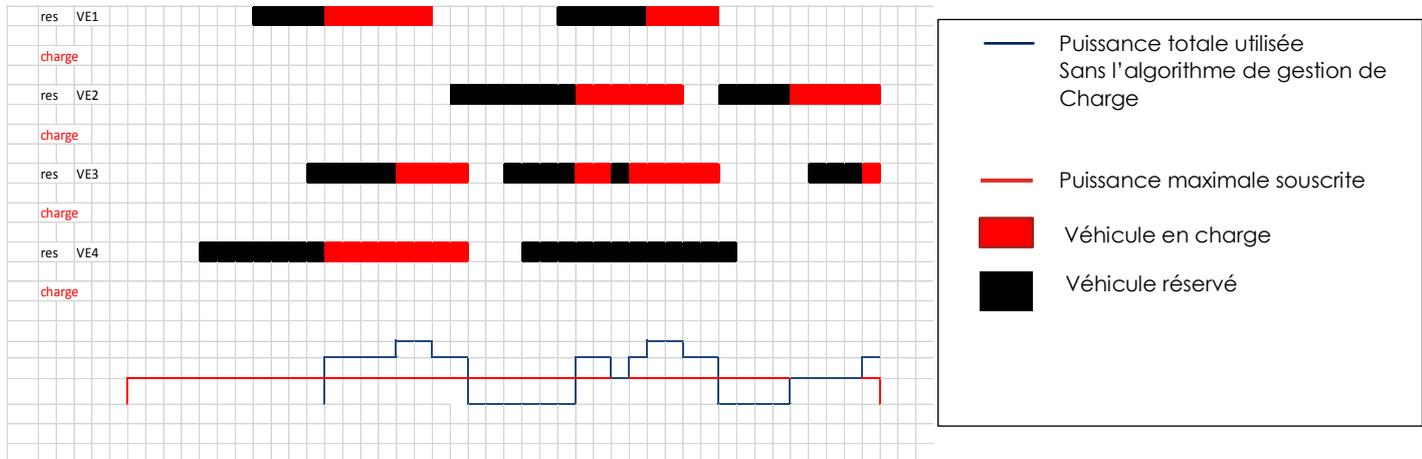
La première étape consiste à programmer et tester l'algorithme de charge sans prendre en compte l'algorithme de réservation. Ensuite, j'explique le lien entre l'algorithme de charge et de réservation. Et après l'implémentation de deux algorithmes et la vérification des résultats, je modifie l'algorithme pour qu'il fonctionne de manière dynamique. Enfin, je termine par les tests effectués et les résultats obtenus.

4.1 Idée de L'algorithme

Etant donné un planning de réservation défini et fixe sur un intervalle de temps $[0, T]$, on doit assurer la recharge des véhicules avant chaque réservation. Si tous les véhicules se chargent automatiquement dès leurs retours sur le parking, on risque de dépasser la puissance maximale souscrite. Alors, pour résoudre ce problème il convient de développer un algorithme. L'objectif de cet

l'algorithme est de générer un planning de charge qui assure la recharge de tous les véhicules avant chaque déplacement, tout en respectant la contrainte de puissance maximale imposée.

Le graphe suivant montre que si on recharge les véhicules électriques sans planification optimale, on risque de dépasser la puissance maximale.



Exemple : Recharge des véhicules sans l'algorithme de gestion de charge

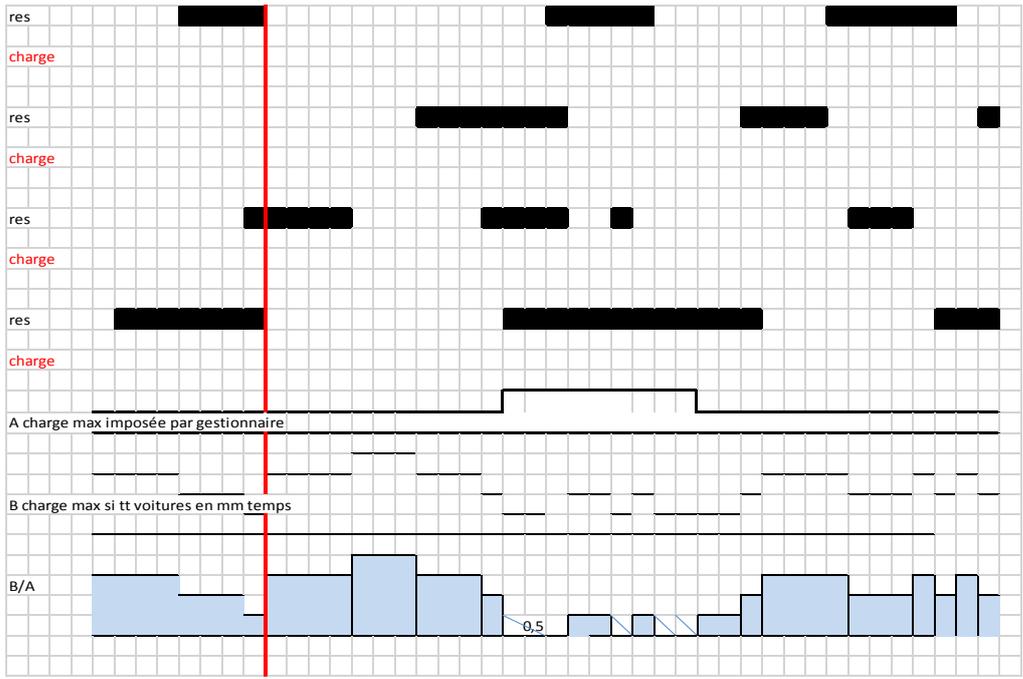
On considère les hypothèses suivantes :

- à l'état initial les véhicules sont complètement chargés
- Les véhicules ont besoin de la charge complète pour le déplacement suivant
- On peut arrêter la recharge à tout moment et reprendre plus tard

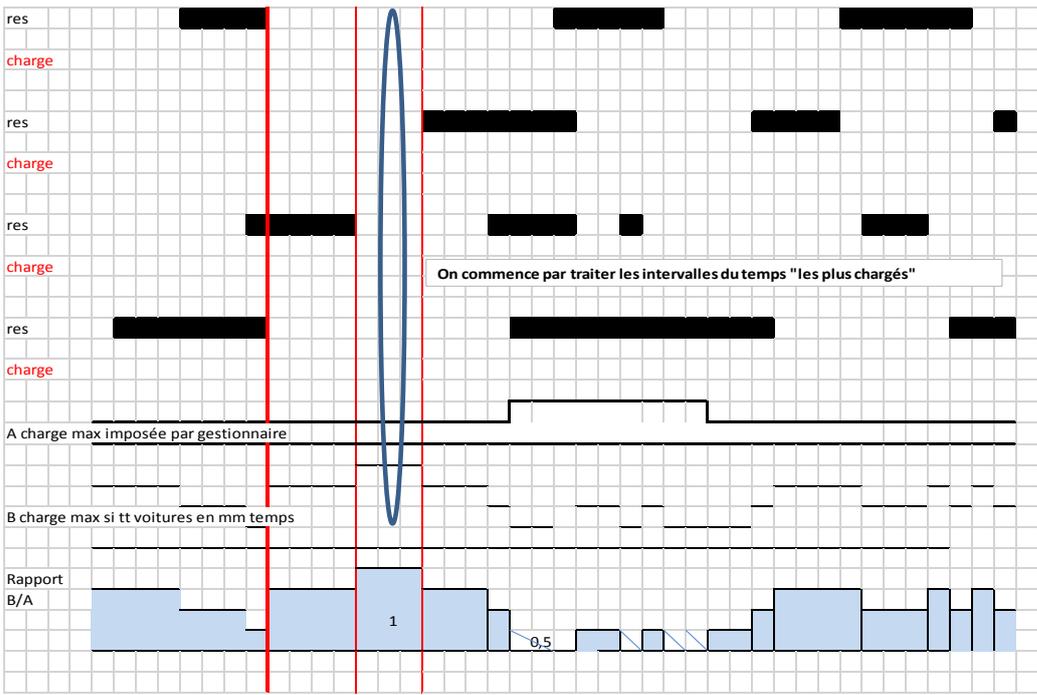
4.2 Les différentes étapes de l'algorithme :

- 1) On commence par calculer sur chaque intervalle de temps la puissance totale demandée pour charger l'ensemble des véhicules en même temps.
- 2) On calcule sur chaque intervalle de temps le rapport $B/A = \text{Puissance totale demandée} / \text{Puissance maximale souscrite}$
- 3) On commence par traiter les intervalles de temps « les plus chargés » (i.e. dans l'ordre décroissant de rapport B/A) pour finir par ceux où la marge de manœuvre est plus large.
- 4) Sur chaque intervalle de temps, on privilégie de charger d'abord le véhicule qui a le moins des possibilités de se charger pendant un autre intervalle de temps. Ainsi, on choisit le véhicule qui a le rapport énergie disponible/charge prévue de véhicule le plus petit
- 5) On attribue l'intervalle de temps pour la recharge de véhicule choisi et on met à jour la puissance maximale imposée, l'énergie disponible et le niveau de charge de véhicule.
- 6) Si la puissance maximale restante permet de charger un autre véhicule, on refait l'étape 4 et 5 jusqu'à atteindre la puissance maximale ou charger tous les véhicules présents pendant l'intervalle sinon on passe à l'intervalle de temps suivant

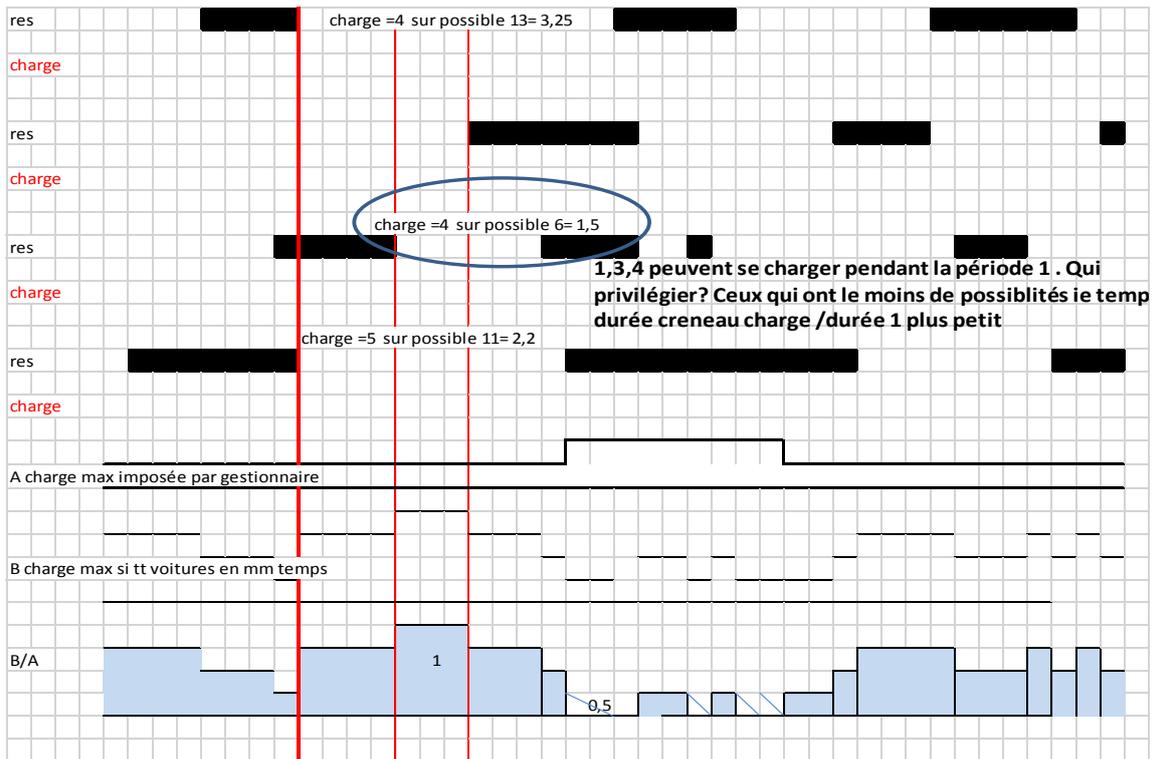
Les figures suivantes illustrent les différentes étapes de l'algorithme :



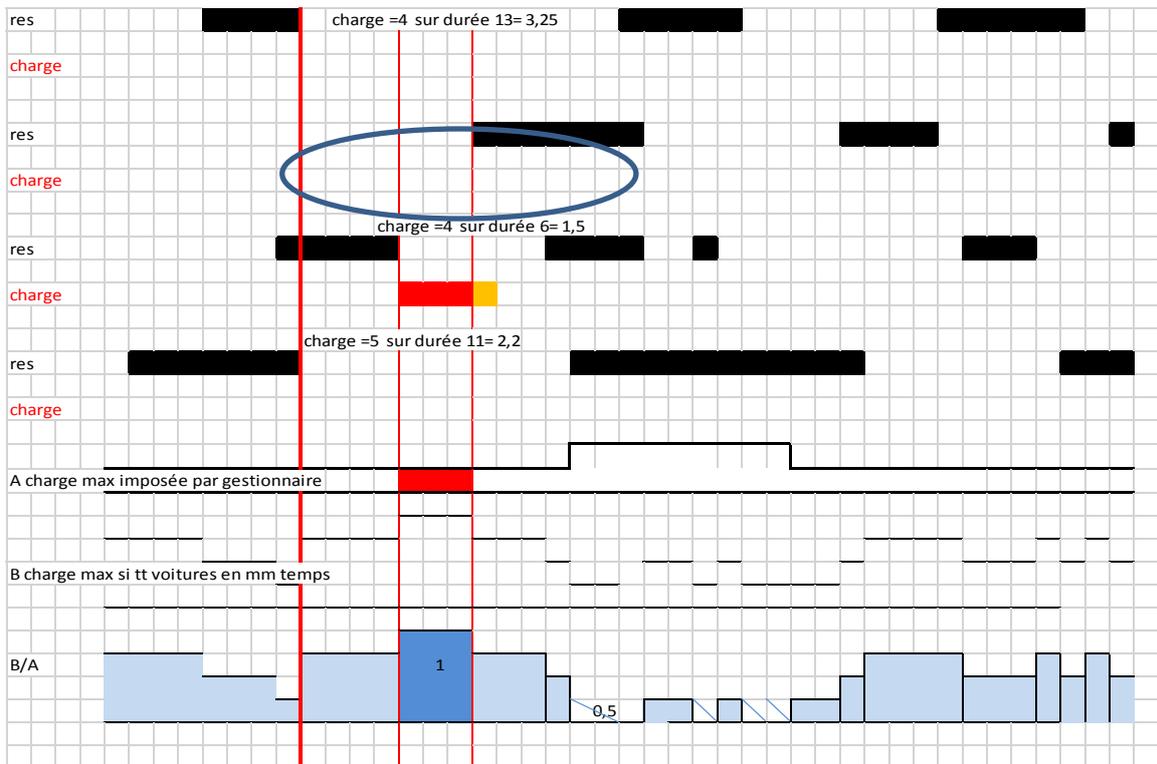
Calcul de rapport B/A et de la puissance



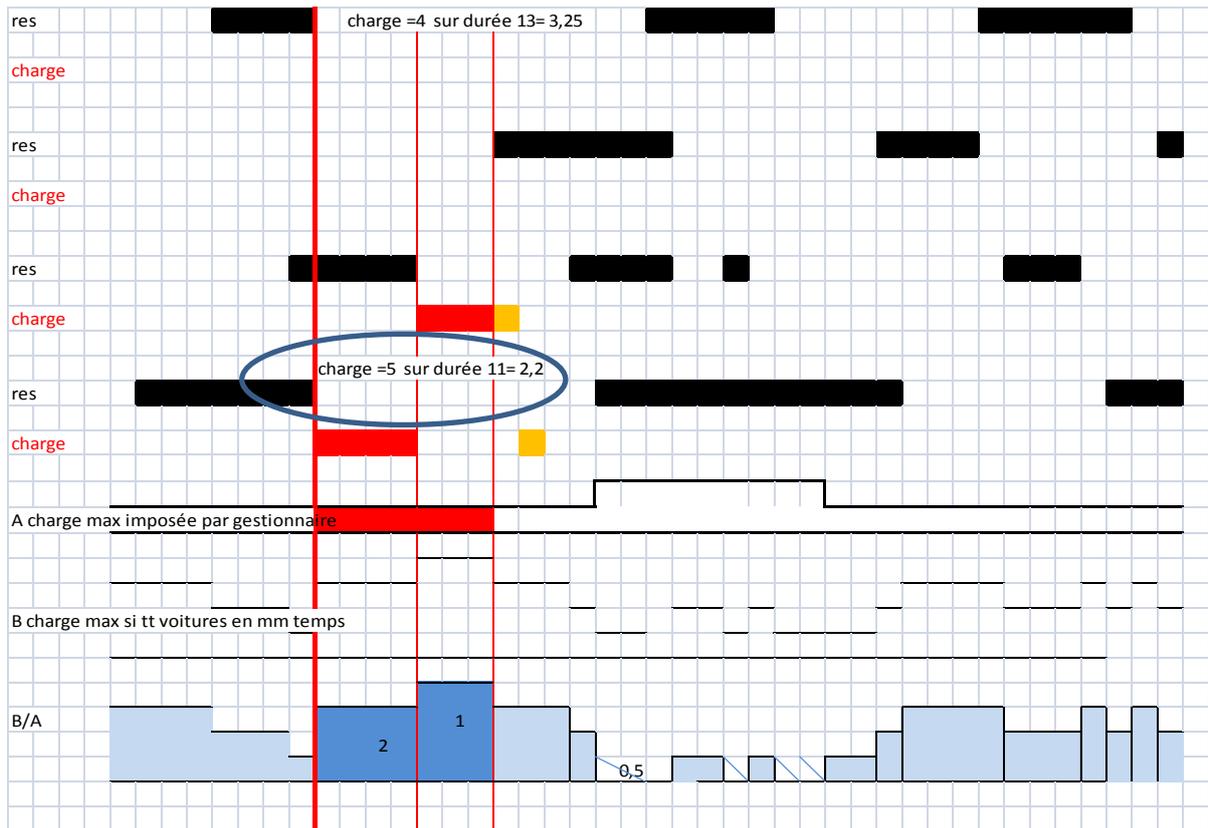
Commencer par les intervalles de temps « les plus chargés », max (B/A)



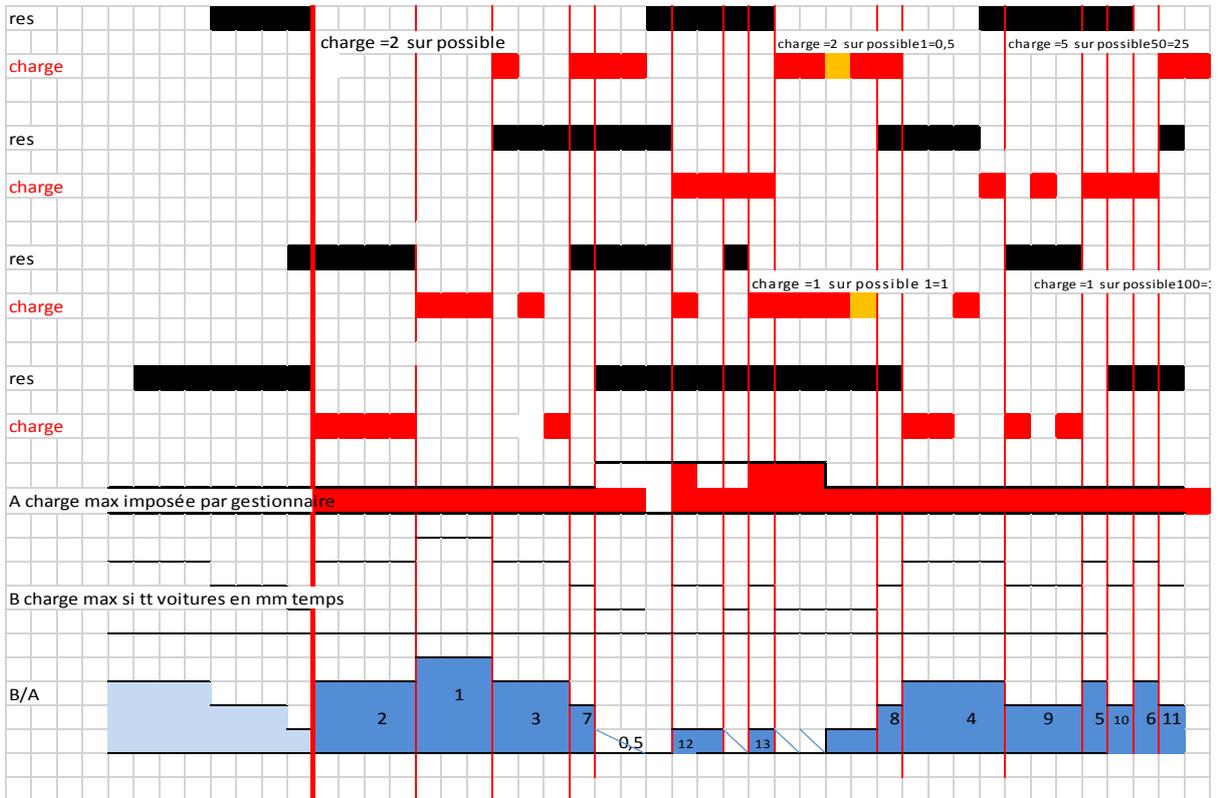
On commence par le véhicule qui a le moins des possibilités de charge : min (énergie/ charge)



On attribue l'intervalle de temps à la charge de véhicule et on met à jour la puissance max

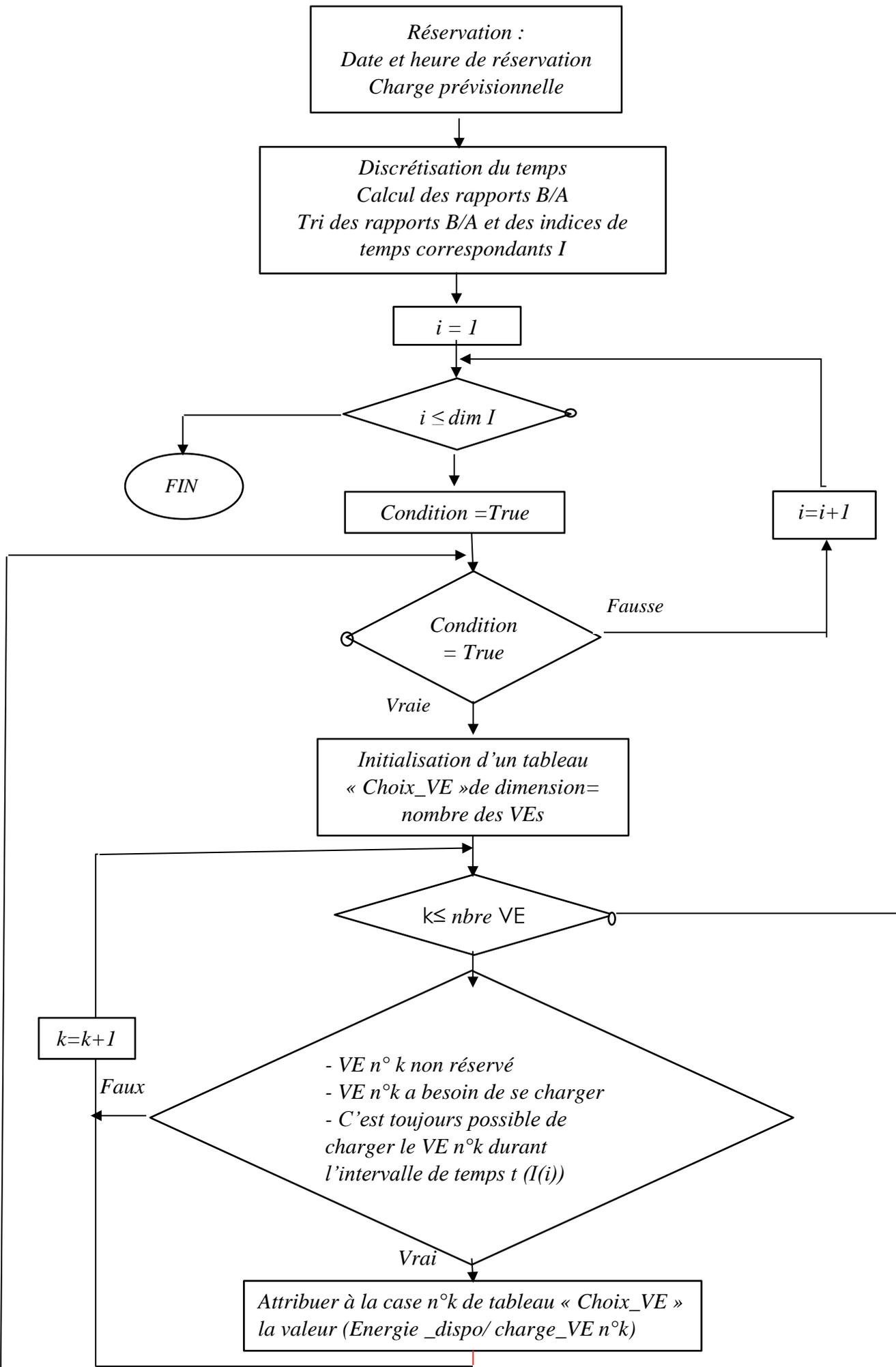


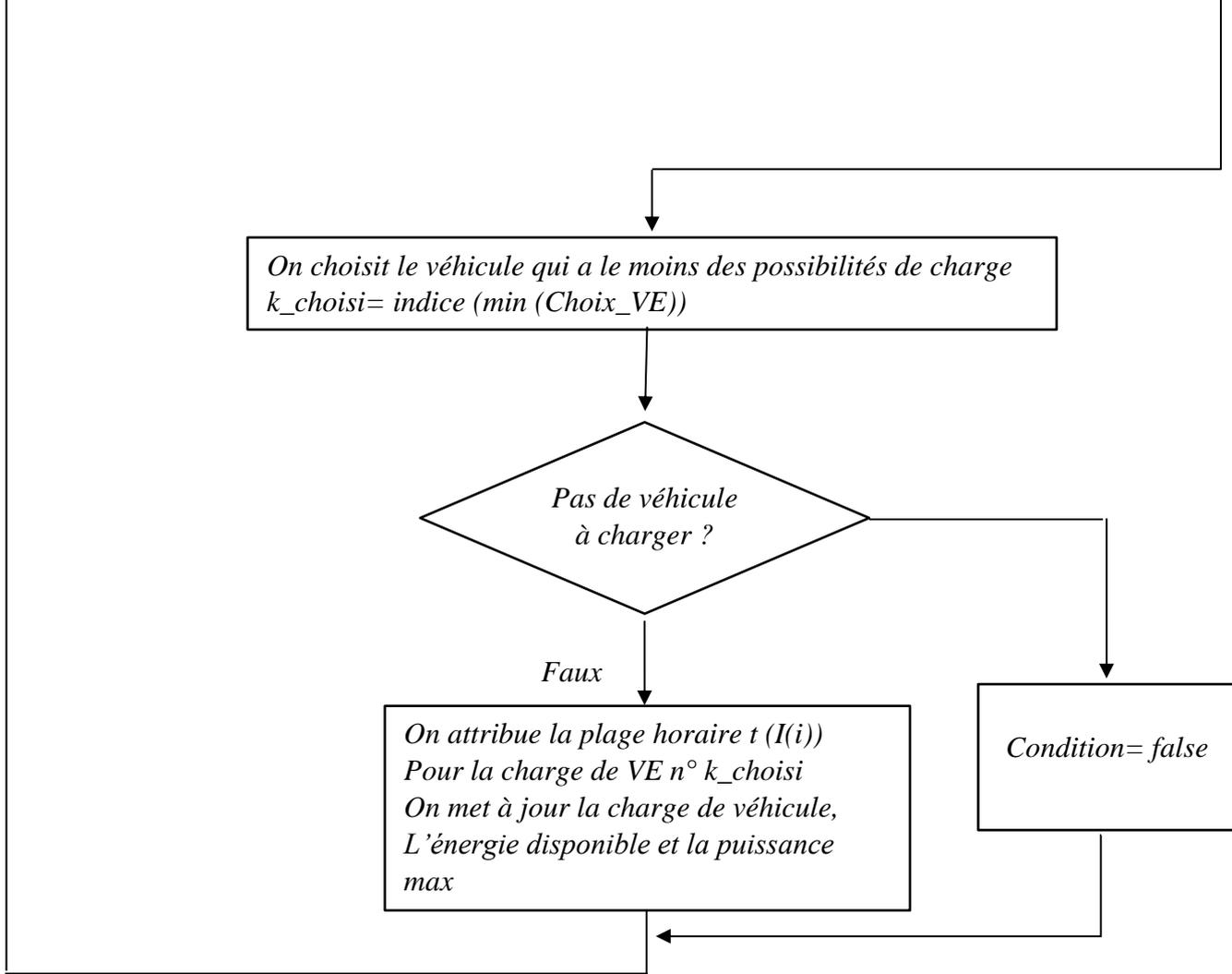
On parcourt tous les intervalles de temps dans l'ordre décroissant de rapport B/A



Planning final après avoir parcouru tous les intervalles. En jaune, la charge incomplète

4.3 Algorithme de charge





4.4 Codage de l'algorithme :

La première étape de mon stage consiste à coder l'algorithme de charge sous Matlab et valider les différentes étapes de codage.

En premier lieu, pour tester le fonctionnement de l'algorithme, je prends un exemple simple de 3 véhicules électriques de puissances de charge différentes, un nombre total de réservations égal à 9 réparti entre les 3 véhicules et une puissance maximale de valeur constante sur toute la période de temps.

J'ai également limité la période de planification à deux jours maximum et un pas de temps égal à une heure.

Les paramètres de test sont sauvegardés dans un fichier Excel qui est importé vers Matlab

Numéro du véhicule	date début Réservation	date Fin Réservation	charge prévue Avant la réservation suivante (kwh)	nombre de réservation
1	2018/03/21 09:00:00	2018/03/21 12:00:00	45	3
1	2018/03/21 16:00:00	2018/03/21 21:00:00	35	
1	2018/03/22 06:00:00	2018/03/22 17:00:00	18	
2	2018/03/21 11:00:00	2018/03/21 13:00:00	50	2
2	2018/03/21 17:00:00	2018/03/22 08:00:00	44	
3	2018/03/21 10:00:00	2018/03/21 13:00:00	40	4
3	2018/03/21 18:00:00	2018/03/21 23:00:00	25	
3	2018/03/22 10:00:00	2018/03/22 14:00:00	13	
3	2018/03/22 17:00:00	2018/03/22 23:00:00	24	

Tableau1 : Données de réservation

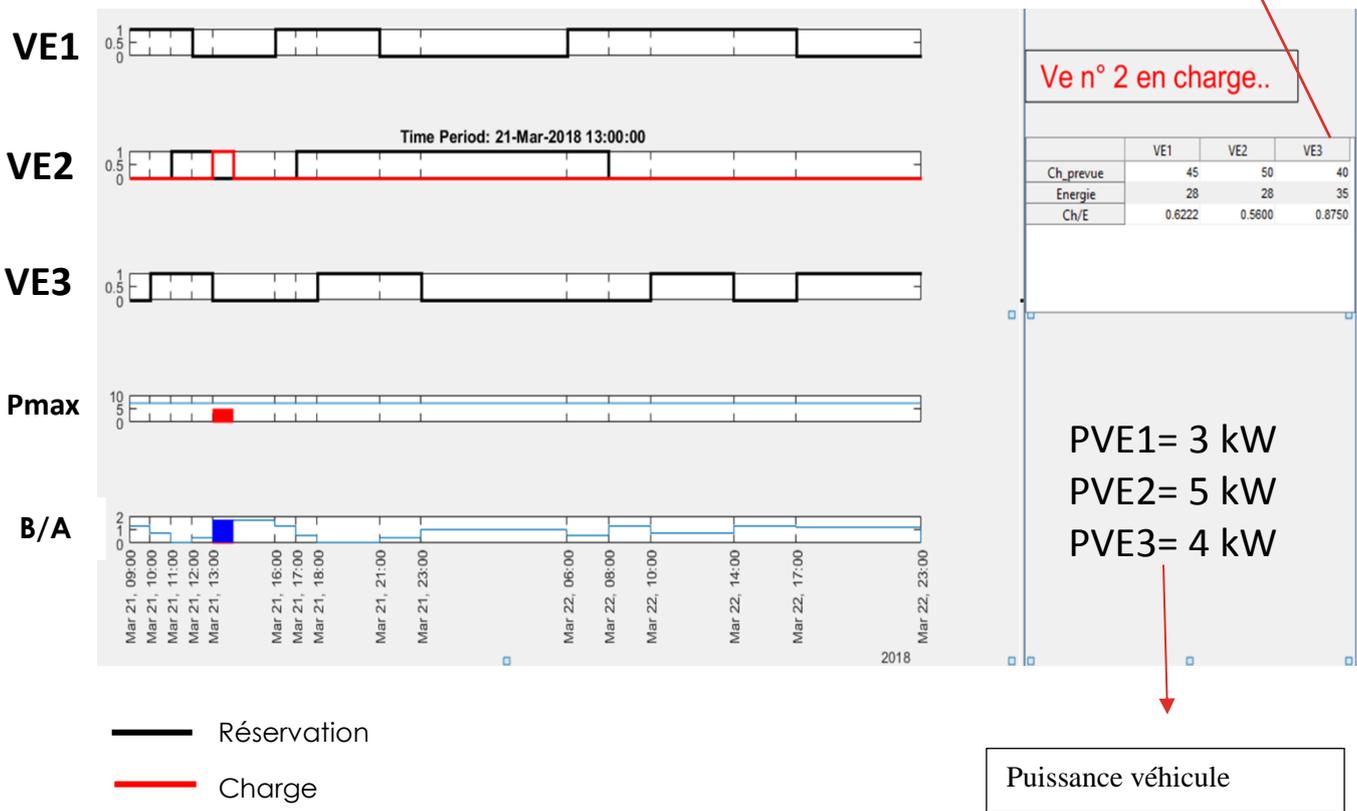
Pour faciliter la vérification des résultats fournis par l'algorithme, on affiche les résultats de manière dynamique pour qu'on puisse vérifier à chaque itération les étapes suivantes :

- L'avancement de l'algorithme se fait dans l'ordre décroissant de rapport B/A
- Le choix de véhicule à charger à chaque itération correspond au véhicule qui a le rapport CHARGE /ENERGIE le plus grand.
- L'Energie, la charge et la puissance max sont bien mis à jour à chaque itération
- La puissance max n'est pas dépassée

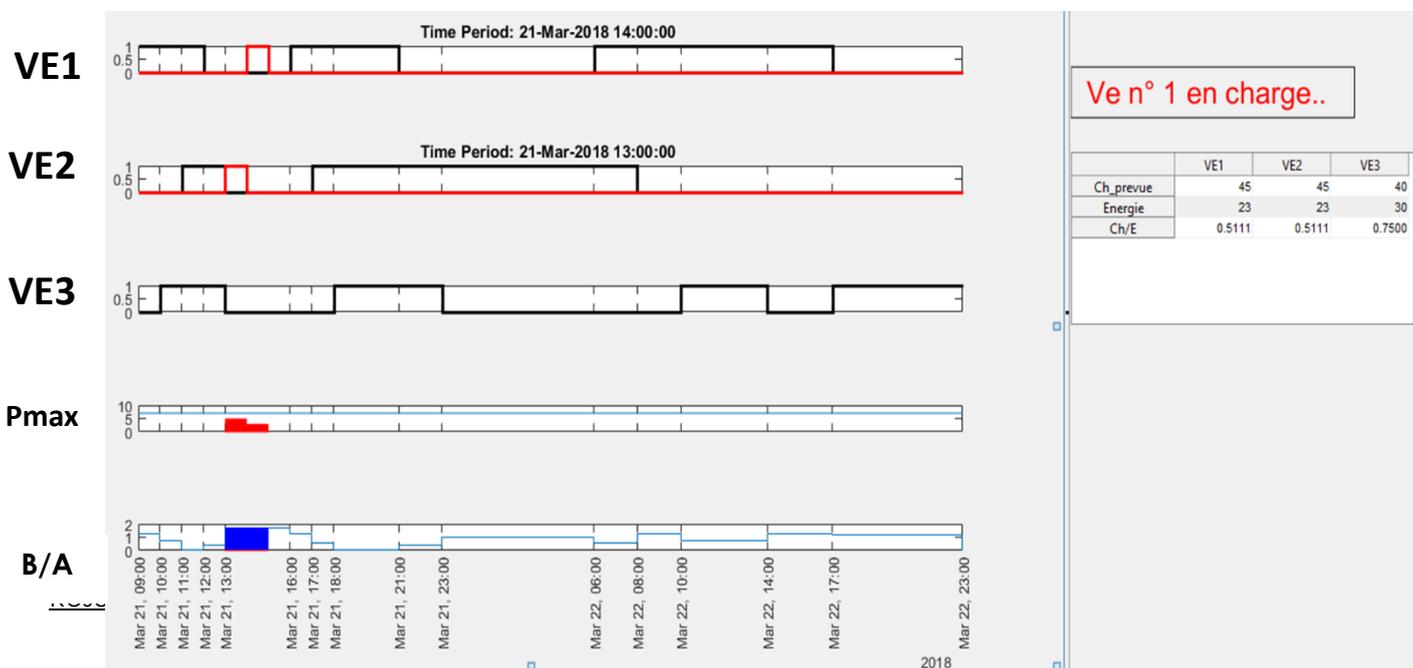
Je montre ci-dessous les résultats obtenus pour l'itération 1 et 2 pour montrer comment je procède à la vérification des résultats à chaque itération

Itération 1

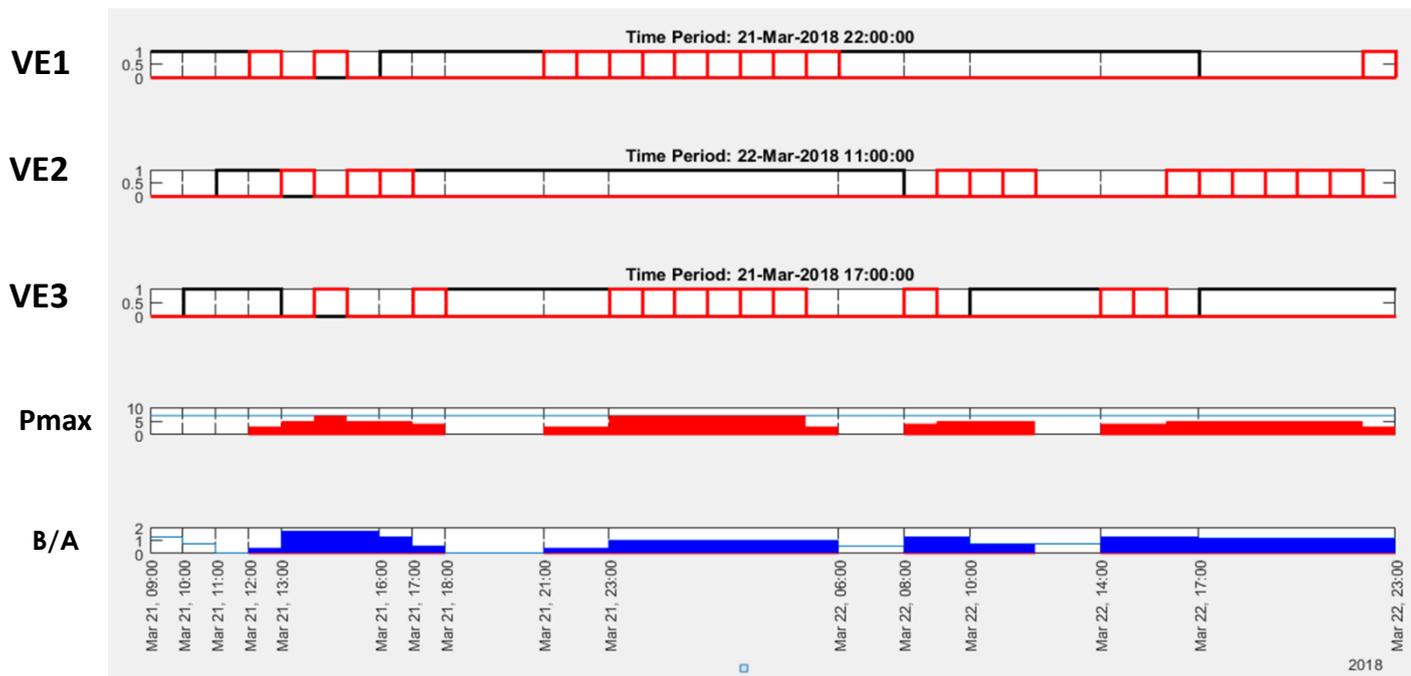
Tableau valeurs énergie, charge et Ch/E à chaque itération pour chaque véhicule



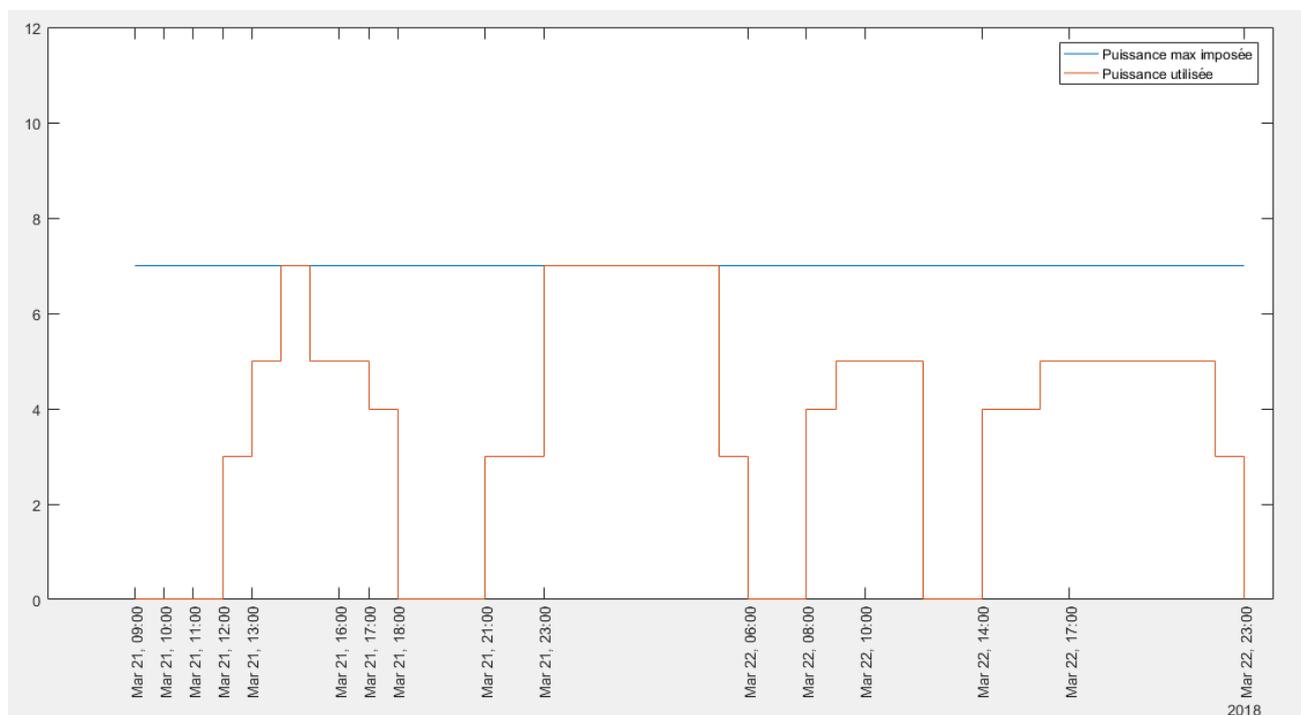
Itération 2 :



Pour l'exemple dont les données sont présentées dans le *Tableau 1*, l'algorithme de charge génère le planning de charge suivant :



La courbe suivante montre que le planning généré respecte la contrainte de la puissance max Imposée.



5. Algorithme de réservation

Après l'étape de la validation de l'algorithme de charge, on doit maintenant programmer la phase de réservation et faire le lien entre l'algorithme de réservation et l'algorithme de charge. Donc dans cette partie le planning de réservation est une donnée de sortie de l'algorithme.

L'entrée est une liste des dates des réservations souhaitées par les utilisateurs. Le but de l'algorithme est de répondre à chaque demande de la liste en confirmant la réservation s'il trouve un véhicule disponible pour la date souhaité et un planning de charge qui assure la recharge de ce véhicule et tous les autres véhicules qui ont besoin de se recharger ou de proposer un véhicule thermique pour la réservation si aucun véhicule électrique n'est disponible.

5.1 Description de l'algorithme

Pour chaque demande de réservation N de la liste, on cherche parmi tous les véhicules, ceux qui ne sont pas encore réservés pendant la période demandée et on crée une liste L de tous les véhicules disponibles. Ensuite, cette liste sera envoyée à l'algorithme de charge avec les données de la réservation N (la date de début et de fin et la charge nécessaire) et l'ancien planning de réservation. Ainsi, pour chaque véhicule de la liste des véhicules disponibles, l'algorithme de charge répète ces étapes :

- Il rajoute au planning de réservation de véhicule, la nouvelle réservation N
- Il réinitialise le tableau de charge
- Il cherche un nouveau planning qui permet de recharger tous les véhicules avant chaque déplacement prévu
- Si toutes les recharges prévues peuvent être effectuées, dans ce cas le véhicule est sauvegardé dans la liste avec le planning de charge trouvé sinon si l'une des recharges nécessaires ne peut pas s'effectuer, la réservation de véhicule ne sera pas possible et l'algorithme supprime le véhicule de la liste L des véhicules disponibles.

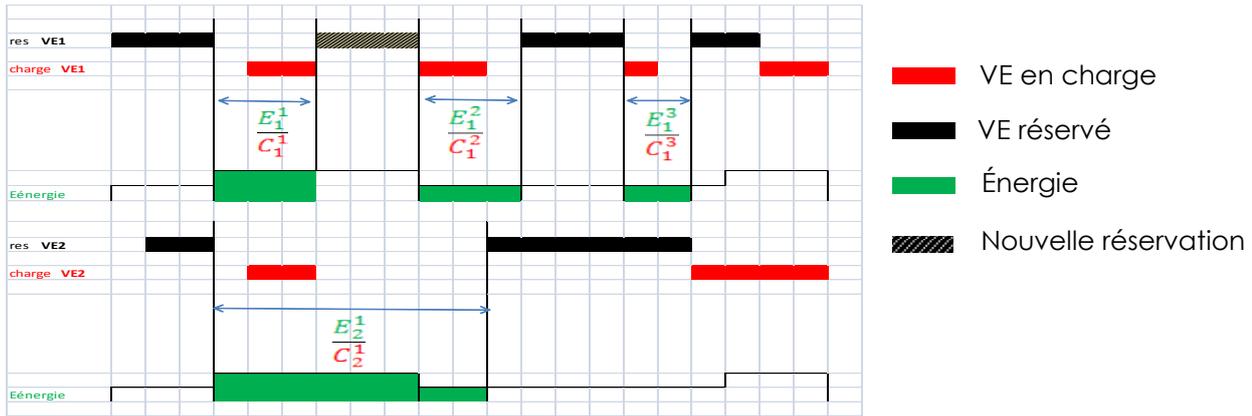
Ensuite, l'algorithme de charge renvoie la liste L à l'algorithme de réservation.

- Si la liste L est vide → l'algorithme de réservation prévient l'administrateur que la réservation est impossible et propose la réservation d'un véhicule thermique
- Si la liste L contient plusieurs véhicules, L'algorithme choisit le VE à réserver suivant le critère « moins de stress »

5.2 Critère choix de véhicule :

Le but est de choisir le véhicule qui facilitera la charge des prochaines réservations. Pour cela nous avons essayé de rechercher un critère, appelé stress, qui donne une indication sur la facilité de charger le prochain véhicule demandé. En effet, Si plusieurs véhicules sont disponibles pour la réservation, on privilégie le véhicule qui va faciliter le futur. On cherche donc à minimiser le stress de façon à optimiser les réservations et les recharges à venir.

Après réflexion, on a défini le stress comme la somme des rapports énergie disponible sur la charge prévue entre chaque deux déplacements.



$$Stress = \sum_i^{nbre_res} \sum_j \frac{E_j^i}{C_j^i}$$

Donc si plusieurs véhicules sont disponibles, j'affecte en priorité le véhicule qui a le stress minimal.

6. Algorithme dynamique

Une amélioration envisagée pour être le plus proche du problème réel, est que l'algorithme doit fonctionner de manière dynamique, c'est-à-dire en temps réel. Le système est lancé à chaque fois qu'une nouvelle demande de réservation est faite.

Par conséquent, le vecteur temps n'est plus fixe et la date de demande de réservation est un nouveau paramètre qui doit être pris en compte par l'algorithme.

Les principales différences avec l'algorithme statique sont les suivantes :

- **Vecteur temps dynamique** : Le vecteur temps est recalculé à chaque fois qu'une demande de réservation est notifiée. Si une nouvelle demande de réservation est faite à l'instant t_1 , le nouveau vecteur temps est $[t_1, T]$

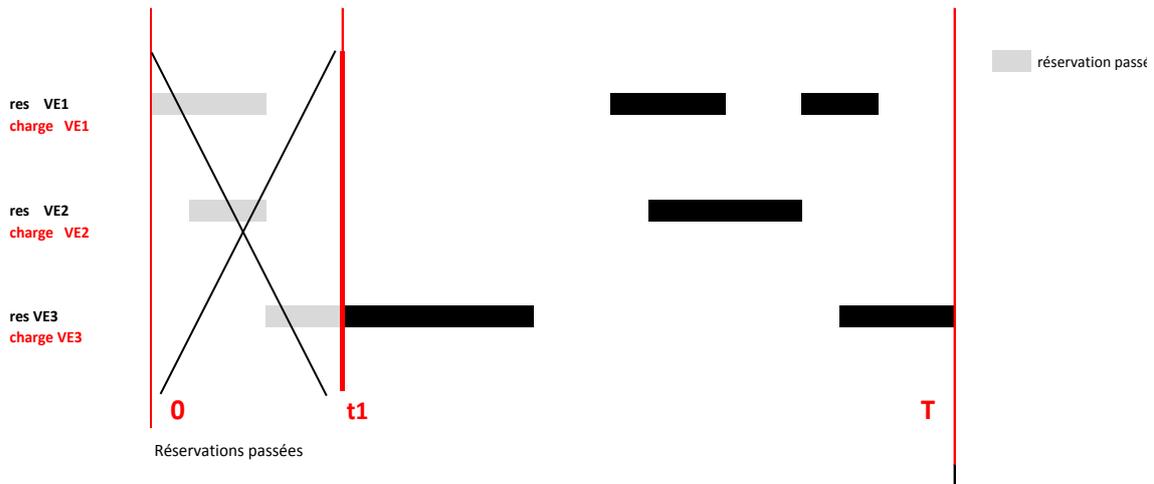
tel que t_1 est la date où la demande est faite et T est la date de fin de la dernière réservation parmi toutes les réservations sauvegardées à l'instant t_1 + une certaine durée de temps qui assure la recharge complète d'une voiture électrique.

- **Table de réservation dynamique** : À chaque date t_1 , on supprime toutes les réservations effectuées dans le passé (avant la date t_1) de la liste des réservations. Considérons la table de réservation générée à un instant t_0 , si une nouvelle réservation est demandée à un instant t_1 ($t_1 > t_0$), alors la table de réservation est mise à jour de la façon suivante : On note HD_i et HF_i respectivement l'heure de début et l'heure de fin d'une réservation i .

_ Si $HF_i \leq t_1$ alors la réservation i est retirée de la liste des réservations.

_ Si $HD_i < t_1 < HF_i$, La réservation i commence à t_1 au lieu de HD_i

Cette figure illustre comment on procède à la suppression des réservations passées et on recalcule le nouveau vecteur temps qui commence à t1



- **Niveau de charge initial de VE** : La mise à jour de niveau de charge initial de chaque véhicule électrique est également nécessaire. À l'état initial, les véhicules sont de charge complète, ensuite à chaque nouvelle demande de réservation, le niveau de charge initial est égal au niveau de charge atteint à l'instant t_1 (date de la demande de réservation).

On crée un tableau TC qui nous permet de calculer le niveau de charge à un instant donné. Chaque élément de tableau représente la valeur de l'énergie stockée ou l'énergie consommée par le véhicule pendant l'intervalle de temps Δt_i .

Si un véhicule j est en charge durant l'intervalle de temps Δt_i alors $TC(i, j) = P * \Delta t_i$

On suppose que la quantité d'énergie nécessaire pour assurer un déplacement est consommée durant le dernier intervalle de la période $[HD, HF]$.

Donc le niveau de charge de véhicule j atteint l'instant t_1 est :

$$\text{NiveauCharge}_{t_1} = \text{ChInitiale} + \sum_0^{t_1} TC(i, j)$$

VE1	[Charging bars: black from 0 to 5, red from 5 to 10; black from 15 to 20, red from 20 to 25]																					
Etat charge	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
TC	0	0	0	0	-25	5	5	5	5	5	0	0	0	0	0	0	0	0	-15	5	5	5
									t1													T
Niveau Charge à l'instant t1= 30-25+ (5+5+5)= 20 Kwh																						
Ch_initiale=30kwh																						

Algorithme dynamique

À chaque nouvelle demande de réservation :

- Réinitialiser le planning de charge
- Pour chaque véhicule :
 - Supprimer les réservations passées
 - Calculer la charge initiale
- Fin

Chercher la liste \mathcal{L} des véhicules disponibles pour la nouvelle réservation

Pour chaque véhicule de \mathcal{L}

- Rajouter la réservation au véhicule
- Générer un planning de charge

- Si toutes les charges effectuées
 - Sauvegarder le véhicule dans la liste \mathcal{L} et le planning de charge généré

- Sinon
 - Éliminer le véhicule de la liste \mathcal{L}

- Fin

- Supprimer la dernière réservation ajoutée
- Réinitialiser le planning de charge

Fin

Si \mathcal{L} est vide

- Réservation impossible + proposer un véhicule thermique

Sinon

- Réservation acceptée

- Calculer le stress

- Choisir le véhicule (min (stress))

- Attribuer le véhicule choisi à la réservation

- Remplacer l'ancien planning de charge et de réservation par le nouveau planning

Fin

Fin

7. Résultats et tests

Pour tester l'algorithme, on a simulé n demandes de réservations. Pour cela, on crée un tableau des données qui comporte une liste des dates des réservations avec la quantité d'énergie nécessaire pour chaque réservation et la date de demande de la réservation et un deuxième tableau qui contient les caractéristiques de chaque véhicule (état de charge initial, puissance de véhicule et la capacité de batterie).

On choisit un pas de temps = 1h

DATE DEBUT DE RESERVATION	DATE FIN DE RESERVATION	charge utilisée (à calculer)	la date de demande
2018/06/07 08:00:00	2018/06/07 14:00:00	40	2018/06/05 10:00:00
2018/06/06 08:00:00	2018/06/06 13:00:00	35	2018/06/05 11:00:00
2018/06/07 17:00:00	2018/06/07 20:00:00	15	2018/06/06 09:00:00
2018/06/07 11:00:00	2018/06/07 20:00:00	25	2018/06/06 14:00:00
2018/06/08 09:00:00	2018/06/08 14:00:00	45	2018/06/06 15:00:00
2018/06/08 11:00:00	2018/06/08 16:00:00	25	2018/06/07 12:00:00
2018/06/08 15:00:00	2018/06/08 20:00:00	35	2018/06/07 13:00:00
2018/06/08 23:00:00	2018/06/09 02:00:00	50	2018/06/08 21:00:00
2018/06/08 23:00:00	2018/06/09 08:00:00	35	2018/06/08 22:00:00
2018/06/09 10:00:00	2018/06/09 17:00:00	45	2018/06/08 23:00:00

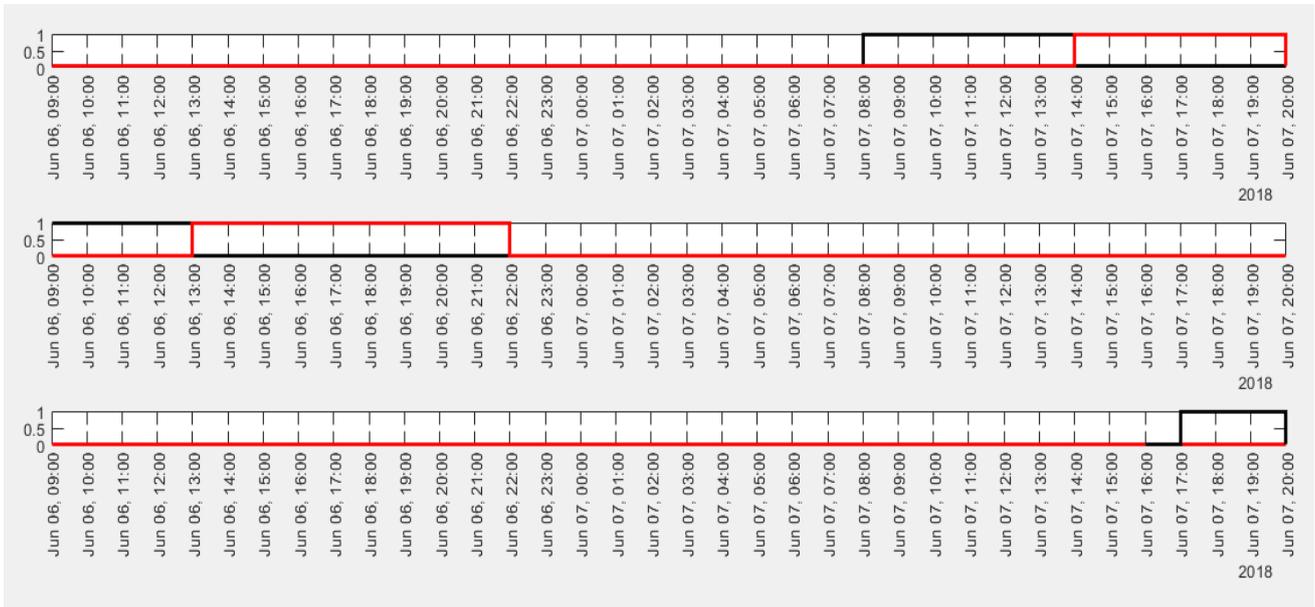
n° véhicule	Etat de charge initial(Kwh)	puissance VE (Kw)	capacité batterie
1	50	3	50
2	45	4	45
3	35	3	35

Pour vérifier le résultat obtenu et si l'algorithme fonctionne, on vérifie à chaque itération :

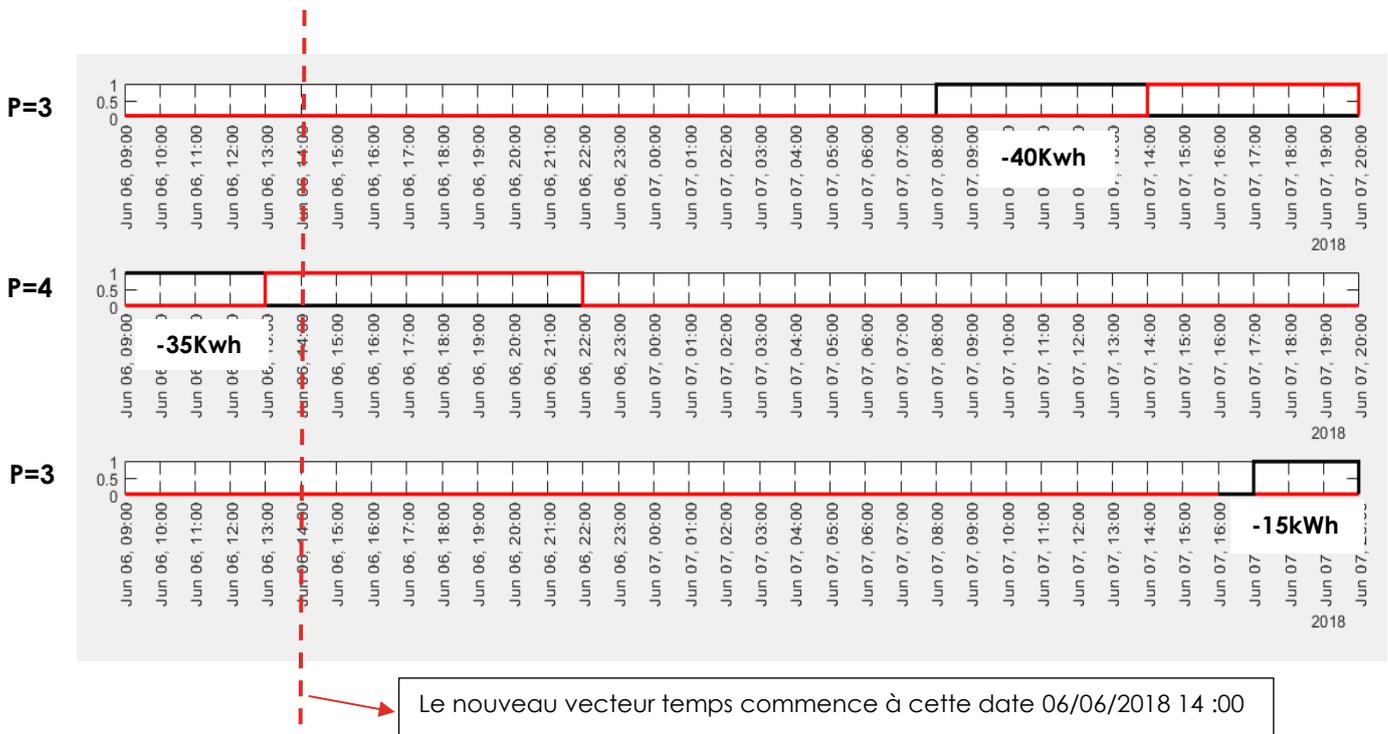
- si les réservations passées sont supprimées
- si la valeur de charge initiale est exacte
- Les charges effectuées

Itération 3 : demande de réservation le 06/06/2018 09 :00

	Charge initiale
VE1	50
VE2	45
VE3	35



Itération 4 correspond à la nouvelle demande de réservation de 06/06/2018 14 :00



On commence par vérifier les valeurs de la charge initiale, pour cela on calcule le niveau de charge à la date **06/06/2018 14 :00** et on compare avec les valeurs de charge initiale calculées par l'algorithme à cette date

Niveau de charge pour VE1= 50kWh

Niveau de charge pour VE2= $45 - 35 + 4 \times (1 \text{ h}) = 14 \text{ kWh}$

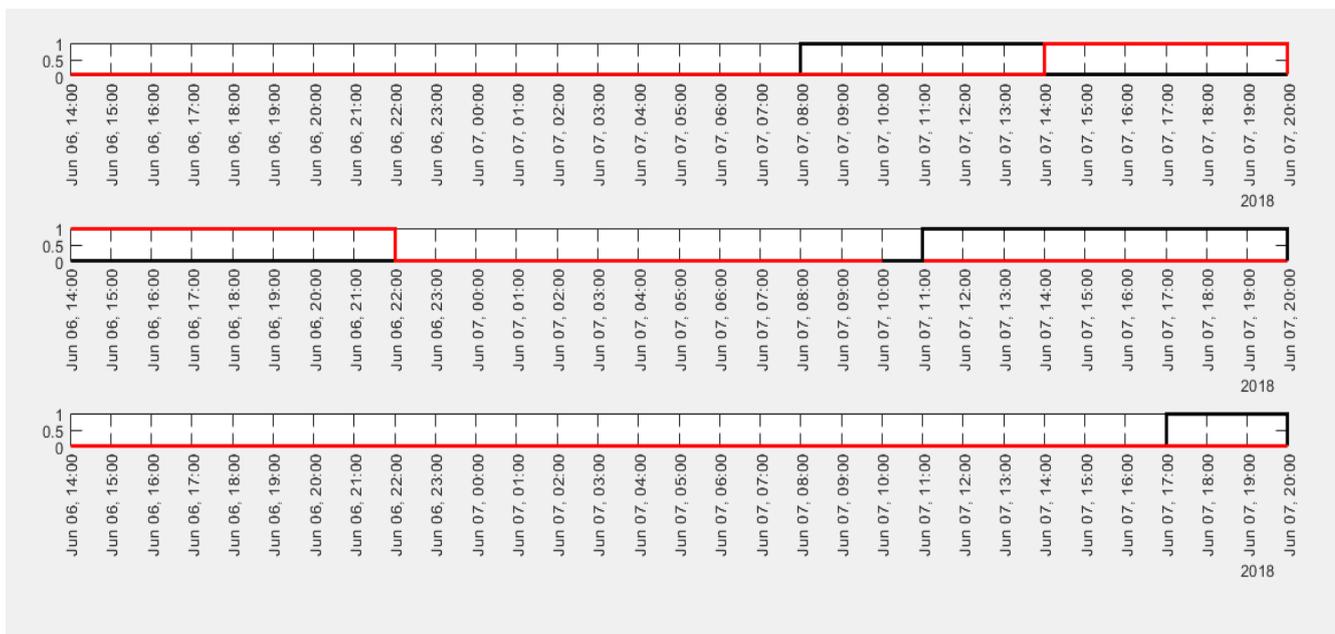
Niveau de charge pour VE3= 35kWh

Les valeurs obtenues par l'algorithme sont affichées dans le tableau suivant
 Donc si on vérifie avec les valeurs calculées à la main, on trouve bien
 Les mêmes valeurs.

	Charge initiale
VE1	50
VE2	14
VE3	35

Enfin on vérifie que le nouveau vecteur de temps commence à la date de demande de réservation **06/06/2018 14 :00** et que le nouveau planning de charge est exact.

Itération 4



Test de performance de l'algorithme

Afin de tester la qualité de la solution obtenue par l'algorithme, on construit de manière aléatoire une solution exacte. On veut tester l'algorithme dans des conditions extrêmes donc on choisit de générer un exemple de planning de charge et réservation très serrés (stressé au maximum).

On génère un planning pour 3 véhicules électriques identiques : même capacité de batterie et même puissance de charge. On suppose que les 3 véhicules parcourent le même nombre des kilomètres sur toute la période de temps (c.à.d. la même quantité de charge totale).

Pour construire notre solution, on commence par générer aléatoirement des plages horaires pour la charge de chaque véhicule et on calcule sur chaque intervalle de temps la puissance totale utilisée pour la recharge. Puis, on crée un vecteur puissance maximale qui est égale exactement à la puissance totale afin d'avoir une solution très serrée où il n'y a pas de marge sur la puissance.

(Cf. Figure 1)



Figure 1

Ensuite, on déduit les réservations à partir de planning de charge généré en sachant qu'avant toute période de charge, il y a forcément un déplacement effectué et en supposant qu'il n'y a pas de marge entre la date de fin de la réservation et la date de début de charge. On choisit cette hypothèse toujours dans le but de tester l'algorithme dans des cas limites. (Cf Figure 2)



Figure 2

Une fois le planning de charge et réservation généré, on calcule la quantité d'énergie consommée pour chaque réservation en multipliant la durée de la période charge associée à la réservation par la puissance de véhicule.

Enfin, on utilise les données (liste réservation, énergie consommée pendant la réservation et puissance maximale) de l'exemple qu'on a construit comme données d'entrée de notre algorithme.

Pour tester la qualité de la solution donnée par l'algorithme, on a généré des solutions exactes avec différents nombres de réservations (N=15, N=30, N=50).

Pour chaque N, on a effectué plusieurs simulations en modifiant à chaque simulation l'ordre des réservations dans la liste des données. On a effectué les simulations dans le cas où l'algorithme choisit le véhicule suivant « le critère stress minimal et dans le cas où l'algorithme choisit le premier véhicule disponible de la liste sans aucun critère précis.

Les résultats obtenus sont décrits dans le tableau suivant :

N : nombre des demandes de réservation reçus

N=12		N=30		N=50	
Réussite (stress)	Réussite (no stress)	Réussite (stress)	Réussite (no stress)	Réussite (Stress)	Réussite (no stress)
8	12	22	30	42	46
8	11	24	27	36	39
8	8	24	24	41	40
7	8	26	26	39,6666667	41,6666667
8	9	23	26		
8	7	27	27		
9	8	24	26		
9	8	25	26		
10	9	24	26		
10	11	23	25		
10	9	24	26		
7	10	23	25		
9	8	24	24		
8	7				
7	8				
Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne		
8,42857143	8,64285714	24,4	25,7		

On signifie par « Réussite » le nombre des réservations acceptées sur le nombre des demandes reçues. Ainsi, on peut constater d'abord à partir des résultats obtenus qu'avec cet algorithme on peut assurer 80% de réussite.

N=15	
réussite	Puissance libre
12	33%
12	22%
12	37%
11	20%
12	30%
13	23%

N=30	
23	29%
22	32%
25	27%
23	38%
24	26%

Pour une réussite de 80% , on a une puissance libre de 30%.

Cependant, si on compare les résultats de l'algorithme avec le critère de « stress minimal » à celui sans ce critère. On remarque qu'on obtient presque le même pourcentage de réussite.

Donc le critère choisi n'a pas permis d'optimiser le nombre de réservations.

8. Points à améliorer dans l'algorithme

Après vérification des résultats obtenus, on a identifié plusieurs points qu'on pourrait améliorer dans l'algorithme.

Modulation de puissance

Soit un véhicule qui se charge à une puissance égale à 3kW et un pas de temps $\Delta t = 1h$.

Le véhicule se charge pendant Δt de 3kWh. (Voir Figure 1 pour l'exemple)

Supposons qu'il manque 1kWh d'énergie pour que la batterie soit pleine, dans ce cas si on attribue un intervalle Δt pour la charge de véhicule, elle se termine avant le temps prévu. Ce qui entraîne une perte de temps qu'on pourrait utiliser pour la recharge d'un autre véhicule.

Une des solutions pour éviter ce problème est d'optimiser le pas de temps pour qu'on ne tombe pas sur ce problème plusieurs fois ou de choisir un pas de temps très petit et dans ce cas on risque de ralentir le temps de calcul. La deuxième solution est la modulation de puissance qui consiste à faire varier la puissance lorsque cela est nécessaire. Pour notre exemple, on pourrait varier la puissance sur le dernier intervalle de temps de 3 à 1kW.

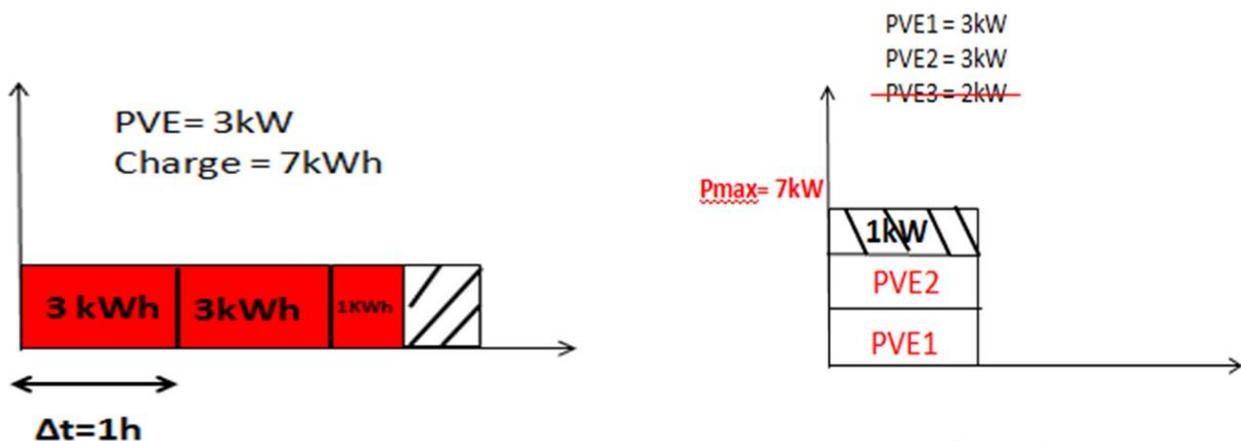


Figure 1

Figure 2

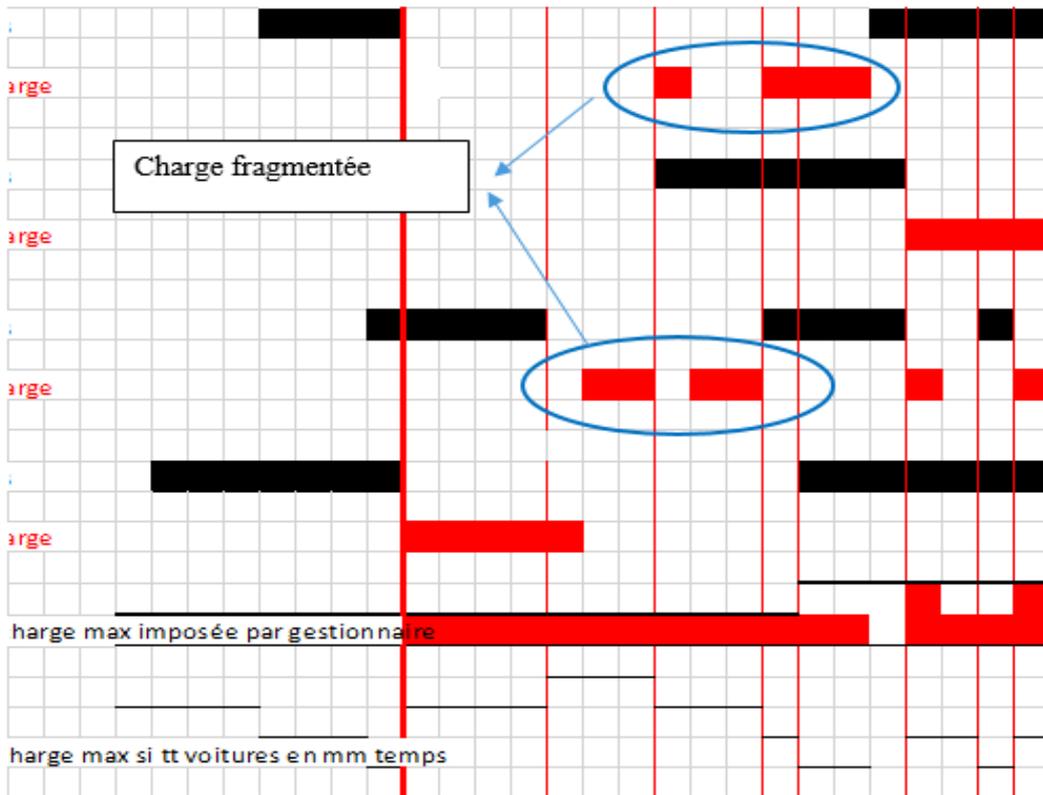
L'autre problème qui est un peu similaire, comme expliquée dans la Figure 2, est la puissance résiduelle et on pourra le résoudre par la même solution : La modulation de puissance.

Fragmentation de charge

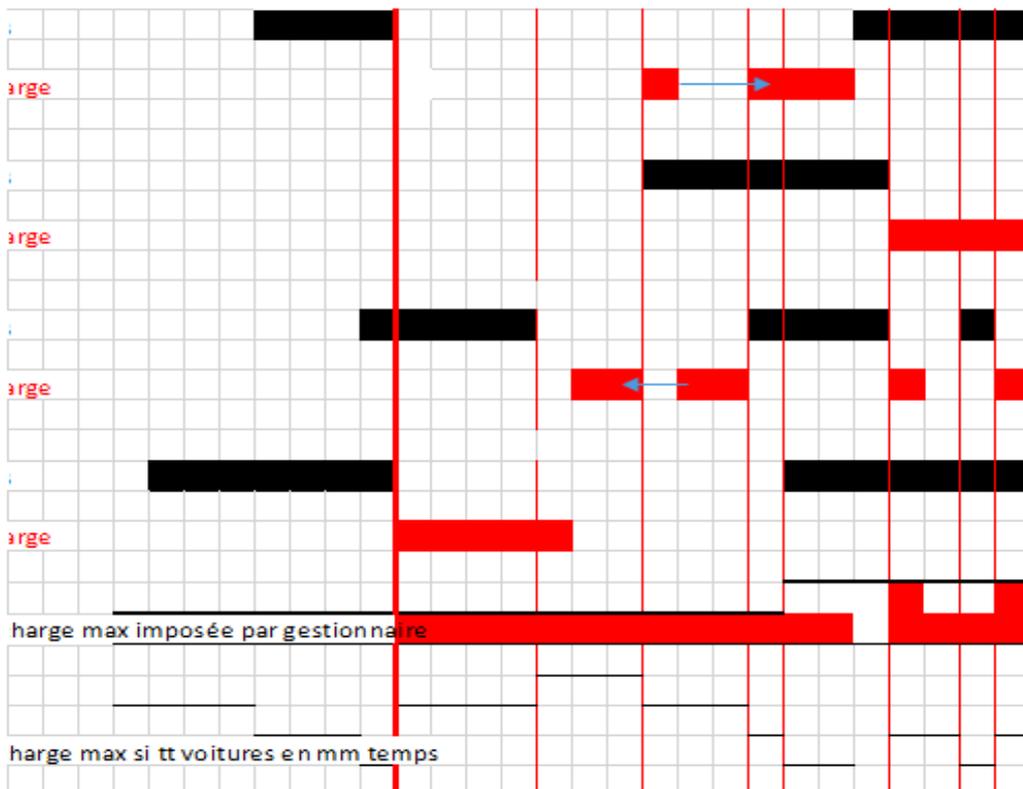
Un des inconvénients de cet algorithme est le problème de fragmentation de charge. Avec la logique suivie dans cet algorithme, on obtient des périodes de charge qui ne sont pas continues.

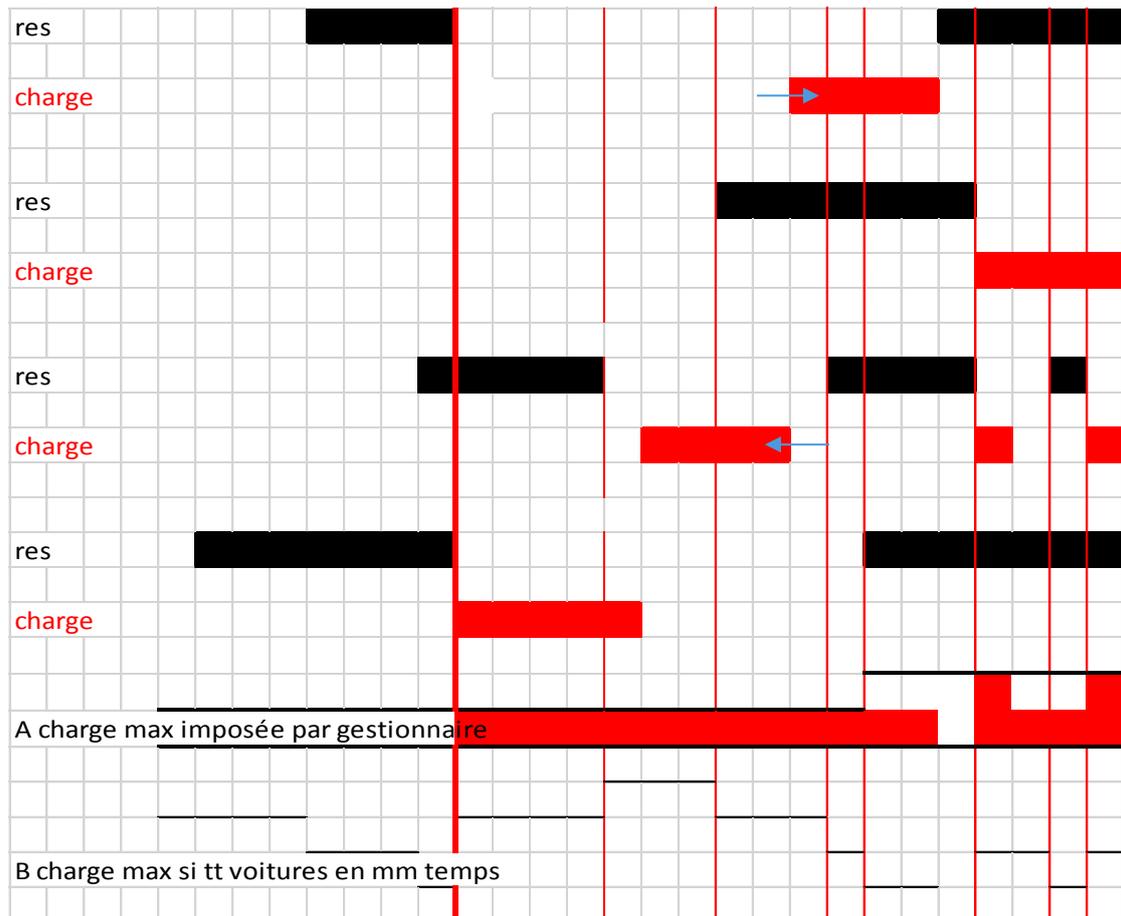
C'est-à-dire pour charger le véhicule, on sera obligé d'interrompre la charge plusieurs fois, ce qui n'est pas pratique et risque de causer une usure prématurée de la batterie. Donc, il faut absolument ajouter une autre étape dans cet algorithme qui permet de défragmenter les périodes de charge pour avoir des charges les plus continues.

Charge fragmentée



Défragmentation de charge





Report de charge

Pour assurer l'autonomie de véhicule pendant le déplacement, il est préférable de faire le plein de la batterie à chaque recharge. En premier lieu, on a imposé que la charge soit complète avant chaque déplacement, cela signifie que la réservation est annulée si la batterie de véhicule ne peut pas être chargée à pleine capacité avant (par manque de temps ou de puissance).

Mais cette hypothèse n'optimise pas le nombre de réservations.

Donc on a choisi par la suite l'hypothèse suivante qui permet d'augmenter le nombre de réservations possibles et répondre mieux aux besoins des utilisateurs des véhicules électriques :

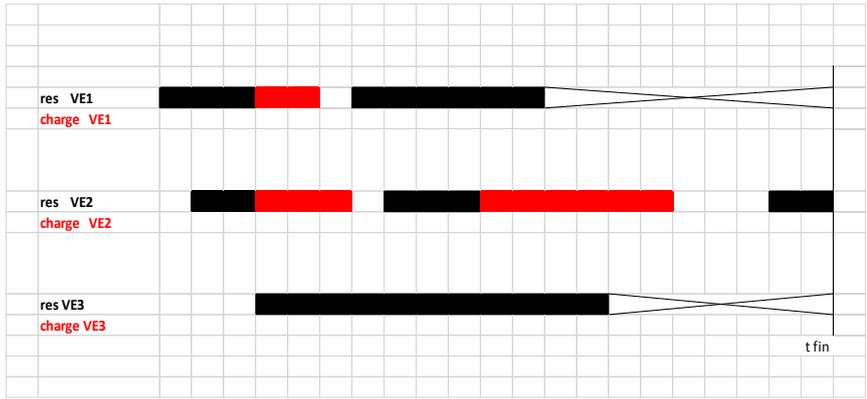
- Si la charge complète n'est pas possible avant le déplacement, on effectue uniquement la charge nécessaire pour assurer le déplacement
- Après deux charges incomplètes, il est obligatoire d'effectuer une recharge pleine de la batterie.

Avec cette hypothèse, on n'autorise que deux reports de charge max pour éviter de cumuler des erreurs lorsque la consommation réelle est différente de la consommation théorique prévue.

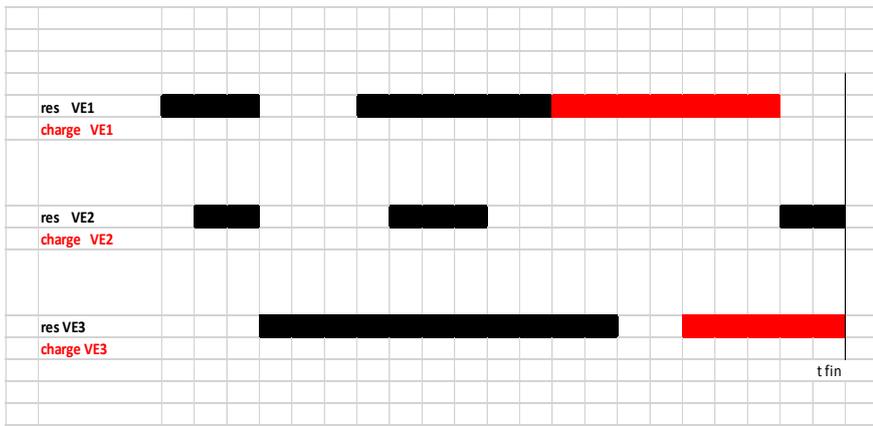
Charge à la fin de la période de temps

Au début, on s'occupe uniquement des recharges qui s'effectuent entre deux déplacements, on ne prend pas en compte la charge après la dernière réservation. Donc on lance l'algorithme de charge sans prendre en compte la charge après la dernière réservation et à la fin de l'algorithme, on cherche une plage horaire pour effectuer les dernières recharges. Puis, on envoie le plan de charge complet.

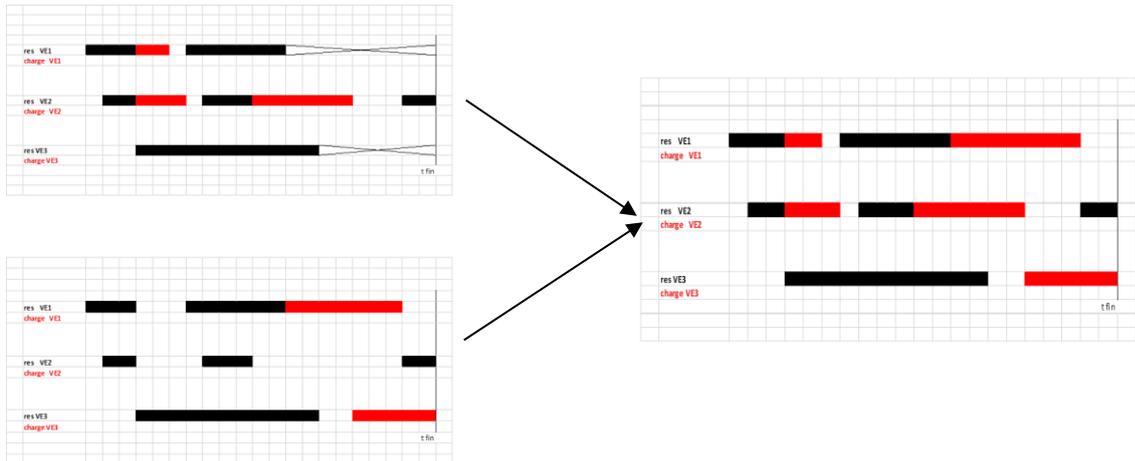
Étape1 : l'algorithme de charge ne prend pas en compte la charge des véhicules après la dernière réservation



Étape2 : Après la fin de l'algorithme de charge, on attribue des plages horaires pour les recharges après la dernière réservation



Etape3 : Générer le planning complet

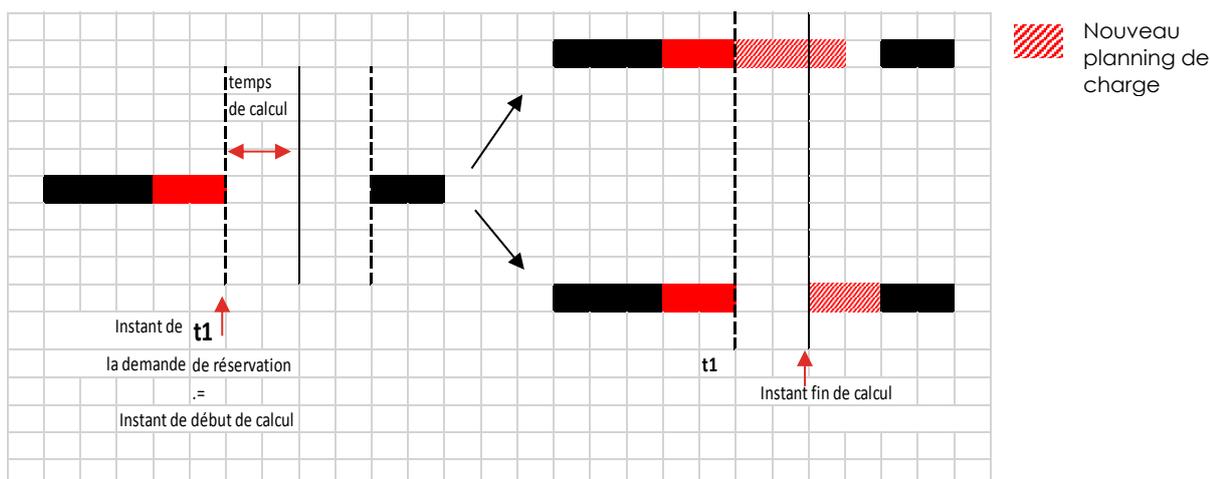


Influence du temps de calcul

Il ne suffit pas que le système donne une réponse suite à une demande de réservation par l'utilisateur mais il faut que cette réponse soit envoyée dans un délai raisonnable. Si le temps de calcul est très grand cela risque d'avoir un impact sur les résultats.

Le schéma suivant montre l'influence que le temps de calcul pourrait avoir sur les résultats :

Le véhicule est en train de se charger à l'instant t_1 . Une nouvelle demande est reçue à cet instant. Donc l'algorithme va refaire le calcul à partir de l'instant t_1 pour trouver un nouveau planning de charge. Si le temps de calcul est très grand, on risque d'avoir un grand écart sur le niveau de charge.



Une des solutions pour résoudre ce problème est de lancer les calculs à l'instant t_1 avec les conditions initiales de véhicule à l'instant $t_2 = (t_1 + \text{temps de calcul})$ et entre t_1 et t_2 le système fonctionne avec les données de la réservation précédente. Mais cela nécessite d'avoir une estimation de temps de calcul.

Une autre amélioration envisageable pour réduire le temps de calcul est de réduire la période de temps. En effet, si on a par exemple des demandes de réservations sur une période d'un mois, on ne regarde que les réservations prévues dans une semaine et ainsi on réduit le vecteur de temps et par conséquent le temps de calcul diminue.

9. Conclusion

Au début de mon stage, J'ai eu la liberté de choisir la démarche et les différentes étapes de l'avancement de mon travail. Et cela m'a permis de développer le côté organisationnel en essayant d'établir une méthode de travail efficace qui répond aux objectifs et aux priorités de ce projet. Les nombreux projets que j'ai effectués durant ma formation d'ingénieur MACS, les outils informatiques et les compétences en programmation acquis durant mon cursus m'ont facilité l'étape de l'implémentation de l'algorithme sous Matlab.

La phase de vérification des résultats obtenus et la correction des erreurs est la partie où j'ai consacré le plus de temps durant mon stage car ça demande beaucoup de rigueur et de patience. De plus, le fait d'analyser les résultats et réfléchir sur chaque détail m'a permis de noter plusieurs points à améliorer dans l'algorithme et proposer des solutions possibles. C'était une étape très intéressante durant laquelle j'ai eu beaucoup des échanges d'idées avec mon maître de stage. Ce qui a renforcé ma motivation et mon intérêt pour le sujet de stage.

Une des difficultés rencontrées est les tests de l'algorithme. D'abord, il faut réfléchir sur les critères de réussite de l'algorithme et bien définir les tests et en plus, comme on ne dispose pas d'une base de données réelle qui nous permet de tester l'algorithme, cela nous a compliqué la tâche.

Enfin, ce stage était une expérience enrichissante sur le plan professionnel et personnel et il m'a fait découvrir le monde de la recherche et du développement. Les points mensuels avec l'équipe de travail m'ont permis d'acquérir une aisance à l'oral et améliorer mes compétences en communication. De plus, l'échange lors des réunions avec l'équipe qui est composée de différents profils m'a permis de me rendre compte de l'importance pour un ingénieur d'avoir un bagage pluridisciplinaire et de l'importance de communication entre les différents services pour le bon déroulement d'un projet.

BIBLIOGRAPHIE

[1] <https://www.automobile-entreprise.com/Resultats-des-ventes-de-vehicules,6933>

[2] Code de la construction et de l'habitation - Article R111-14-3 – (rédaction antérieure à la publication du décret 2016-968 du 13 juillet 2016)

[3] <https://www.connaissancedesenergies.org/le-marche-mondial-des-vehicules-electriques-en-chiffres-cles-180530>

[4] www.legrand.com