

PROJECT REPORT

CAR PLATOONING

5ISS – 2022

Working Team

AL ALJROUDI Alexandre
GENEAU Teo
KHALED Walid

DOUTRIAUX Elliott
LEON Florian
KARAOUD Rami

Tutors

Thierry MONTEIL – Professor / INSA
Jérôme THOMAS – Tech. Partner. Manager / ACTIA Group
Renaud HANUS – CTO / ACTIA Group

SPECIAL THANKS

We would like to thank the following people for their precious help within this project.

First ACTIA represented by **M. THOMAS** et **M. HANUS** for the great learning opportunity that this project has brought to our team and for their contacts with TERIA and Guide GNSS.

Then, **M. MONTEIL** for getting us in touch with Orange and for guiding us through this project.

We would also like to thank Orange and more specifically **M. GARDES** and **M. VIALLE** who gave us a precious help for our V2X solution.

We worked with an autonomous shuttle with a close collaboration with **M. DIEP** who explained us time to get the shuttle in hand, and who kindly answered to our numerous questions.

Finally, we really want to thank **M. BOUBACAR** who provided important hardware for our tests both for the shuttle and GNSS. He also brought us an essential help to understand the functioning of the shuttle and gave us a lot of his time at the end of the project.

SUMMARY

INTRODUCTION	6
I. PRESENTATION OF THE PROJECT.....	7
A. Contextualization	7
B. Specifications of the project	7
C. General architecture of the project.....	8
D. Sequence diagram.....	9
E. Project management	9
II. SATELLITE POSITIONNING	12
A. General presentation and choice of the receiver	13
B. Deployment of the solution	15
1. Hardware wiring	15
2. Service providers management	15
III. OBSERVATOR INTERFACE	19
A. CGA frame analysis	19
B. Monitoring systems.....	19
1. Dashboard interface	20
2. Live map interface.....	20
3. Google Hearth 3D Map interface	21
C. Drawing function.....	22
D. Precision comparison of GNSS tracking methods.....	23
IV. V2X IMPLEMENTATION.....	24
A. Contextualization	25
B. Main difference between V2X and C-V2X	25
C. Exchanged Messages	26
D. Example of 5G use in V2X: 5GCroCo by Orange project	28
1. Use of 5GCroco.....	28
2. Limits of the project.....	30
E. Solutions proposed by Orange	30
F. How will our solution work?	31
1. Server Unit.....	33
2. Master Unit	33
3. Slave Unit.....	35
V. SHUTTLE MANAGEMENT.....	36
A. Architecture of the shuttle	36
1. Context.....	36
2. Implementation of the architecture.....	38
3. Trajectory following algorithms.....	39
4. Problems encountered.....	40

CONCLUSION.....	41
ANNEXES.....	42
Annex 1 – TERIA free license	44
Annex 2 – TerraStar C-Pro Service license	46
Annex 3 – State of Art on GNSS positioning solutions	47
Annex 4 – State of art on V2X solutions	48
Annex 5 – Github with all our codes	49
Annex 6 – Roles distribution on the project.....	50
Annex 7 – CV's of team members	51

FIGURES SUMMARY

Figure 1 : List of team members	6
Figure 2 - Illustration of a truck platoon.....	7
Figure 3 - Global architecture of the project.....	8
Figure 4 - Global sequence diagram of the project	9
Figure 5 - List of sprints for project management	10
Figure 6 - Gantt diagram of the project	11
Figure 7 - General scheme of GNSS exchanges	13
Figure 8 - EXXIS GNSS-502 antenna.....	13
Figure 9 - List of receivers we compared.....	14
Figure 10 - List of software we used in the GNSS part	14
Figure 11 - Hardware installation overview	15
Figure 12 - Centiped base station map	16
Figure 13 - COM configuration for the computer	16
Figure 14 - Antenna offset scheme	17
Figure 15 - Calibration and configuration tutorial of the GNSS positioning.....	18
Figure 16 - CGA frame analysis for the interface	19
Figure 17 - Full dashboard monitoring system overview.....	20
Figure 18 - Map interface monitoring system overview	21
Figure 19 - Google Earth Pro monitoring system overview.....	22
Figure 20 - Scheme of the polygon problem	22
Figure 21 - Translation Algorithm checking how many time the point intersect with edges.....	23
Figure 22 - The algorithm field displayed	23
Figure 23 - Precision comparison of GNSS methods	24
Figure 24- V2X and C-V2X characteristics comparison	25
Figure 25 - TOD scheme	28
Figure 26 - HD Mapping scheme	29
Figure 27 - ACCA scheme	29
Figure 28 - V2X overview	32
Figure 29 - Picture of the autonomous shuttle	37
Figure 30 - Shuttle architecture scheme	37
Figure 31 - Shuttle topics organization	38

INTRODUCTION

Nowadays, precision farming is essential to our growing world. It allows better yields, increases production, and reduces costs. Technology can play an important role in this domain, and help to increase the performances of machines, yield, and optimization.

In this context, ACTIA Group approached INSA to work on a use case where IoT technology could help farmers to better control their machines, by allowing them to do platooning farming. Although this kind of solution already exists, ACTIA wanted to take it a bit further, and implement an innovative and scalable solution that reduce the quantity of needed equipment to enable platooning farming. Indeed, today precision farming solutions need huge tag networks dispatch on fields for them to work correctly.

In September, INSA entrusted us with this mission, and we worked since then to deliver a good solution.

In this report, we present in detail what were our different steps of development to meet ACTIA's specifications. We will detail everything we've done from our research, our tests, the problem we encountered and our final solutions.

In a first part, we will present how we organized ourselves to achieve this project.

Next, we will concentrate on the GPS positioning and the multiples solutions we tried to implement. We will see that using NRTK solutions appeared to be the best solutions. After that we will explain how we built the observation interface and shows the numerous functions we implemented in.

In a fourth part, we will develop our different the work we did to enable communication between vehicles using V2X protocol, from our research to the final solution.

Finally, we will explain what we did on the autonomous shuttle that we used as a slave, before concluding.

For this project, our team is composed of six students from INSA's Innovative Smart System course, coming from different formations.

Name	Formation
Teo Geneau	Automation & Electronic Double Diploma IoT master
Florian Leon	Computer Science
Alexandre Al Ajroudi	Telecommunication Double Diploma Business School
Walid Khaled	Embedded Systems & Telecommunication
Elliott Doutriaux	Automation & Electronic Double Diploma Business School
Rami Karaoud	Computer Science

Figure 1 : List of team members

I. PRESENTATION OF THE PROJECT

A. Contextualization

The project that we did this year is about creating a platooning solution for agricultural vehicles. The aim was to enable precise localization and communication in a field between vehicles and/or infrastructures.

Platooning is a method for driving a group of vehicles together. Originally, platooning solutions were used in transportation to optimize road congestion on highways. Platoons decrease the distances between cars or trucks using electronic, and possibly mechanical, coupling. This capability would allow many cars or trucks to accelerate or brake simultaneously. This system also allows for a closer headway between vehicles by eliminating the reacting distance needed for human reaction.



Figure 2 - Illustration of a truck platoon

The advantages of this method are numerous:

- Energy consumption decreasing;
- Augmentation of numbers of vehicles;
- Traffic management;
- Automated driving on highways reducing accidents;
- etc.

The particularity of our project is its application to the agricultural world. Indeed, it is wished to be able to contribute to the development of precision agriculture to, in a long-term goal, improve the harvest, as well as the increase of production and the reduction of inherent costs. Autonomous agricultural vehicles are used, however, with this project, there is a real will to go even further.

B. Specifications of the project

ACTIA Group, our industrial partner on this project, established some specifications:

- Track positions with a precision inferior to 20 cm;
- Track positions with only the receptor of the vehicle and without an anchor (they proposed Galileo HAS and PPP correction);
- Make an experimentation with two vehicles (controlled in speed and direction);
- Communication between vehicles and infrastructures should be done with C-V2X standard;

- The experience should be done on a flat field where vehicles only need to go straight.

In terms of deliverables, ACTIA stated one four reports:

- A state of art on the GPS technologies;
- A state of art on the V2V protocols;
- All the codes and architectures developed.

Also, INSA asked for:

- A final report on the project (written in English);
- An oral report on the project (in English too).

From those specifications, we established two objectives:

- The main objective is to be able to carry out an experiment of platooning between two vehicles. Platooning consists in controlling a "slave" vehicle with the help of a "master" vehicle by using V2X for vehicle-to-vehicle communication.
- Depending on the path of the master vehicle, the slave will have to follow it according to the commands received by the master.

C. General architecture of the project

From those different solutions, we implemented the following architecture.

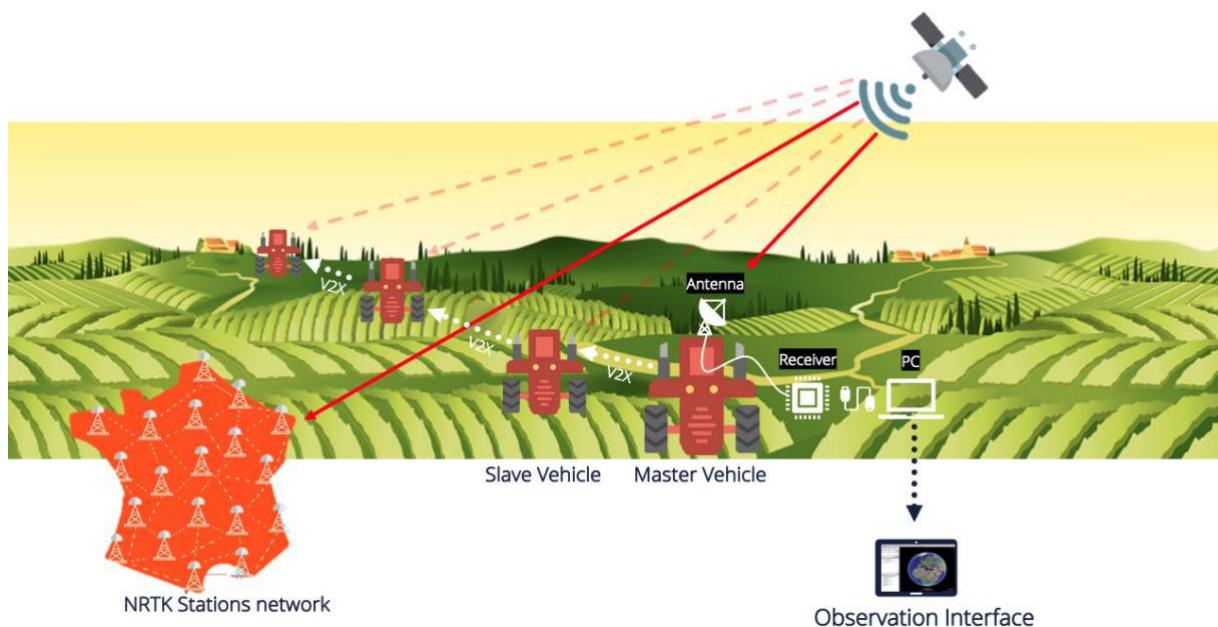


Figure 3 - Global architecture of the project

Our project aims to allow two vehicles to follow each other autonomously. We then follow the scheme of a master and slave scenario. The master vehicle follows a trajectory unknown to the slave vehicle which must then follow the same trajectory depending on the information it is given.

First, we focus on the position of the vehicles. Indeed, before thinking about a possible displacement, they must know with precision their locations in their environment. This positioning is usually done by GPS. In our case we used NRTK and PPP solutions to improve precision on the tracking.

Once this precision is achieved, we focus on the communication between the two vehicles. The goal here is to use a 5G connectivity linked to the V2X protocol, we speak here of C-V2X. This is a standardized communication protocol dedicated to connected vehicles. This protocol conveys essential information about the vehicles such as position, speed, or type of vehicle. Thus, it allows us to send orders from the master vehicle to the slave vehicle. We will see later that we finally only used V2X, because of the lack of 5G development in France.

However, once the information is transmitted, it must be processed to make the slave vehicle move forward. For our project, this vehicle is symbolized by an autonomous shuttle. We therefore need a trajectory tracking algorithm based on GPS coordinates.

D. Sequence diagram

In this part, we present the sequence diagram of all the communications that are exchanged between the different entities of our project. Note that this sequence diagram is very on a high level and shows only the principal exchange.

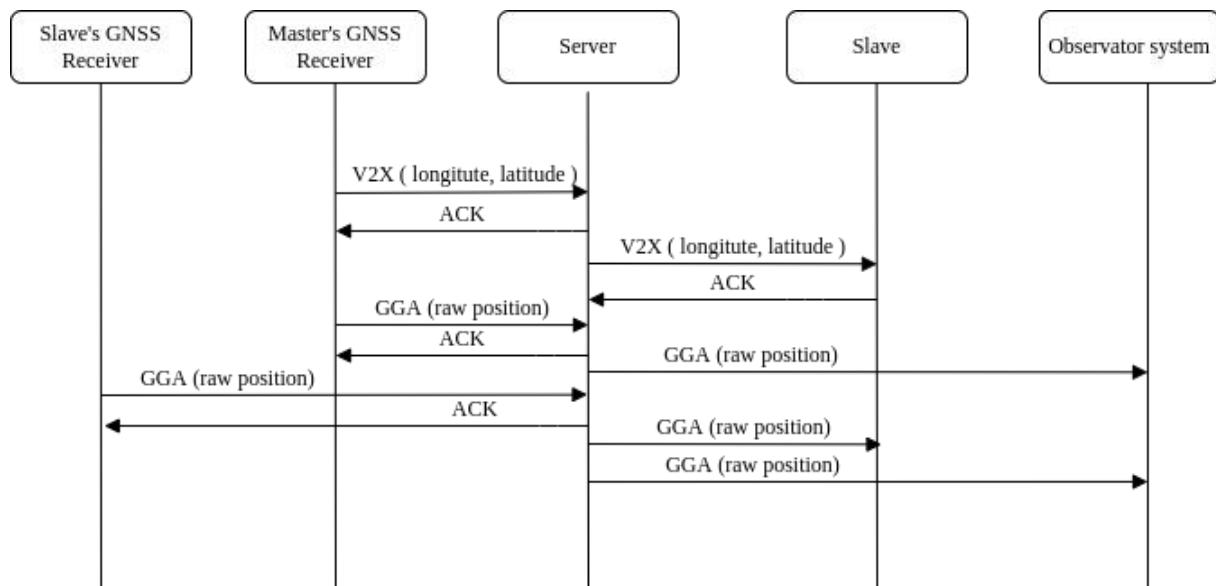


Figure 4 - Global sequence diagram of the project

We can notice that, at the middle, the server handles all the communications between the master, the slave and the monitoring interface.

E. Project management

Because of the numerous tutors in our project and the multiple exchanges that we had with them, we thought that it was a good idea to choose a flexible project management strategy.

Indeed, the project was made to have an evolving objective, for example our first results from the state of arts could have had an impact on the expectations of the different tutors, same for our first technical results, etc.

Thus, we chose to implement the "SCRUM" project management agile methodology, which allowed us to have a flexible approach on our numerous tasks.

The result of our sprint is listed below:

AT RISK	TASK NAME	FEATURE TYPE	MEMBERS	STORY POINTS	START	FINISH	DURATION in days	STATUS	COMMENTS
<input type="checkbox"/>	SPRINT 1	SPRINT 1			10/15	11/30	46	Complete	
<input type="checkbox"/>	First contact with tutors	GENERAL	All the team		10/15	10/16	1	Complete	
<input type="checkbox"/>	RTK State of art	GPS	Teo G. - Elliott D.		10/16	11/30	45	Complete	
<input type="checkbox"/>	V2X State of art	V2X	Rorian L. - Walid K.		10/16	11/30	45	Complete	
<input type="checkbox"/>	Project management tools configuration	GENERAL	Teo G.		11/01	11/07	6	Complete	
<input type="checkbox"/>	SPRINT 2	SPRINT 2			12/01	12/31	30	Complete	
<input type="checkbox"/>	API's test (Centipede/Terra/ Premium RTK)	GPS	Teo G.		12/01	12/08	7	Complete	
<input type="checkbox"/>	NRTK Setup & tests	GPS	Teo G.		12/09	12/31	22	Complete	
<input type="checkbox"/>	API's test V2X	V2X	Rorian L. - Walid K.		12/01	12/12	11	Complete	
<input type="checkbox"/>	MQTT Implementation ???	V2X	Rorian L.		12/12	12/31	19	Complete	
<input type="checkbox"/>	Understand the shuttle environment	SHUTTLE	Alexandre A. - Elliott D. - Walid K.		12/01	12/08	7	Complete	
<input type="checkbox"/>	Implement ROS on the raspberry	SHUTTLE	Alexandre A. - Elliott D.		12/09	12/31	22	Complete	
<input type="checkbox"/>	Observer interface	OBSERVATOR	Teo G.		12/12	12/31	19	Complete	
<input type="checkbox"/>	SPRINT 3	SPRINT 3			01/01	01/20	19	Complete	
<input type="checkbox"/>	Shuttle tests	SHUTTLE	Elliott D. - Alexandre A. - Walid K.		01/01	01/07	6	Complete	
<input type="checkbox"/>	Integration of V2X/GPS/Observator	V2X/GPS/OBSERVATOR	Teo G. - Rorian L.		01/01	01/07	6	Complete	
<input type="checkbox"/>	Integration of V2X/GPS/Observator with the shuttle	GENERAL	Teo G. - Rorian L. - Walid K. - Elliott D. - Alexandre A.		01/08	01/19	11	Overdue	Problems found with the installation of MQTT lib on the raspberry
<input type="checkbox"/>	Report Redaction	GENERAL	Teo G. - Rorian L. - Walid K. - Elliott D. - Alexandre A.		01/15	01/19	4	Complete	

Figure 5 - List of sprints for project management

As we can see we did three sprints, that we can summed up like this:

- SPRINT 1: Theoretical part (self-learning on the technologies involved, state of arts, design of the project);
- SPRINT 2: Practical part (Development of the different functions);
- SPRINT 3: Implementation part and report.

As we can notice, we had difficulties integrating V2X/GPS/monitoring tasks with the shuttle. We will explain later what happened in this part.

Innovative Project – Car Platooning

On a time perspective, our project has been executed this way:

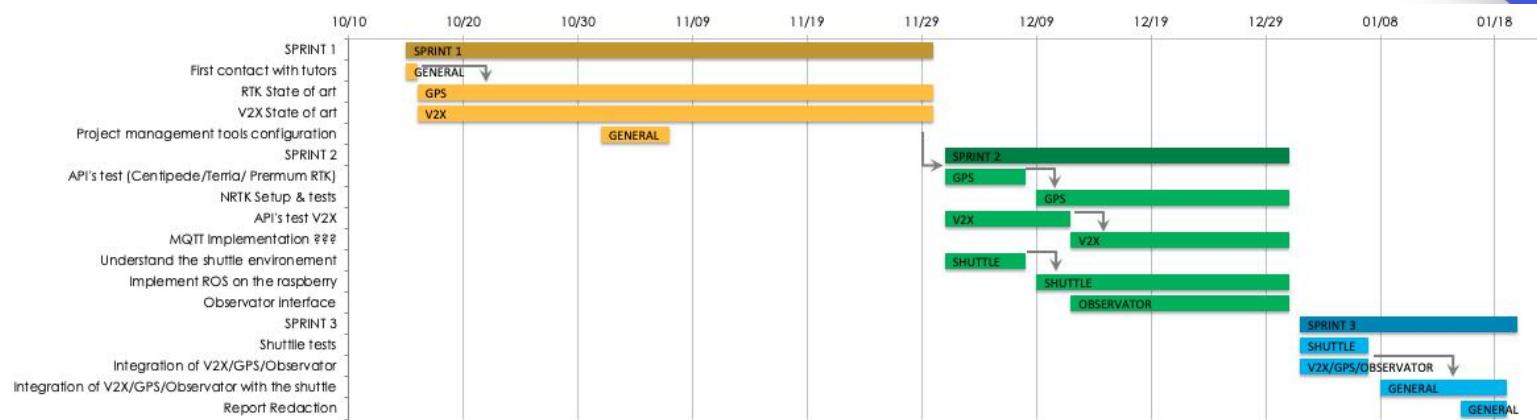


Figure 6 - Gantt diagram of the project

In the next parts, we will develop all those tasks by thematic (V2X, GPS, MONITORING, SHUTTLE).

In terms of project management tools, we principally used Trello. This application allowed us to clearly list all the tasks we had to sort them by thematic and by group of workers. Also, we automated some functions automatically with the tool Buttler.

II. SATELLITE POSITIONNING

For this chapter, it is suggested to look at the state of art attached with this document about satellite positioning where we describe the principle of satellite positioning and explain how localisation data are obtained and why they must be corrected

As we explained, to carry out our platoon function, ACTIA imposed certain constraints on us:

- Regarding cost reduction and scalability of the solution, one of our criteria is to dispense with ground reference beacons.
- We need to achieve an accuracy for position measurements of less than 20 cm.

The navigation system for this project must follow trajectories defined by coordinates (GNSS for example), it is essential that the vehicle is well located in real time, so we can check through the observation system that it follows the correct instructions, that there is no unreasonable drift and modify the cartography of the route to be performed.

The system will have to meet certain constraints: it will have to guarantee an accuracy of less than 20cm. Thus, the system's location function must calculate the position of an agricultural vehicle at a certain frequency with a maximum margin of error of 20 cm.

There are other types of localization systems (hybrid localization, BLE, cellular network, Lidar, magnetic field, infrared, vision, etc.), however, they have the same shortcomings: they are technologies more suitable for indoor applications and having a need for medium to low coverage. Therefore, we have retained as a solution the satellite-based localization system using GNSS constellations allowing a large coverage.

To meet the constraints of our project, terrestrial localization systems have been ruled out. It was decided to use satellite localization via GNSS, to use our system in the open air, in a field of several hectares and to reach a centimetric precision of less than 20cm. For that, several methods are possible, nevertheless, the most interesting remains the NRTK technology, allowing to answer our needs while respecting our constraints: precision of the order of 1 or 2cm, low cost (need for a single receiver) as well as a low convergence time.

Multiple GNSS receivers were meeting our needs, a thorough analysis of their technical capabilities was necessary to conclude if we could use them to obtain a position and apply NRTK/PPP corrections to achieve an accuracy below 20cm.

Note:

- NRTK means Network Real Time Kinematic, it allows a receiver to obtain corrections from a network of reference stations passing by internet using a NTRIP client to connect to an NTRIP server. NTRIP is the protocol used to exchange corrections messages with RTK using RTCM frames.

- Precise Point Positioning (PPP) works differently since the rover stations retrieve the corrections from geostationary satellites instead of using internet.

A. General presentation and choice of the receiver

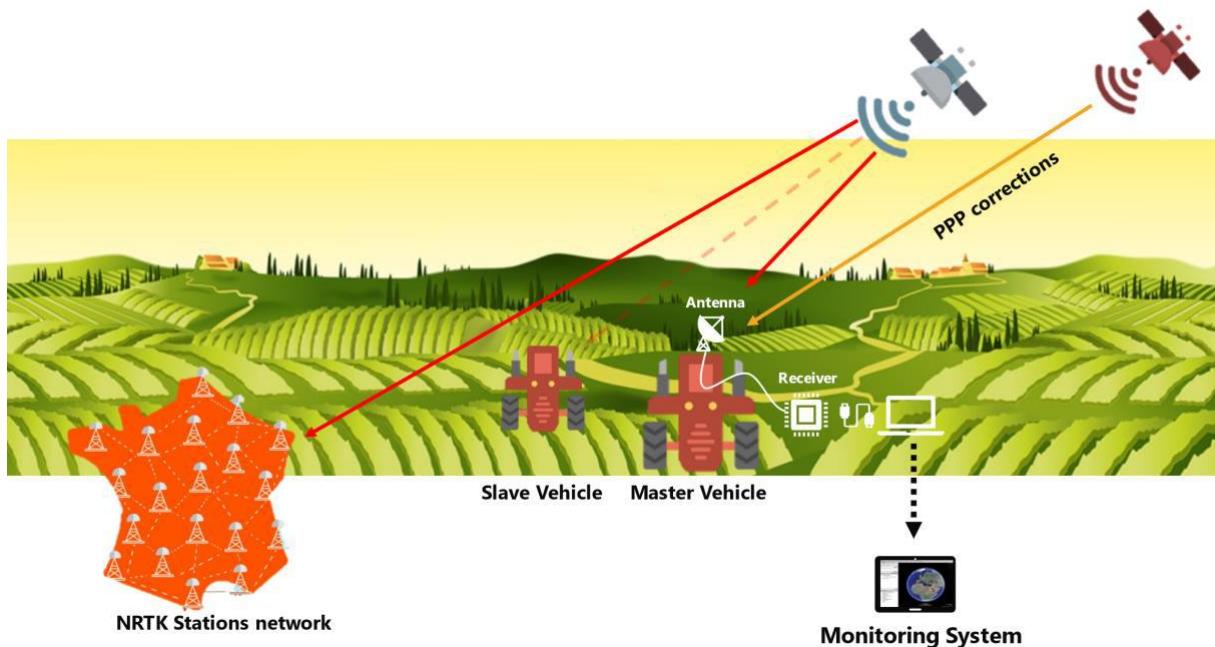


Figure 7 - General scheme of GNSS exchanges

Let's take again the general scheme that we used in the precedent part, with precisions on GNSS exchanges.

As you can see in the picture above, the master has an antenna. We used a EXXIS GNSS-502 antenna to observe the signals from satellites, we send those signals to the receiver which compute them to obtain GGA frames with the longitude, latitude and altitude contained inside the frame (using the NMEA protocol) and we retrieve them through USB before sending them with MQTT to our remote monitoring system and finally we display them.



Figure 8 - EXXIS GNSS-502 antenna

Plugged to that antenna, our receiver will have to be compatible with NRTK and PPP corrections, for that, it will have to:

- Perform phase measurements;

Innovative Project – Car Platooning

- Have a dual-frequency antenna compatible with the receiver;
- Accept correction frames in RTCM 3 format;
- Be able to connect to the Internet or indirectly using a module (WiFi, Ethernet, Bluetooth, SIM card);
- To have the RTK correction algorithms to perform the calculations;
- Manage L-Bands.

Here is the list of materials that we tested:



Figure 9 - List of receivers we compared

After an in-depth study of the specifications of each one, we observed that only Novatel's PwrPAK7-E1 receiver is suited for our application as the Adafruit and U-blox receiver can't manage NRTK/PPP corrections.

Here is the list of software used in this part of the project:

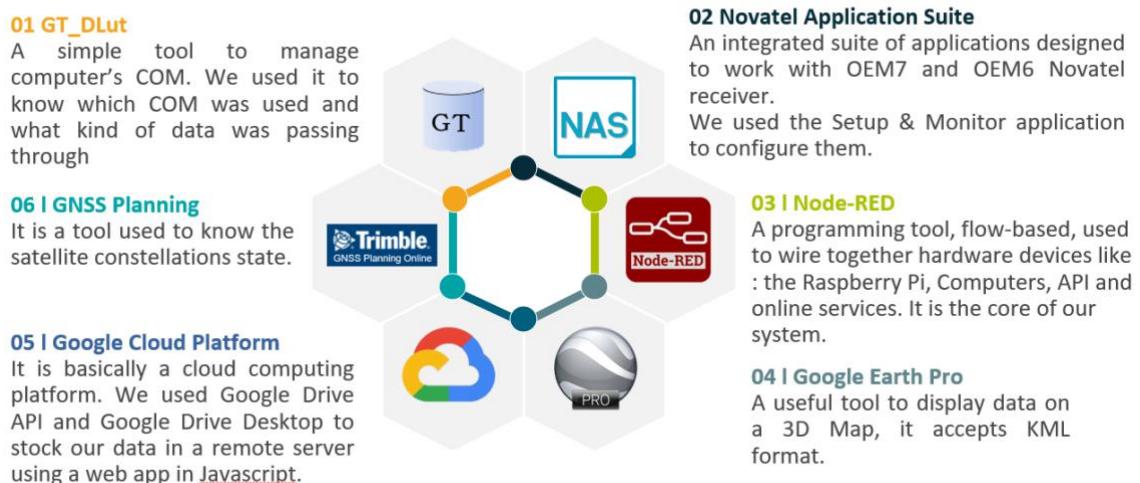


Figure 10 - List of software we used in the GNSS part

B. Deployment of the solution

In this part we explain what the steps were, once we chose our receiver, to deploy our solution.

1. Hardware wiring

Regarding the wiring of this, we first had to mount our receiving system, as we can see on the installation scheme below, we had to connect the receiver (2) with the GNSS antenna (1) using the antenna connector (ANT) (3). Then, we connected the receiver to the computer using the communication ports and finally we connected the supplied power cable to the power port on the receiver (6) ensuring that a 2A slow blow fuse is incorporated in the power wiring to protect the receiver.

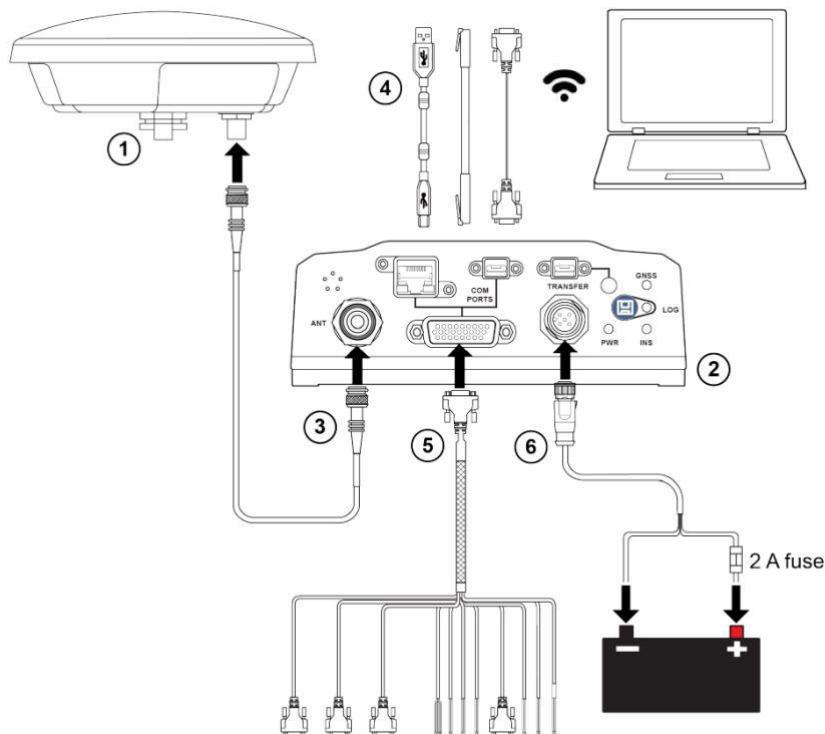


Figure 11 - Hardware installation overview

2. Service providers management

We worked with several service providers, to obtain NRTK corrections we used:

- **Premium Positioning service**, ACTIA obtained a free license for us to test their service, that service offers a full European coverage;
- **TERIA service**, we negotiated a free licence and made a quote to obtain a purchase order (as you can see in annex 1), that service offers a full European coverage;
- **Centipede service**, it is a collaborative project with free access and open source. It offers a national coverage only and it is used by INRAE and CNRS.

It is necessary to check if our localization is covered by the service provider network.

Innovative Project – Car Platooning

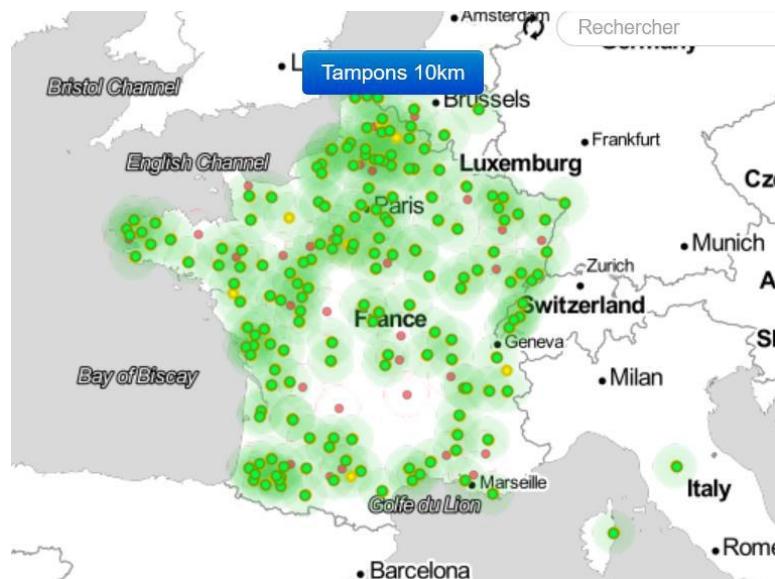


Figure 12 - Centiped base station map

Now, it is essential to configure our receiver to be able to process the NRTK corrections. It is necessary to preinstall Novatel's USB drivers in order to make possible the communication between a Novatel receiver and a computer using a USB port, indeed, those drivers will provide virtual serial ports. It is also important to install Novatel Application Suite (NAS) to configure properly the receiver, and that is why we installed the USB drivers as NAS uses COM ports to communicate. GT_DLut must be installed too, indeed we need to know which port is used and what is passing through, that is what GT_DLut is made for. We must ensure that both the receiver and the computer have the same COM configuration (same Baud rate, parity, etc.).

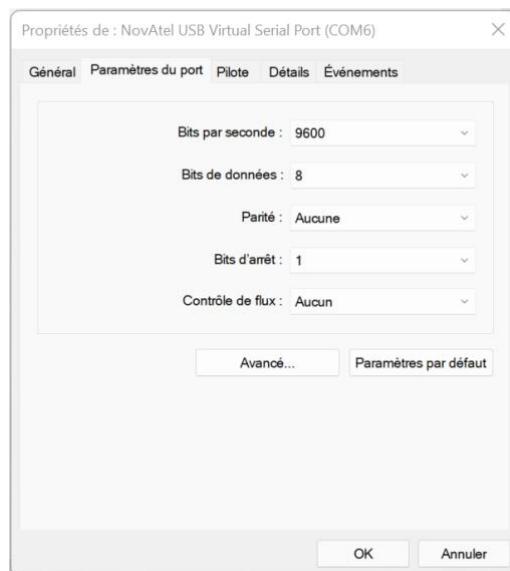


Figure 13 - COM configuration for the computer

There are two methods to configure the receiver using NAS software:

- The “manual” one, sending terminal command;
- The “user friendly” one, using the software interface (HIM).

Both offer some advantages, for example with the manual method we can create configuration file and then load them to reconfigure at any time the receiver.

A calibration must be done before the real configuration part, for example we have to measure and set the distance between the center of navigation of the receiver to the antenna phase center (Antenna Lever Arm).

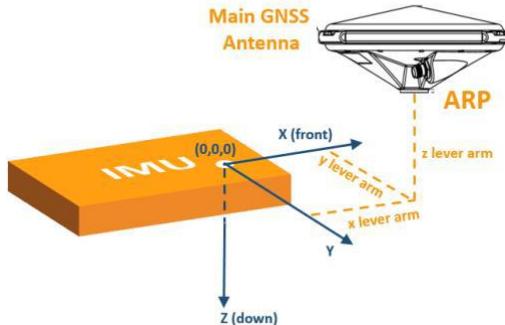


Figure 14 - Antenna offset scheme

To obtain corrections from the service providers we must connect to their network, to their NTRIP server. Hopefully, our receiver is embedded with an NTRIP client/server, we just need to configure it properly to manage to retrieve the correction frames. We have to use the configuration window of NAS and go to the positioning tab to configure the receiver in the receiver (rover) mode. The NTRIP COM ports must be configured, these are the ports used when the receiver is acting as an NTRIP client, the receiver must have an internet connexion, that is why the Wi-Fi must be configured in the network tab before. Then, to configure the NCOM ports, we must enter the domain, port number, the mountpoint of the network and the login parameters. They are given by the service providers to reach their networks. We also have to indicate what it receives in Input channel (RTCM3 correction frames) and what it is sending in Output channel (GGA positioning frames, to indicate the network his localization).

We can check if we are receiving the corrections directly in the GGA frames, using the quality indicator number (4 and 5 for NRTK corrections).

For PPP corrections, we could not obtain PPP service from TERIA, that is why we decided to negotiate with TerraStar and Novatel in order to obtain a free trial license and obtain a TerraStar C-PRO service (annex 2). Those negotiations lasted two and a half months. Indeed, we had to ask for a subscription to their service, explain our project and negotiate the terms of the contract to use it for free.

We had to communicate them our Novatel product serial number (PSN) that we could only obtain with the terminal command LOG VERSION here in red:

- **LOG VERSION**
- <OK
- [USB1]
- <VERSION USB1 0 72.5 FINESTEERING 2189 408499.808 02000000 3681 16409
- < 11
- < GPSCARD "DDNRNNTBNP1" "**BMHR20420297X**" "OEM7700-1.02"
- "OM7CR0800RN0000" "OM7BR0100RB0000" "2020/Oct/15" "14:06:15"
- < OEM7FPGA "" "" "" "OMV070001RN0000" "" "" ""

Then, we had to set “switch on the PPP corrections” in the Configuration window and positioning tab and select the right L-Band beam to use.

We can check if we are receiving the corrections directly in the GGA frames, using the quality indicator number (6 for PPP corrections).

To conclude on this part, we made a brief recipe for receiver calibration and configuration to simplify explanations.

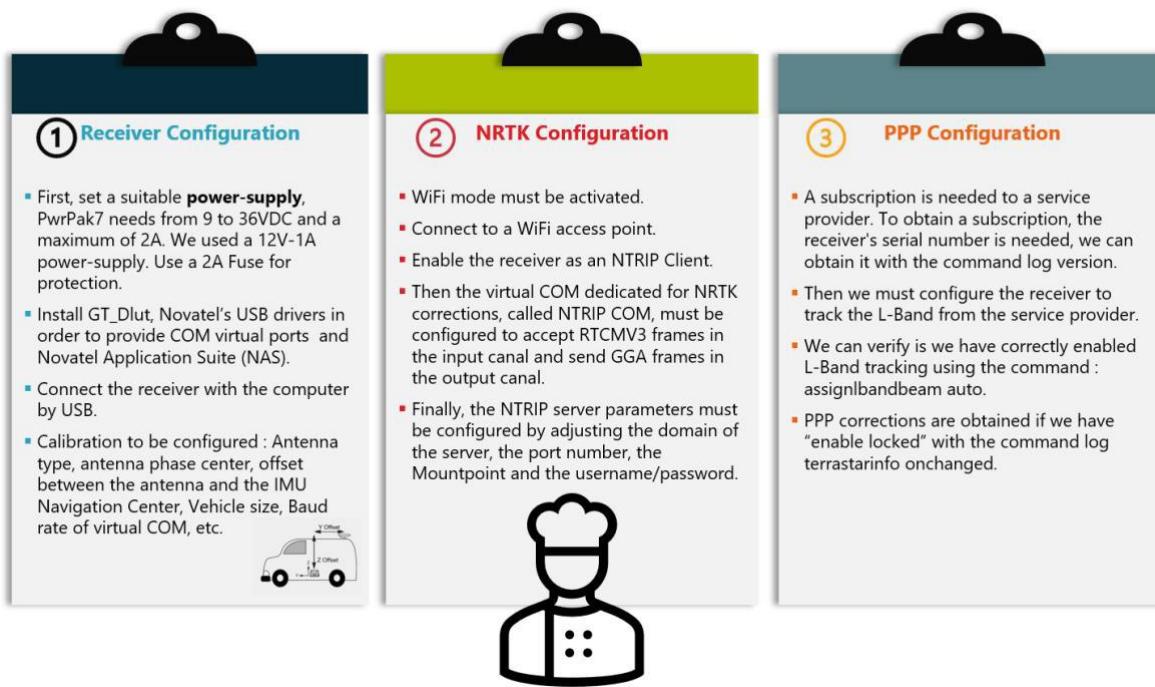


Figure 15 - Calibration and configuration tutorial of the GNSS positioning

In the next part, we will see how the monitoring interface helped us measuring the precision of NRTK and PPP methods.

III. MONITORING INTERFACE

In this part, we present the monitoring interface we developed, and the different functions we implemented in it.

A. CGA frame analysis

To develop our interface, we principally used Node-RED to split and parse the GGA frames and we isolate the part we need (latitude, longitude, and the quality indicator) with JavaScript functions as we can see in the functional scheme below:

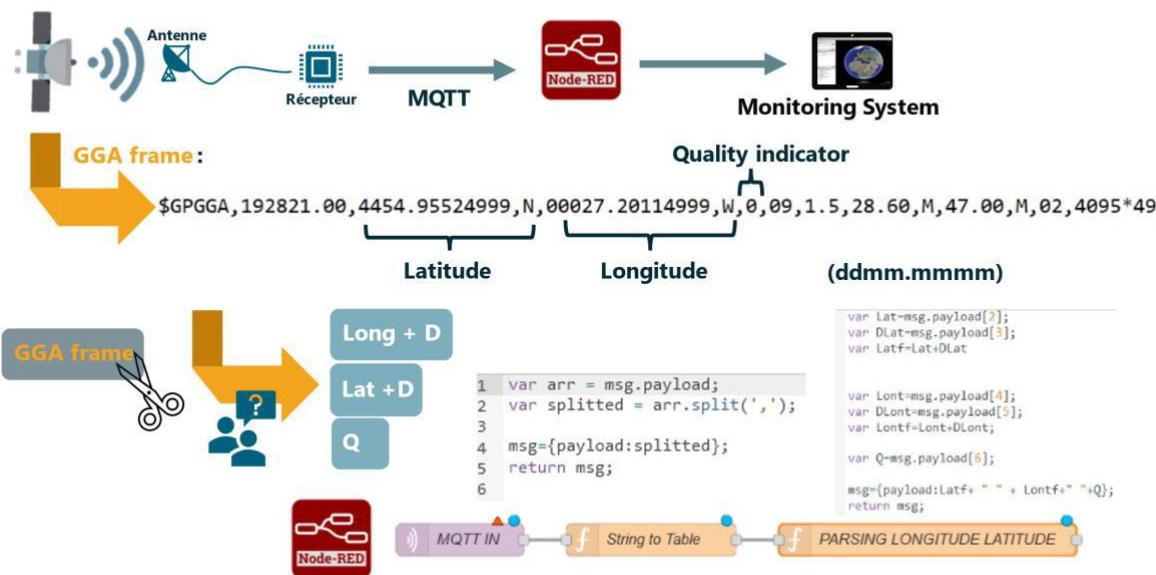


Figure 16 - CGA frame analysis for the interface

As we can see, the receiver publishes its data in a topic on a MQTT server. Our Node-RED algorithm subscribes himself to that topic, before displaying the localization of the platoon we have to retrieve the part from the GGA frame that we are interested in.

For that, a function is used to split each term of the frame separated with a comma and store each of them in a table, then a second function node is used to select only the boxes in the table containing the desired values.

B. Monitoring systems

From those data, we created 3 types of monitoring system:

- A full dashboard with all included in HTML;
- A map interface included in Node-RED;
- A Google Hearth 3D Map interface.

1. Dashboard interface

For the full dashboard monitoring system, we retrieve the sensor values from the vehicles using MQTT or oneM2M and then we use a node creating an HTML page which display the value retrieved.

As we couldn't access to the vehicle sensor values, we simulated them here. We were also able to use some buttons to command some actuators using POST/PUT http method. Finally, we included a weather tab to know if we could use the vehicle (sensible to rain) and a GNSS planning to know the availability of the satellite, indeed we need at least 5 satellites to obtain correct data.

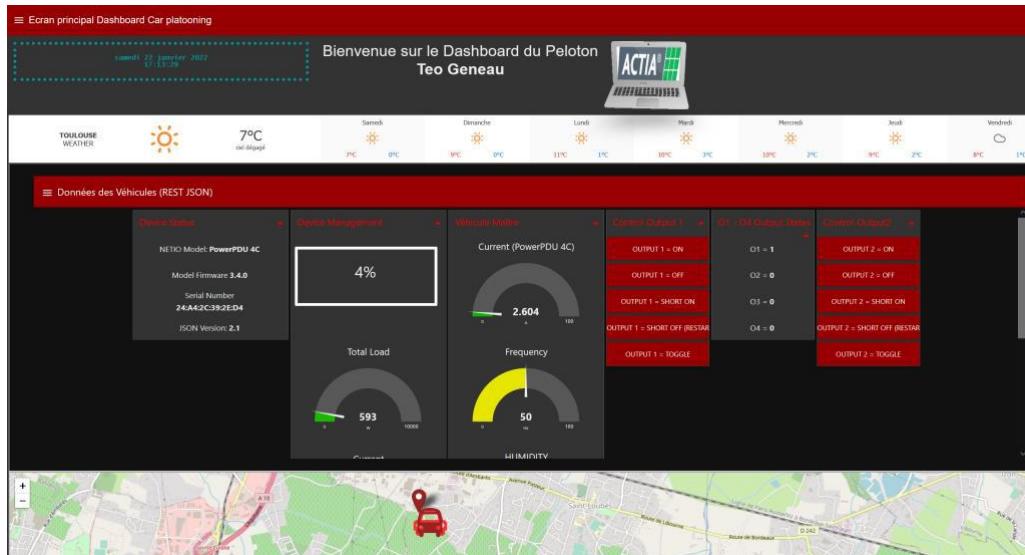


Figure 17 - Full dashboard monitoring system overview

2. Live map interface

Regarding the map interface, we used Node-RED to develop it. We created JSON files with the latitude and longitude we just obtained from the GGA frame, and we included a colour indicator depending on the quality of the measure of the frame.

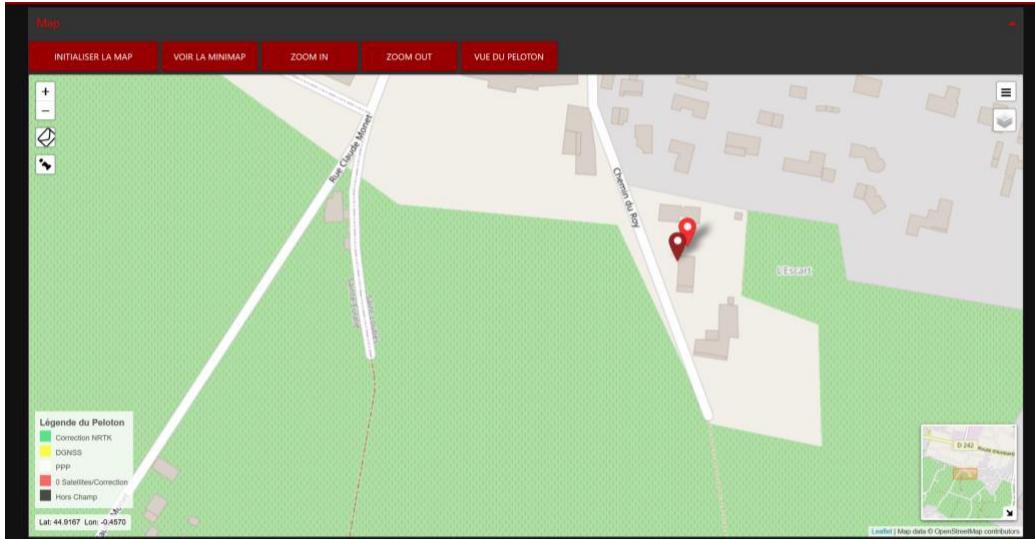


Figure 18 - Map interface monitoring system overview

We included an HIM with a legend to explain to which type of correction the colour refers to, a minimap button to display the minimap, a zoom in and zoom out button to control better the view, a button to zoom directly to the platoon, a mail button to enter the user mail in order for him to receive the coordinates in his box mail and finally an information button with an audio tutorial explaining how to use this map interface.

3. Google Earth 3D Map interface

For the last monitoring system, we used KML files, that we modified according to the new localization data we were receiving from the vehicle in real time. We could also display an HTML code, that we had in the KML file, to display dashboard features directly on the map. However, Google Earth Pro doesn't offer that feature, that's why we had to use another KML file. In order to use the network link function, we created a link between the KML file and the refreshed coordinates. Finally, we updated the coordinates on Google Earth Pro, refreshing them every 1 second (by refreshing the link).

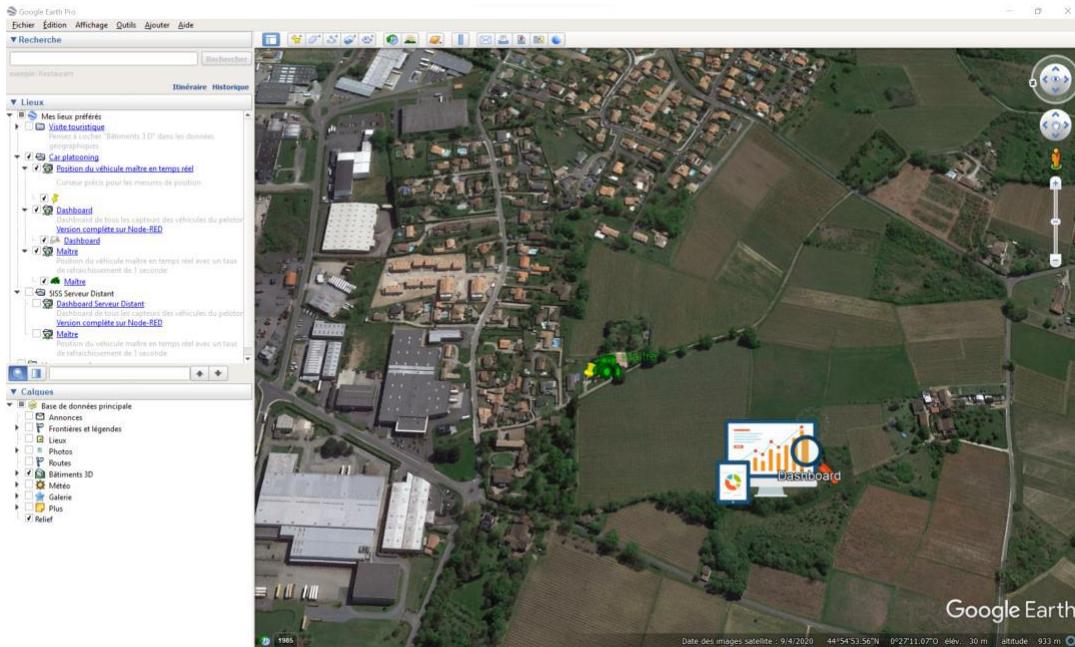


Figure 19 - Google Earth Pro monitoring system overview

C. Drawing function

One of the best features of those monitoring system is that, both in the Google Earth Pro map and the Node-RED Map interface, the user is able to draw a polygon representing his agricultural/farm field and see if his platoon is inside or outside the delimited area. Indeed, we developed an algorithm that compute and display on the monitoring system if the platoon is outside the drawn field, it also sends an emergency message to the vehicle using MQTT, for it do an emergency stop.

More precisely, our algorithm checks if a given point is inside or outside a polygon as you can see in the picture below:

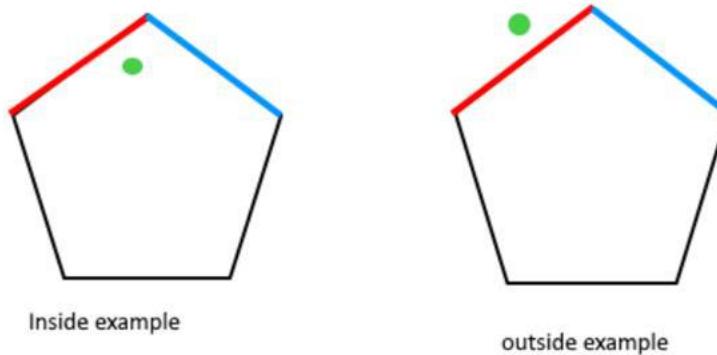


Figure 20 - Scheme of the polygon problem

To do that, the algorithm do a translation with the point to the right, extending it to infinity, then it counts the number of times that the line intersects with polygon edges. If the count is odd, the point is inside the polygon, else it means that the point is outside. We can easily verify that with the image below:

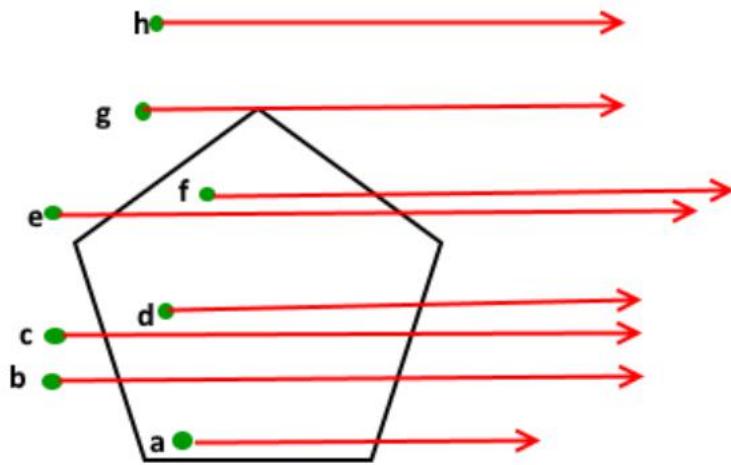


Figure 21 - Translation Algorithm checking how many time the point intersects with edges

On our Node-Red, we had to retrieve the coordinates of the drawn field (the vertices of the polygon) and compare them with the coordinates of the points in real time. Because the draw can be any kind of polygon, we created a matrix containing the coordinates of each vertex of the polygon, then we used a function allowing to compute any kind of surface, and finally we displayed the draw on interfaces map. On the Google Earth map, we changed the colour of the displayed platoon in black when it was outside the field, to visually notify the user.

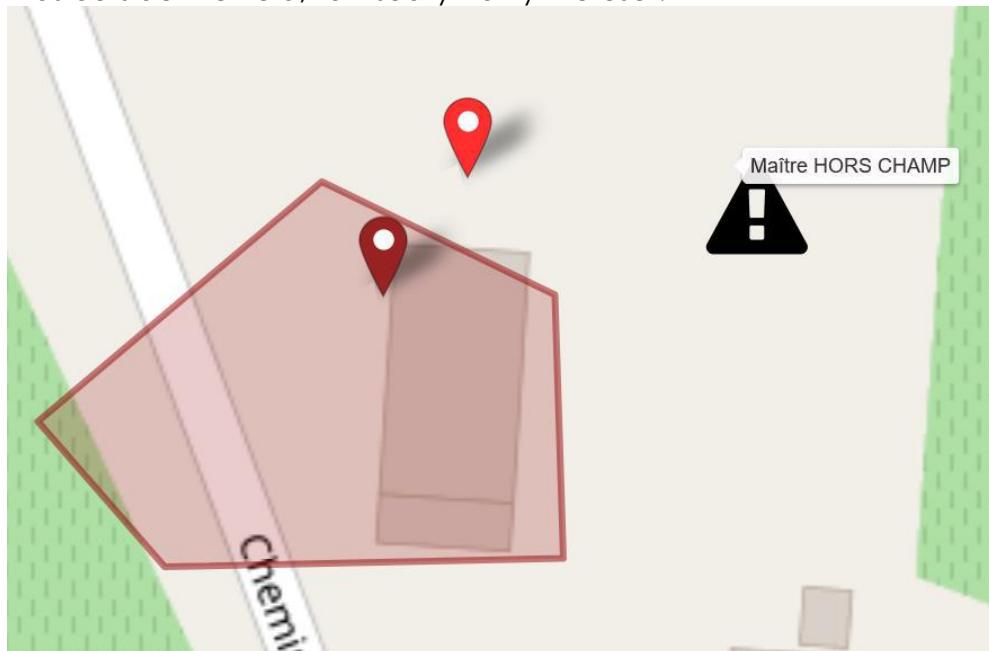


Figure 22 - The field algorithm displayed

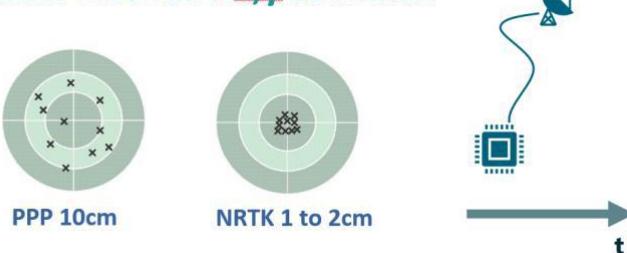
D. Precision comparison of GNSS tracking methods

We measured the accuracy of each solution with the help of the GUIDE-GNSS metrology laboratory.

We used two different methods. First, we used the static method consisting in observing a fixed receiver and antenna and analysing the variance of the measurements. Then, we also used a relative method which consist in a translation of several centimetres of the receiver/antenna, measure this translation from point A to point B using a measuring tape and then the coordinates obtained and compared the two with a difference to obtain a delta of error, representing the accuracy of our system.

For that we used several tools like the measuring tool from Google Earth Pro, the measuring tool from the software Novatel Connect, an online calculator and some theoretical calculations. **We nearly obtained the same results with each method: about 1 to 2 cm of accuracy for NRTK and up to 10cm accuracy for PPP corrections.**

Static method : x,y constant



Relative method : t constant

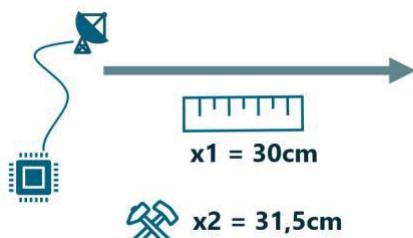


Figure 23 - Precision comparison of GNSS methods

We reached our objective: to obtain an accuracy below 20cm! Nevertheless, PPP has a time to converge that is higher than 60s, which means that every time that we lost the connection, we had to wait more than 60sec to reach again that accuracy, while with NRTK the time to converge is lower than 10s. For a real-time application, NRTK is more suitable than PPP, which must be increased with RTK to reduce its convergence time.

Also, ACTIA asked us to try the Galileo High Accuracy Service (HAS), nonetheless, our receiver couldn't manage E6B signals (which is the satellite signal band used for HAS) and to compute them. When we asked, GUIDE-GNSS confirmed us that our receiver was not compatible.

IV. V2X IMPLEMENTATION

A. Contextualization

The purpose of this part is to enable communication between two or more vehicles using the Vehicle to Anything (V2X) protocol. Usually, this protocol lays on specific hardware called On-Board Units (OBU) and Road Side Units (RSU) and the messages are exchanged with a special network. The network in the V2X standard is based on the ITS band 5.9 GHz which is close to wifi but has a relatively short range. Besides this, we have Cellular-V2X or C-V2X that is based on 5G. This is the technology wanted by Actia for their project. For more information, please see the state of the art in annex.

B. Main difference between V2X and C-V2X

	C-V2X: PC5	802.11p	C-V2X: PC5 ADVANTAGE
Synchronization	Synchronous	Asynchronous	Spectral Efficiency. Synchronization enables time division multiplexing (TDM) and lowers channel access overhead.
Resource Multiplexing Across Vehicles	FDM and Time Division Multiplexing (TDM) Possible	TDM Only	Frequency Division Multiplexing allows for larger link budget and therefore longer range - or more reliable performance at the same range
Channel Coding	Turbo	Convolutional	Coding gain from turbo codes leads to longer range - or more reliable performance at the same range.
Retransmission	Hybrid Automatic Repeat Request (HARDQ)	No HARQ	Leads to longer range - or more reliable performance at the same range.
Waveform	SC-FDM	OFDM	Allows for more transmit power with the same power amplifier. Leads to longer range - or more reliable performance at the same range.
Resource Selection	Semi-persistent transmission with relative energy-based selection.	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA-CA)	Optimizes resource selection with selection of close to 'best' resource with no contention overheads. By contrast 802.11p protocol selects the first "good enough" resource and requires contention overhead.

Source: [5GAA](#)

Figure 24- V2X and C-V2X characteristics comparison

C. Exchanged Messages

In this part we list all the messages that we can exchange.

1. CAM: Cooperative Awareness Message

The purpose to share basic information about a vehicle

It includes:

- Type of vehicle
- Speed
- Position
- Acceleration
- Heading- Light/siren status
- etc.

Technical specifications:

- Message size → 50 - 100 bytes
- Broadcast timing → 100ms - 1s

2. DENM: Decentralized Environmental Notification Message

The purpose to broadcast alerts about events on the road.

These events can be:

- Accident
- Weather alerts
- Traffic jams
- Work
- etc.

Can be sent directly by RSUs and automatically by vehicles to alert their neighbors.

The vehicles that receive this information decide on its relevance according to the history.

Technical characteristics:

- Message size → 50-400 bytes
- Broadcast timing → every 100 ms

3. CPM: Collective Perception Message

The purpose this is the "I see someone there" message as opposed to CAM ("I am here")

Vehicles with smart sensors and/or cameras can share information with other vehicles but also about "unconnected" vehicles.

It includes information similar to CAM but abstract.

Technical characteristics:

- Message size → 50 - 1400 bytes
- Broadcast timing → every 100ms

TIM: Traveller Information Message

Electronic version of traffic signs for a circular area or path with defined Shared information:

- Speed limit
- One-way street
- Road conditions such as an accident or slippery road

Returns a code which is then converted into sentences:

268 12594 8721 → Speed Limit 50 km/h

Note: The US version not usable in Europe.

IVI: In-vehicle Information message

EU version of the TIM message but more precise, for example on the type of vehicle:
"Speed limit 80 km/h for trucks larger than 15t" → Can be used to display information on a HUD.

Technical data:

- Message size → 100 - 400 bytes
- Broadcast timing → every 1s

PCM: Platooning Control Messages

The purpose to enable formation of a platoon and coordination of movement
To form a platoon, vehicles exchange:

- Engine power
- Braking power
- Vehicle weight
- Vehicle dimensions
- etc.

Once the group has been formed, speed and braking can be coordinated to keep the distance to the vehicle to a minimum while keeping a safety margin.

Technical Specifications:

- Message size → 50 - 200 bytes
- Broadcast timing → every 100ms

Although these messages would help us facilitate the implementation of the project, they are not yet officially implemented in the standard, the final submission of the project is only scheduled for March 2022 and thus not usable for our project.

D. Example of 5G use in V2X: 5GCroCo by Orange

We present here a project that seeks to ensure the quality and continuity of service for customers (connected cars) during their borders crossing, this project is in cooperation with several partners from several areas such as mobile operators, telecom technology providers and road authorities.

The vehicle being connected to the network of country 1 enters country 2, it remains connected to its local network for a while until it loses synchronization, at which point an update and search for a network is made and it connects to the network of country 2 and receives an IP address (ROAMING).

The project also seeks to have an alert service by messages that are exchanged between vehicles passing through the cloud to warn different users of potential dangers on the road.

5G antennas are deployed all along the edges of highways to provide connectivity to vehicles in proximity.

Real-life trials are currently being conducted between France and Germany and Luxembourg to test and evaluate this new technology.

1. Use of 5GCroco

a) TOD (Tele Operated Driving)

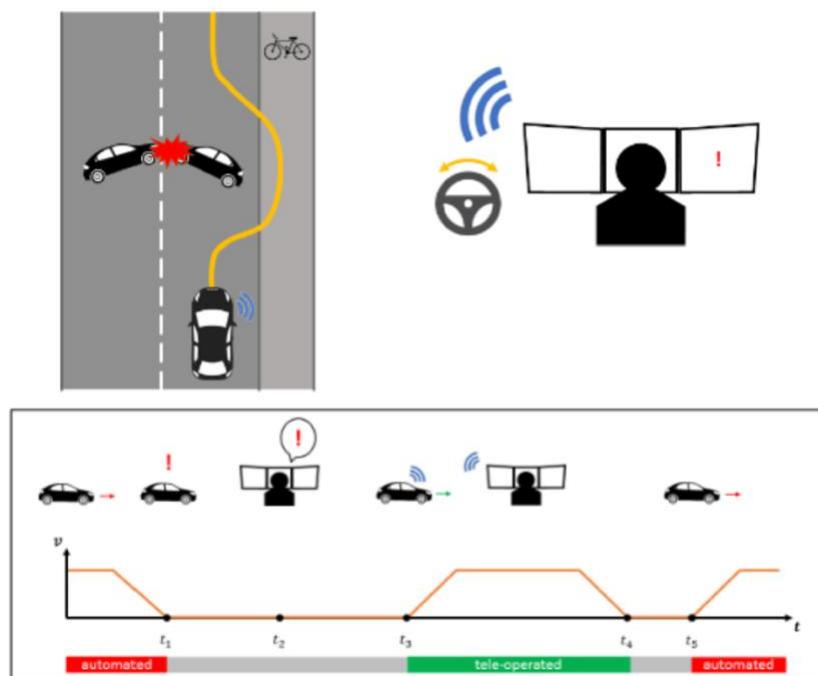


Figure 25 - TOD scheme

b) **HD Mapping**

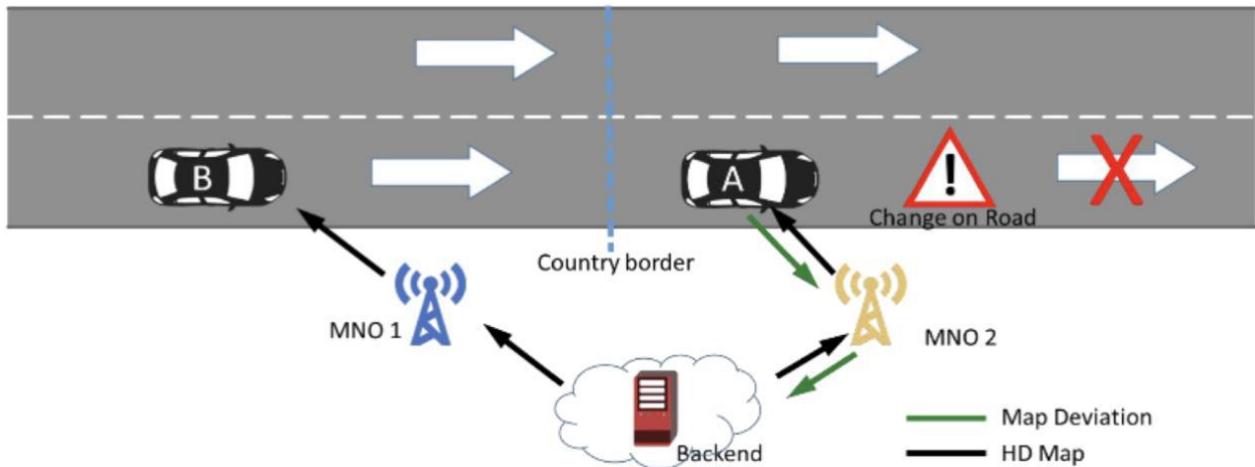


Figure 26 - HD Mapping scheme

c) **ACCA (Anticipated cooperative collision avoidance)**

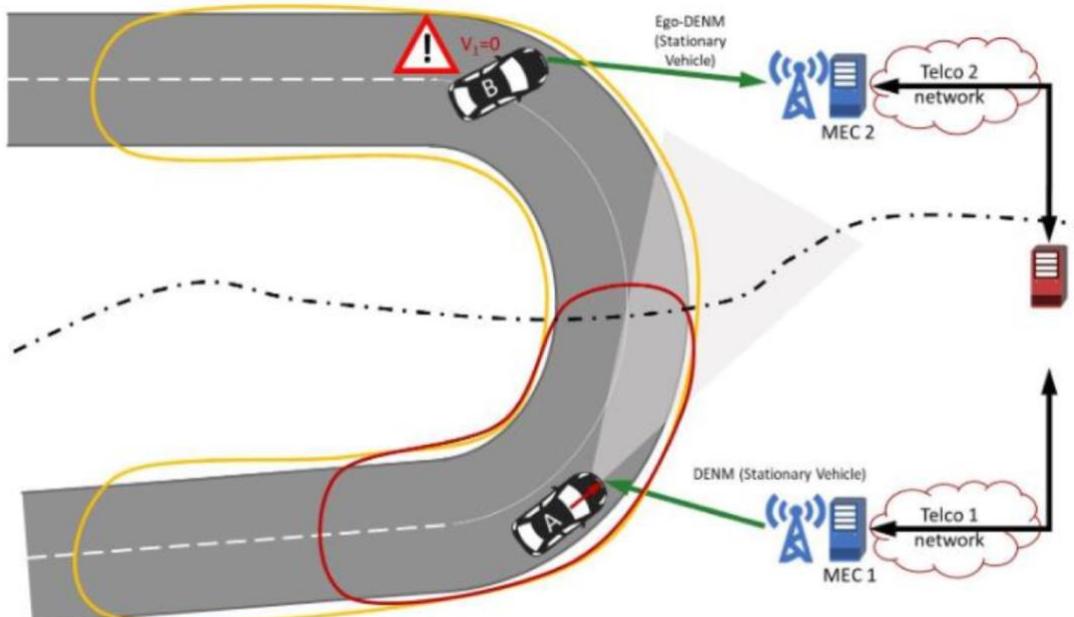


Figure 27 - ACCA scheme

Source : https://5gcroco.eu/images/templates/rsvario/images/CLEEN_WS.pdf

2. Limits of the project

Following the different meetings organized with Orange, we identified together several limits constraining the project. However, we also determined a way to bypass these problems to complete the V2X part.

a) 5G support for testing

5G dedicated to C-V2X will not be deployed in time for our project. However, testing it using only the IEEE 802.11p standard is not mandatory.

Indeed, the standard define only the messages exchanged, the tests can be done with any network layer, i.e., WiFi or even 4G/5G. All the messages being conveyed by the MQTT protocol, only one client and one server are needed. Thus, we will use a WiFi network for our tests with the server, the master, and the slave on different networks.

The goal of 5G in C-V2X is to do mobile edge computing with local breakout. The goal is to get the lowest latency possible. Currently, Orange can go down to 5-6 milliseconds only with smartphones and again not deployed yet. C-V2X can use 5G which has the advantage of being more stable than 4G in terms of throughput and therefore offers a better quality of service.

But true 5G, i.e. millimeter wave 5G, requires what Orange calls a "5G core". The latter is not yet deployed because it has not yet obtained the authorization of the government approval.

In the fields, if there is 5G coverage, mobile edge computing will probably have to be added. For information, Orange gives an estimate of 1000 to 4000 € to cover one hectare of land in 5G equipment.

For our tests, these points should not be a problem.

b) Useful messages

As discussed before, Platooning Control Message (PCM) would probably facilitate the implementation of platooning. However, there are two problems with this type of message:

- For the moment, it is in draft form at ETSI, we do not have direct access to the documents and if we have access to it, we will have to implement it completely;
- This kind of message is probably reserved for trucks and can only manage speed and braking.

The chosen solution is to use Cooperative Awareness Messages (CAM) which allow to transmit all the essential information including the GPS position and the timestamp of the message. The GPS position will be recovered with the GNSS RTK part.

V2X messages are in a specific format called ANS.1 but Orange has chosen to use JSON for simplicity. JSON is heavier but can be compressed to be closer to the size of an ANS.1 message and it can be encrypted.

E. Solutions proposed by Orange

In addition to OBUs and 5G modems, Orange can provide us with Python and Rust clients to help us in our development.

However, these clients are in draft form and are not complete. Moreover, only one of these clients is in Open Source on GitHub. Orange, therefore, asks us to be very careful about the use and especially the distribution of this code which must remain private for the moment. Indeed, there are risks of lawsuits due to open-source projects for large companies like Orange.

These clients also give us access to the Orange servers accessible via an Android application and on which we can publish and subscribe to where we can publish and subscribe to MQTT topics. There are two types of topics:

- */inQueue/* to publish messages
- */outQueue/* to subscribe to messages

There are 3 types of clients:

■ ITS client

This is a client developed in Rust which contains an example called copycat. The way copycat works is that the first vehicle sends its GPS position and timestamp to the next vehicle which then travels to the position of the first vehicle with a 3 second delay. This is already a form of platooning except that the possible horizontal spatial shift is not considered. It implements a function to analyze a received message and react accordingly, a function that the other clients do not have yet.

This is the solution preferred by Orange because it is easy to use and simple to design. However, none of the team members has any programming experience in Rust for the moment.

■ OBU client

It is a client developed in Python dedicated to being embedded in OBUs and relies on MQTT to exchange messages. It must be installed in each vehicle. It allows to create CAM messages, etc. and to publish them on the published on the MQTT topic. The client also allows either to simulate a GPS position or to retrieve it from a dedicated function. It should be noted that the GPS coordinates are then used in the topic for MQTT and are not in the form (latitude, longitude) but in the quadtree form (explained [here](#).) which can offer a more precise localization.

■ SUMO client

This is a client similar to OBU Client but rawer. It adds the simulation via Eclipse SUMO.

F. How will our solution work?

We mainly use one message from the V2X standard which is, as we explained, the Cooperative Awareness Message (CAM). The aim of this message is to provide basics information about a vehicle including:

- The type of vehicle. Ex: Car, Pedestrians, Truck, ...
- Speed
- Position: Latitude, Longitude, Altitude
- Acceleration
- Heading
- Light/sirens' state

We will use the 5 bolded parameters to fully specify our needs and allow the platoon to behave correctly. Usually, the message is sent every 100ms to 1s.

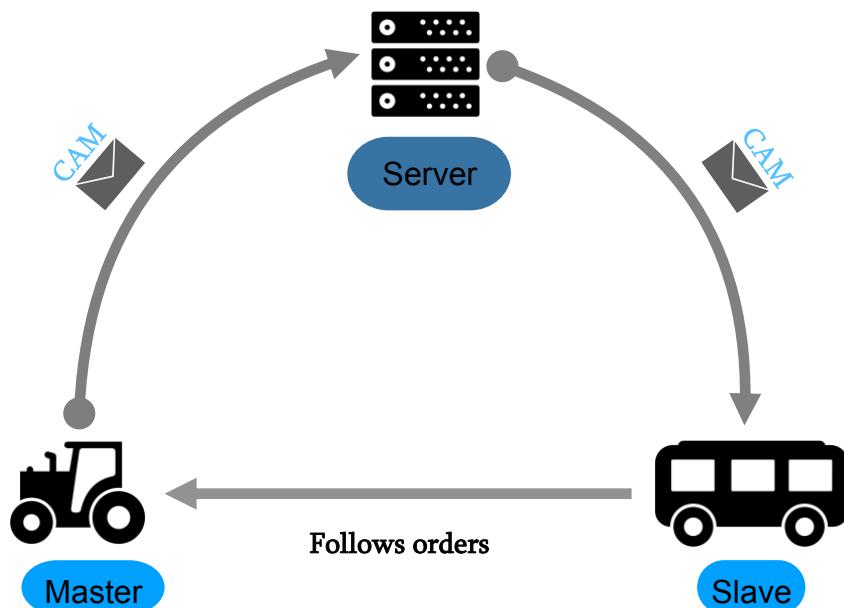


Figure 28 - V2X overview

Thanks to our contacts with Orange's team working on C-V2X, we were able to lay the foundations for the functioning of our system. The diagram below shows how our system works.

After our meeting with Orange we decided, with their advice, to keep things simple for the V2X part. We used parts of their future open-source project to implement our solution. Moreover, they advised us to decentralize the server part of the master for a better portability of the system. However, the server can still be easily integrated into the master.

The first phase of the project consists in simply communicating from the master to the slave by sending CAM messages periodically. The master vehicle retrieves the precise GPS information via the MQTT protocol, builds the CAM message. This message is then sent to a server that acts as a relay using MQTT. Finally, they are recovered by the slave vehicle which will process them in order to follow the master.

1. Server Unit

Like Orange, the MQTT broker is decentralized and is accessed via its public IP. In our case, this server runs on a Raspberry PI and is connected to a high-speed fiber network. It is also accessed via a public IP via port 1883 for the moment. In the future, the exchanges could be done on port 8883 by encrypting the messages via TLS. The MQTT broker is a classic Mosquitto broker with restricted access. Only authorized users can send messages via the server which is protected by a username/password pair.

```
1641323597: Received PUBLISH from master_car (d0, q1, r0, m39, 'platooning/cam/master_car', ... (744 bytes))
1641323597: Sending PUBACK to master_car (m39, rc0)
```

Finally, the server implements a level 1 quality of service as illustrated below. That is to say that for each message, it sends back an acknowledgement.

So, as we can see on the figure above, whenever a message is published to the broker, it sends a « PUBACK » message back with message's ID number.

The Mosquitto.conf file is configured as below:

- **listener 1883 0.0.0.0** —> allow connections from outside on port 1883 coming from any IP
- **password_file ./passwd** —> specify the password file for authentication
- **allow_anonymous false** —> specify that we only want registered users listed in the password file

2. Master Unit

This is the code dedicated to be embark on the master vehicle. It is organized as follow:

a) The GPS

The GPS folder contains `gps_stub` script with a fixed location with a small random variation aimed for tests. Then, we have the main script called `gps_mqtt` that collects our real location sent to a special topic in MQTT. It is organized around 6 functions:

■ `__init__`

It takes 3 arguments: `client_id`, host, and port. This function is used to set the client ID, the username, the password, and the topic to « master/gps » that is the topic configured within the GNSS part to publish location data.

■ `get_current_position`

Returns last longitude and latitude recorded.

■ `connect_mqtt`

Use to connect to the MQTT Broker using the library Paho. Right after connecting we subscribe to our previously set topic.

■ `Subscribe`

Subscribe to the topic and define the message handler. This handler is used every time a message arrives. It simply decodes the message and update the location and speed data. The subscribe function is a blocking function, i.e. it blocks the execution of a program to listen on a channel. It must therefore be launched in a thread. In our case, we decided to keep the blocking side of the function and launch the MQTT_worker script in a thread. The latter allows to send messages to the MQTT server.

■ get_current_value

Returns last value of longitude, latitude, altitude, and speed.

b) ITS

This folder contains the script to generate the CAM message and a mobility script to calculate some field values of the CAM message.

It fills the parameters below depending on the class input.

```
self.uuid = uuid
self.timestamp = int(round(timestamp * 1000))
self.latitude = int(round(latitude * 1000000000))
self.longitude = int(round(longitude * 1000000000))
self.altitude = int(round(altitude * 1000000))
self.speed = int(round(kmph_to_mps(speed) * 100))
self.acceleration = int(round(acceleration * 10))
self.heading = int(round(heading * 10))
self.station_id = station_id(uuid)
```

Finally, this class contains a function to convert the message to JSON format according to the standard.

The mobility.py script is used to compute distance, velocity, acceleration using gps coordinates. It also converts speed in km/hr to m/sec and vice versa.

c) Logger

This class is mainly used to log essential information to file instead of displaying them during execution time. It also provides us an history of messages sent.

d) MQTT

This class manages the sending of MQTT messages. It is composed of two scripts: mqtt_worker.py which calculates and creates the V2X message and mqtt_client.py which connects to the server and sends the message.

Stage of operation of the mqtt_worker script:

- Collect positioning data from GPS class
- Compute acceleration
- Convert speed from mps to kmph
- Create CAM message
- Convert it into JSON
- Launch a thread to publish the message

These steps are called within a run function every 0.5 seconds.

The *mqtt_client* script defines essentials functions in order to run an MQTT client. It works in the same way as the *gps_mqtt* script seen previously.

Finally, we have a main script that groups all the other scripts in the same place and allows us to have a single-entry point to manage everything.

3. Slave Unit

The part for the slave vehicle is a simplified version of the one for the master. Indeed, the slave must only retrieve the messages sent by the master. So, we just have a *mqtt client*. In addition to the main script which has the same function as before, we have developed a *gps_master* script to be imported into another script. That is to say that we will be able to have access to the information on the position of the master from another script simply by declaring a *GPS_Master* object and by calling the function allowing to get the position.

V. SHUTTLE MANAGEMENT

In this part we explain the work we did on the shuttle as well as on the microcontroller it integrates. The shuttle that we use for this project is an autonomous shuttle that ACTIA offered to INSA to facilitate research about autonomous vehicles.

The objective here is to develop a system to control the shuttle moves, and to direct it from its starting position to a given gps point, based on the work carried out previously.

We will develop this part of the project in three points: the implementation of the ROS environment, trajectory monitoring, and the development of the OM2M platform.

A. Architecture of the shuttle

In this part we develop how the shuttle is configured and how we took charge of it.

1. Context

We didn't start from scratch

As introduced above, the shuttle is used by many students and researchers for different projects. In our case, and for obvious reasons of time saving, we developed our programs on an already existing project created by an alumni student two years ago. This project, based on the ROS architecture, implements many topics about sensor readings and shuttle displacements. Moreover, a function allows the user to move the shuttle with the keyboard.

This project saved us a tremendous time of development in a new environment and allowed us to focus our energy on the development of a gps-following algorithm. That being said, we still needed to learn what a ROS environment is, and train ourselves in the student project to clearly understand what he did, where the different information was, how to add our script in this project, etc.

Description of ROS

Robot Operating System (ROS) is an open-source robotics middleware suite. Although ROS is not an operating system but a collection of software frameworks for robot software development, it provides services designed for a heterogeneous computer cluster such as hardware abstraction, low-level device control, implementation of commonly used functionality, message-passing between processes, and package management. Running sets of ROS-based processes are represented in a graph architecture where processing takes place in nodes that may receive, post and multiplex sensor data, control, state, planning, actuator, and other messages. Despite the importance of reactivity and low latency in robot control, ROS itself is *not* a real-time OS (RTOS).

ROS architecture is based on a computation graph model. Indeed, ROS processes are represented as nodes in a graph structure, connected by edges called topics. ROS nodes can pass messages to one another through topics, make service calls to other nodes, provide a service for other nodes, or set or retrieve shared data from a communal database called the parameter server.

Innovative Project – Car Platooning

- **Nodes:** A node represents a single process running the ROS graph. Every node has a name, which it registers with the ROS master before it can take any other actions. Multiple nodes with different names can exist under different namespaces, or a node can be defined as anonymous, in which case it will randomly generate an additional identifier to add to its given name.
- **Topics:** Topics are named buses over which nodes send and receive messages. Topic names must be unique within their namespace as well. To send messages to a topic, a node must publish to said topic, while to receive messages it must subscribe. The publish/subscribe model is anonymous: no node knows which nodes are sending or receiving on a topic, only that it is sending/receiving on that topic.



Figure 29 - Picture of the autonomous shuttle

In our case, this architecture can be deployed on a Raspberry Pi that we connect directly to the on-board computer of the shuttle.

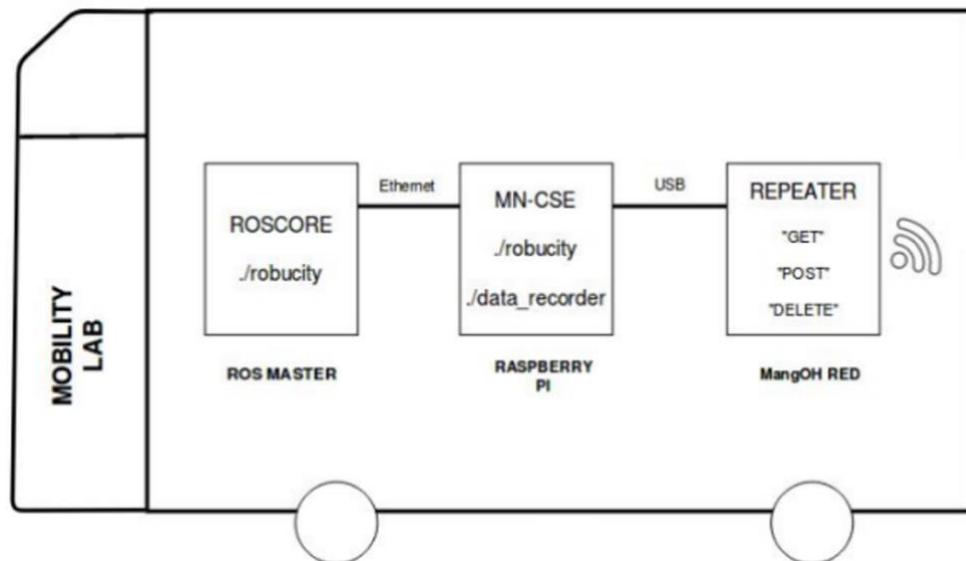


Figure 30 - Shuttle architecture scheme

On the scheme above, we can see our Raspberry at the center of the architecture, containing the robucity environment. The other functions such as the master node ROSCORE and the REPEATER were already developed.

List of the present topics on the shuttle

The shuttle is configured with many topics, below we can see how they are organized:

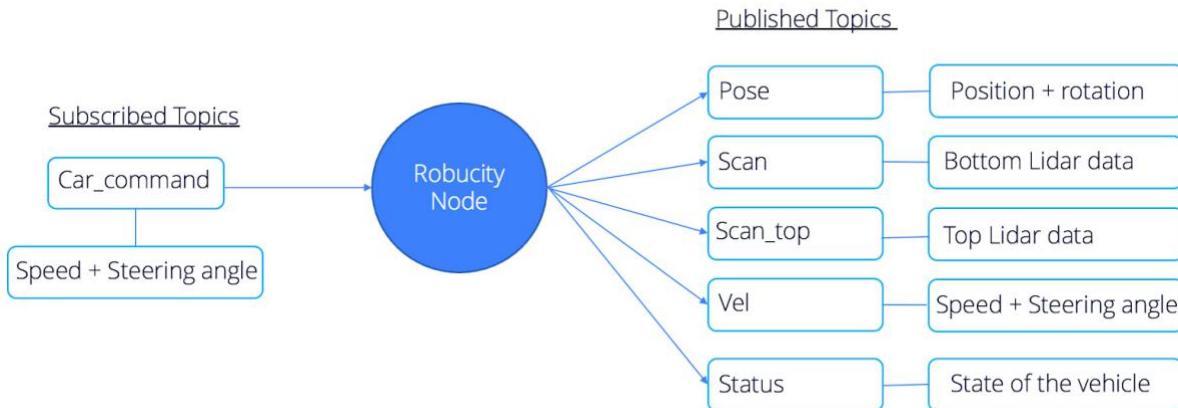


Figure 31 - Shuttle topics organization

In our case, we principally used two of those:

- The topic **car_command** is an important topic of the shuttle since it is responsible for sending the displacement commands to the hardware.
- The topic **pose** gives information on the position and the angle of the shuttle thanks to the gnss receiver and the IMU of the shuttle. The position of the shuttle is given in the form of 3d coordinates (x,y,z) and the orientation of the shuttle in the form of quaternion angle (x,y,z,w).

2. Implementation of the architecture

a) Installation of ROS

First, we installed the ROS environment on a Raspberry Pi. The architecture being developed on an old version of Raspbian (the raspberry OS), we encountered difficulties to install all the needed libraries, many of them not compatible anymore with the old version. Nevertheless, we managed to do the installation correctly.

Note: Since we had only one raspberry and that we were several students to work on it, we configured a “portable” way to connect it to different laptops by using an internet connection and terminal interface called VNC, and by configuring a default network IP.

b) Implementation of the already existing project

Secondly, we implemented the already existing project in our new environment, we achieved to implement everything we needed without encountering problems.

c) Tests of the already existing project

Finally, we plugged our Raspberry in the shuttle and tried to execute this already existing movement program.

We obtained good results and were able to move the shuttle with a keyboard.

3. Trajectory following algorithms

We will explain here how we implemented the trajectory algorithm allowing the slave shuttle to follow the master. To facilitate the understanding of the report, we did not put any code in this part but the whole code of this algorithm is available in the project GIT (Annex 5).

Note: We used the WGS84 ellipsoid and the python geographiclib library to facilitate and have a good accuracy of calculations.

a) Function 1: Conversion of GPS coordinates to ROS coordinates

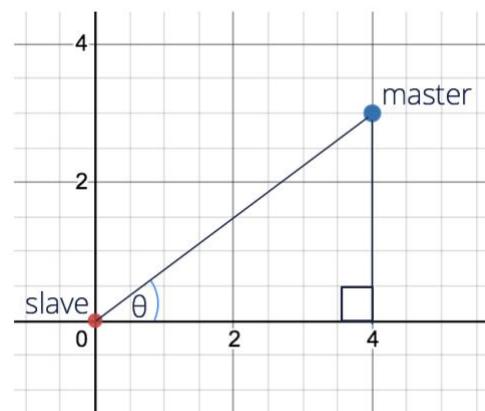
To develop the trajectory tracking algorithm, we first needed to convert the GPS coordinates of the master to a format adapted to ROS, i.e. Cartesian coordinates (x,y). To code this function, we used the inverse function of the geodesic library of python, which allowed us to obtain the azimuth between the slave shuttle and the master. Then we realized a projection in x and y thanks to the trigonometric formulas using the cosine and the sine.

Note: The azimuth is an angular measurement in a spherical coordinate system. The vector from an observer (origin) to a point of interest is projected perpendicularly onto a reference plane; the angle between the projected vector and a reference vector on the reference plane is called the azimuth.

b) Function 2: Angle (orientation to follow) and distance between two GPS coordinates

Once the function 1 done, we had to implement a function to calculate the distance between the slave shuttle and the master allowing to stop the slave shuttle when it is too close to the master (1 meter for example). And a function allowing to calculate the angle theta between the slave shuttle and the master in order to give the right direction to the slave shuttle to follow the master.

This graph illustrates the geometry used in ROS.



You can see a point representing the position of the slave shuttle and a point representing the position of the master. The distance between the master and the

slave is defined by the hypotenuse of a right triangle :

$$\text{distance} = \text{hypotenuse} = \sqrt{(y_{\text{master}} - y_{\text{slave}})^2 + (x_{\text{master}} - x_{\text{slave}})^2}$$

And the angle between the slave shuttle and the master is defined by the arctan:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{y_{\text{master}} - y_{\text{slave}}}{x_{\text{master}} - x_{\text{slave}}}$$

c) The main function

Finally, thanks to the previous functions it was easy to give a direction to the shuttle thanks to the topic `car_command` which was already implemented in the architecture of the shuttle.

Indeed, when the slave shuttle is not facing the master, i.e. the angle theta is higher than a specified limit, we give an angle command to the shuttle so that it can reduce the angle theta below the limit in order to face the master.

Then when the orientation of the shuttle was good, we made the shuttle go straight with the speed command of the same topic `car_command`, with a speed that we can specify.

Finally, the slave shuttle stops when the distance between the slave shuttle and the master is less than 1 meter.

Unfortunately, when we wanted to test this algorithm in real conditions (outside the building) we realized that the drivers of the GPS receiver of the shuttle were not installed, contrary to what we had been indicated. So, we didn't been able to test our algorithm.

4. Problems encountered

The problems encountered in this part are numerous.

First, the architecture was difficult to take in hand because it was complex and it was not documented, which slowed us down in the project. The version of ROS in this architecture is now old and we have faced several problems of version compatibility when we installed the architecture, packages, and libraries.

Furthermore, it was difficult to carry out the tests on the shuttle because we had to be accompanied by a person having an electrical certification which slowed down our progress since we had to reserve the shuttle each time we wanted to test our algorithm.

In addition, we had been informed that the topic `pose`, providing information on the position and orientation of the shuttle was fully functional and that it was normal that we did not receive the data from the topic because the shuttle was inside a building. We discovered during our tests outside the building that the drivers of the GPS receiver were not installed in the shuttle. We wanted to install these GPS drivers in the shuttle but we haven't been able to get authorizations to use the "sudo" command (we just can't have the password).

CONCLUSION

During this project we worked on many thematic to achieve our specifications.

Regarding **the localization part**, we searched the better solutions to reach a 20cm precision without having to use an anchor antenna. After having searched for the best solutions, we finally chose to implement NRTK, we also implemented PPP but we discovered that NRTK was much faster. Unfortunately we didn't succeed to implement HAS regarding the equipment we had. Nevertheless, we were able to reach our objective which was to approach a precision lower than 20 cm. We had even reached 1 cm of precision using NRTK corrections in optimal conditions.

Regarding **the V2X part**, we carried out research on CV2X technology and realized that it was not yet been deployed in FRANCE. We decided to use the MQTT protocol as a means of exchanging standardized V2X frames using CAM and DENM messages. Our two vehicles are now able to exchange messages which contain their position and their speed.

We also worked on using an **autonomous shuttle** as the slave. We discovered an entire architecture based on ROS and needed to contact multiple people to help us taking charge of the system. Next, we implemented our trajectory following function that, unfortunately, we haven't been able to test due to mentioned reasons.

In addition to the V2X communication, localization, trajectory tracking parts, we also have developed from scratch an interface that acts as an **observer system**.

This interface is developed with Node-Red and Google Earth Pro API and allows visualize the behavior of the master and the slave in real time. We also developed some functions to define a "displacement zone" or to ask a vehicle to follow a certain path.

This big project allowed us to get a feel for the innovative side of the industry. We learnt that working with multiple actors and companies (ACTIA, Orange, Teria, INSA, etc.) create a big inertia that drastically slows down the project advancement (cf. the 3 months of negotiation with Teria to obtain access to their technology, the indecision of ACTIA about their capacity of lend us GPS, etc.). Nevertheless, those events forced us to be proactive and find solutions to achieve correct results, it was a good experience that will surely help in our future careers. On a more technical side, here is a list of skills that we acquired during this project:

- CV2X/V2X and 5G communication protocols;
- NRTK localization;
- PPP localization;
- HAS localization;
- Node-RED;
- Google earth pro;
- Google cloud platform;
- MQTT;
- ROS;
- Java script;
- Python;

- Trello, Agile method, Team Management.

Finally, the work we have done can be improved by future teams. Areas of improvements are:

- Improve the shuttle configuration to implement platooning trajectory following functions. We found an alternative solution to use the topic pose by using MQTT but unfortunately there was not enough time left to implement it;
- Wait for a fully implementation of 5G in France, to work on C-V2X upgrade.

ANNEXES

You will find in this part the following documents composed of the following documents:

<u>Annex 1 – TERIA free license</u>	44
<u>Annex 2 – TerraStar C-Pro Service license</u>	46
<u>Annex 3 – State of Art on GNSS positioning solutions</u>	47
<u>Annex 4 – State of art on V2X solutions</u>	48
<u>Annex 5 – Github with all our codes</u>	49
<u>Annex 6 – Roles distribution on the project</u>	50
<u>Annex 7 – CV's of team members</u>	51

Annex 1 – TERIA free license

 Commande d'un TEST gratuit au réseau TERIA	
N° COMPTE CLIENT:	N° DE COMMANDE:
ADRESSE DE FACTURATION	
Société :	Institut National des Sciences Appliquées (INSA) Toulouse
Adresse :	135 avenue de Rangueil
CP :	31400
Ville :	Toulouse
Contact :	Teo Geneau
Tel / Portable :	06 72 03 80 49
Email:	geneau.teo@gmail.com
ADRESSE DE LIVRAISON (SI DIFFERENTE)	
Société :	
Adresse :	
CP :	
Ville :	
Contact :	
Tel / Portable :	
Email:	
Informations complémentaires : <small>Dans le cadre de notre dernière année d'étude de notre formation d'ingénieur à l'INSA Toulouse nous menons un projet académique tutoré par ACTIA Group, partenaire industriel du projet consistant au développement d'un système de guidage de peloton de véhicules agricoles avec une précision inférieure à 20cm.</small>	
Contact utilisateur technique : <small>Société : INSA Toulouse Contact : Teo Geneau Portable : 06 72 03 80 49</small>	
Date de début des prestations :	05/01/2022
Type d'abonnement :	<u>Centimétrique National</u>
Durée de la prestation :	<u>2 Semaines</u>
<input checked="" type="checkbox"/> Je certifie ne pas utiliser ces identifiants à des fins commerciales	
<input checked="" type="checkbox"/> J'accepte les Conditions Générales de Ventes	
DATE SIGNATURE <small>cachet de l'entreprise (obligatoire)</small>	
 LE 03/01/2022 	

teria



INSTITUT NATIONAL DES
SCIENCES APPLIQUEES
135 Avenue de Rangueil

31400 TOULOUSE

N° Compte : C1296

Vitry-Sur-Seine, le 03/01/2022

Bonjour,

Nous accusons réception de votre commande et sommes heureux de vous adresser vos paramètres de connexion au réseau TERIA, actifs à compter du 05/01/2022.

Votre contrat d'utilisation n° : 009171

Pour vous connecter au réseau :

- Serveur NTRIP

Adresse IP du serveur : **78.24.131.136**

Port TCP : **2101**

- Point d'accès NTRIP et format des corrections

PRS30 : correction de type VRS différentiel phase au format RTCM 3.1 (GPS/GLONASS)

MAC30 : correction de type MAX différentiel phase au format RTCM 3.1 (GPS/GLONASS)

VRS32 : correction de type VRS différentiel phase au format RTCM 3.2
(GPS/GLONASS/GALILEO/BEIDOU)

IMAC32 : correction de type I-MAX différentiel phase au format RTCM 3.2
(GPS/GLONASS/GALILEO/BEIDOU)

Identifiant : INSA31

Mot de passe : 03012201

L'assistance téléphonique est assurée tous les jours ouvrés de 8 heures 30 à 18 heures sans interruption. Le numéro d'appel est le **01 71 16 21 72**. Lors de votre appel, vous aurez à vous identifier grâce au login qui vous a été attribué. Ce service est également disponible à l'adresse mail suivante : intervention@reseau-teria.com

Merci de votre confiance et bonne connexion avec TERIA.

L'équipe Exagone

EXAGONE

Société par Actions simplifiée à capital variable

Capital minimum : 250000 €

RCS CRETEIL B483072450 - APE 6130Z - FR17483072450

29 rue Eugène Derrien 94400 VITRY SUR SEINE

Tél : 01 71 16 21 70

Email : contact@reseau-teria.com

Site internet : www.reseau-teria.com

Annex 2 – TerraStar C-Pro Service license



HEXAGON



NovAtel Inc.
10921 14 Street N.E.
Calgary, AB T3K 2L5
(403) 295-4500

Signal Service Order Confirmation

OM Transaction ID: 4497436
Status: **COMPLETED**

Confirm To: **U004507**
ORBITAL-GNSS, S.A.S.U.

Customer Purchase Order:

Currency: USD

France

Part Number: TSCP-GL-TS-5DY	Unit Price: 0	USD
Service: TerraStar C PRO	Service Coverage: Global	
Contract Duration: 5 DAY(S)	Service Region: Global	

Annex 3 – State of Art on GNSS positioning solutions

POSITIONNEMENT GNSS

OFF-HIGHWAY SATELLITE HIGH PRECISION PLATOONING : CORRECTION GNSS

5 janvier 2022



Informations relatives au document

INFORMATIONS GÉNÉRALES

Auteur(s)	Teo Geneau
Lieu	INSA Toulouse
Version	V3.0
Référence	EA1

HISTORIQUE DES MODIFICATIONS

Version	Date	Rédigé par	Modifications
V1.0	18/11/2021	Teo Geneau	Création du document
V2.0	09/12/2021	Teo Geneau	Version intermédiaire
V3.0	05/01/2022	Teo Geneau	Version Finale : ajouts de chapitres et corrections

DESTINATAIRES

Nom	Fonction / Entité
Jérôme THOMAS	Technological Partnerships Manager / ACTIA Group
Renaud HANUS	Chief Technical Officer / ACTIA Group
Thierry MONTEIL	Professeur / INSA

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES.....	3
INTRODUCTION	7
Importance de la localisation : choix du système de navigation optimal	8
Les technologies GNSS	8
La détection d'obstacle	8
Les différentes solutions de localisation	9
Les technologies de localisation terrestres	9
Codeur rotatif.....	9
Gyroscope.....	9
Accéléromètre.....	10
RFID.....	10
Bluetooth	11
WiFi	11
GSM.....	11
Ultrasons	12
Ultra Wide Band (UWB).....	12
Système de positionnement satellitaire	13
Les systèmes GNSS	13
Calcul de la position à l'aide des vecteurs de distance	13
Configuration du système GNSS	15
Le segment spatial.....	15
Les satellites.....	15
La constellation de satellites	17
Couverture GNSS.....	17
Le segment de contrôle	18
Les stations d'écoute.....	18
Les stations de contrôle	18
La station de contrôle principale.....	18
Le temps GNSS.....	19
Structure du signal	20
La fréquence fondamentale	20
Les fréquences porteuses.....	20
Le code PRN (ou C/A)	21

Le code P (Precise ou Protected).....	21
Le message de navigation	22
L'almanach.....	22
Les éphémérides	23
Les méthodes de modulation.....	24
Observation des données.....	26
Mesure sur le code : pseudo-distance (code-phase)	26
Mesure de déphasage de la porteuse : Carrier-phase.....	28
Les sources d'erreurs.....	32
La correction différentielle	35
Positionnement absolu : mode naturel.....	35
Positionnement relatif : le GNSS différentiel	35
Détermination de la position exacte d'une base référentielle.....	36
Deux modes de correction	37
Premier mode	37
Le second mode.....	38
La simple différence.....	38
La double différence.....	40
La triple différence	40
Système d'augmentation : LBAS	42
NRTK : Network Real Time Kinematic.....	43
Principe de fonctionnement d'un réseau NRTK	44
Système d'augmentation : SBAS	50
Precise Point Positioning (PPP)	51
PPP-RTK.....	51
Galileo High Accuracy Service (HAS)	52
Les systèmes de coordonnées.....	53
Fonctionnement et architecture simplifiée d'un récepteur GNSS	54
La chaîne de radiofréquence	55
L'antenne GNSS.....	55
L'oscillateur de référence.....	56
Le module radio	56
Le processeur de signal numérique (DSP)	56
Le processeur de navigation	56
Critère de choix du récepteur.....	56
Plusieurs types de récepteurs GNSS existent :	56
Précision et qualité de la mesure	57

L'intégrité	57
La précision	57
La disponibilité	57
La continuité	58
La couverture.....	58
La fiabilité	58
CONCLUSION	59

INTRODUCTION

Dans le cadre de notre formation Innovative Smart System nous devons réaliser un projet multidisciplinaire d'Octobre 2021 à Janvier 2022.

Le sujet de notre projet a été proposé par ACTIA, partenaire industriel de l'INSA Toulouse :

Off-highway satellite high precision platooning.

ACTIA est un acteur international majeur dans le domaine de l'électronique et est notamment l'un des principaux équipementiers électroniques pour les applications agricoles, les constructeurs de véhicules tout-terrain et les autobus.

L'une des volontés principales de ce projet est d'utiliser les dernières avancées technologiques en termes de correction de positionnement GNSS (Network Real Time Kinematic NRTK/Precise Point Positioning PPP/Galileo High Accuracy Service HAS) ainsi que le Vehicle to Everything V2X.

Notre projet s'applique dans un contexte agricole, en effet, il est souhaité de pouvoir contribuer dans le développement de l'agriculture de précision afin d'améliorer la récolte, ainsi qu'augmenter la production et réduire les coûts inhérents. Pour cela, des véhicules agricoles autonomes sont utilisés, cependant, avec ce projet, il existe une réelle volonté d'aller encore plus loin : le principal objectif est de pouvoir réaliser une expérimentation de peloton « platooning » entre deux véhicules. Le platooning consiste à contrôler un véhicule « esclave » à l'aide d'un véhicule « maître » en utilisant le V2X pour la communication véhicule à véhicule, en fonction du trajet du véhicule maître, l'esclave devra le suivre en fonction des commandes reçues par le maître.

Pour cela ACTIA a établi plusieurs critères :

- Dans une optique de réduction des coûts et de répétabilité de la solution, l'un de nos critères est de se passer des balises de références au sol.
- Nous devons atteindre une précision dans la mesure de position inférieure à 20 cm.
- Utiliser les communications Cellular V2X (C-V2X).

Le projet est divisé en plusieurs étapes :

- Réalisation de deux états de l'art pour appréhender le sujet dans sa globalité : un état de l'art sur la technologie V2X et un autre sur la technologie GNSS et les corrections intrinsèques.
- Utilisation d'un API pour contrôler la voiture esclave.
- Mise en place de la communication V2X.
- Développement de l'algorithme de contrôle du véhicule esclave en fonction de la position du véhicule maître.
- Développement du système d'observation.
- Test réel sur les véhicules.

Ce rapport traitera donc la première étape consistant à faire un état de l'art sur la technologie GNSS et ses corrections associées afin de pouvoir mettre en place un système de pilotage automatique d'un véhicule agricole roulant et pouvoir commander un véhicule esclave en fonction de la position du maître.

Pour cela, il est nécessaire de développer un calculateur d'aide au pilotage embarqué permettant de positionner le véhicule maître avec une précision inférieure à 20 cm.

Dans ce but, soit la trajectoire du maître est connue à l'avance, par conséquent sa tâche n'est que de suivre cette trajectoire, soit il peut être téléguidé en temps réel, car ce qui nous importe est le suivi du véhicule esclave.

Notre système devra alors pouvoir effectuer trois tâches principales :

- ▶ Pouvoir localiser le véhicule par traitement des données de capteurs comme un récepteur GNSS afin de connaître sa position en temps réel.

- ▶ Piloter les déplacements du véhicule en appliquant des algorithmes de suivi de trajectoire envoyant des consignes aux différents actionneurs tels que le volant, l'accélérateur, les freins et communiquer des consignes spécifiques au véhicule esclave.
- ▶ La détection et gestion de différents types d'obstacles sur la trajectoire en utilisant une caméra, un lidar, des capteurs optiques, etc.

De plus, notre système devra être en mesure de pouvoir communiquer en V2I (Vehicle to Infrastructure) avec un autre système d'observation (WiFi/4G) à l'aide d'un smartphone ou une tablette, et ce, afin de pouvoir observer l'état du système ainsi que son activité, il devra être possible pour l'observateur de modifier le parcours du peloton, mais aussi de pouvoir l'arrêter et de le redémarrer au besoin. L'observation se définit aussi par des aspects télémétriques comme l'accès aux informations sur la position du véhicule dans le champ et son état (arrêté, roulant), sur l'état physique du système (panne, défaut, batterie).

Dans la suite de ce rapport, nous allons nous concentrer sur la localisation du véhicule et nous interroger sur la meilleure approche à adopter afin de pouvoir répondre aux contraintes techniques mais aussi économiques de ce projet.

Notre système se doit d'être fiable, réparable, intégrable et facilement reproductible en vue d'une industrialisation (production en série, longue durée de vie). Il faut aussi veiller à ce que notre solution soit indépendante des technologies et matériels utilisés : possibilité d'utiliser différents logiciels et différents matériels provenant de différents fournisseurs.

Importance de la localisation : choix du système de navigation optimal

Le système de navigation pour ce projet devra être en mesure de pouvoir suivre des trajectoires définies par des coordonnées (GNSS par exemple), il est essentiel que le véhicule soit bien localisé en temps réel, ainsi, on pourra vérifier via le système d'observation qu'il suit le bon respect des consignes, qu'il n'y a pas de dérive irraisonnable et modifier la cartographie du trajet à réaliser.

Le système devra notamment répondre à certaines contraintes : il devra garantir une précision inférieure à 20cm. Ainsi, la fonction de localisation du système devra calculer la position d'un véhicule agricole à une certaine fréquence avec une marge d'erreur de 20 cm maximum. C'est ce qu'on appelle l'intégrité, il est alors nécessaire de se questionner sur l'intégrité des solutions disponibles.

Les technologies GNSS

Il est possible de pouvoir localiser un mobile à l'aide d'un récepteur GNSS, cependant, il s'agit d'un système qui n'est pas intégré, en effet les mesures sont très sensibles à de nombreuses erreurs, notamment si le champ est proche d'une forêt, les arbres viennent perturber les signaux des satellites et on aura de la perte de données. L'autre problème de ce genre d'obstacle est que cela peut provoquer aussi des multifaisceaux, les signaux électromagnétiques des satellites vont rebondir sur la forêt et venir perturber la réception ce qui va provoquer des erreurs de mesure de la position.

Il est alors nécessaire de définir les scénarios de notre expérimentation de platooning, en effet, selon les scénarios il faut associer à notre récepteur GNSS d'autres capteurs pour assurer l'intégrité du système :

- ▶ Capteurs inertIELS mesurant l'accélération et la rotation du véhicule
- ▶ Capteurs odometriques mesurant le nombre de tours de roue pour évaluer l'avancement du véhicule.

La détection d'obstacle

C'est une fonction importante pour assurer le comportement autonome du véhicule étant donné que des animaux, des personnes et des obstacles peuvent se présenter devant notre véhicule, c'est pourquoi il est nécessaire que ce dernier soit en mesure de les détecter et gérer l'évitement des obstacles. Il doit avoir la capacité de réaliser la détection à l'aide de capteurs (lidars, caméras) et de traiter les données afin de reconnaître les obstacles, les classifier, s'arrêter si nécessaire et envoyer des messages d'alarme. On peut aussi imaginer des stratégies d'évitement avec le calcul d'une trajectoire d'évitement. Cependant, par contrainte de temps, nous ne traiterons pas cette lors de ce projet.

Les différentes solutions de localisation

Il existe de nombreuses technologies permettant de se localiser. Dans ce chapitre, ces différentes solutions seront présentées avec leurs avantages et inconvénients afin de les discriminer et ainsi pouvoir retenir la solution la plus pertinente pour notre application. Il existe deux types de technologies de localisation : la localisation terrestre et la localisation satellitaire.

Les technologies de localisation terrestres

Codeur rotatif

Un codeur rotatif consiste à déterminer l'angle d'un système par la mesure de la rotation effectuée autour d'un axe, l'information sur la vitesse peut être obtenue en déduisant la variation de la position en fonction du temps.

On distingue deux types :

- ▶ Le codeur rotatif incrémental : addition ou soustraction d'un compteur à chaque rotation supérieure au seuil du capteur avec remise à zéro.
- ▶ Le codeur rotatif absolu : intègre son propre compteur et conserve en général sa valeur lors de l'arrêt du véhicule.

Ce capteur pourrait être utilisé, équipé sur chaque roue du véhicule, afin de permettre au véhicule de poursuivre sa trajectoire lors de périodes d'interruption de communication satellitaire en déduisant le trajet du véhicule à l'aide de la mesure précise des rotations des quatre roues motrices. Le coût de ce genre de capteur est faible, cependant, s'il y a des glissements des roues par rapport au sol, cela peut entraîner des erreurs difficiles à traiter et réduire la précision.

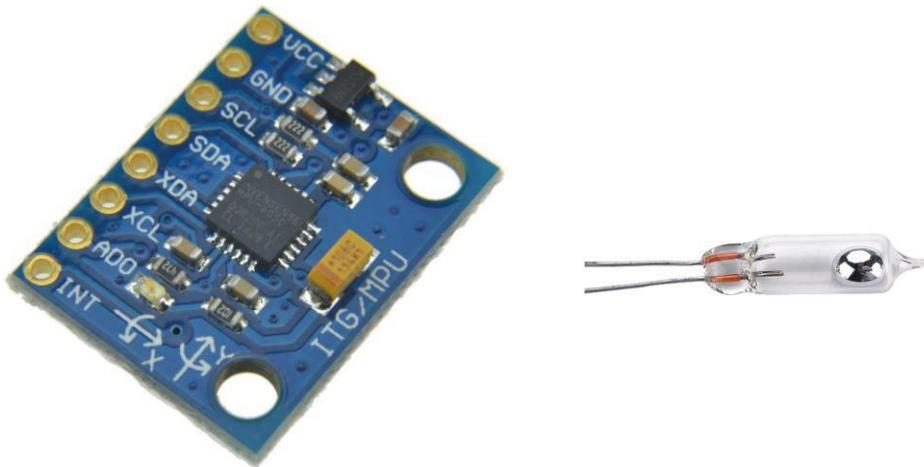


Codeur rotatif

Gyroscope

Il s'agit d'un capteur angulaire utilisant le principe de conservation du moment angulaire (stabilité gyroscopique) : en l'absence de couple appliquée à un solide en rotation, ce dernier conserve son axe de rotation invariable. La position angulaire de son référentiel selon un axe sera donnée par le gyroscope en fonction d'un référentiel inertiel.

Cette information est importante pour permettre la stabilisation du système et notamment connaître : l'attitude vu véhicule, son tangage, son roulis et son lacet. Cependant, en fonction de notre scénario (par exemple dans le cas d'un champ plat, sans forte pente) il n'est pas forcément indispensable, de plus, le prix est excessif. On pourra notamment déterminer l'inclinaison et l'éventuel basculement lors de forte pente à l'aide d'interrupteurs à mercure ayant un prix nettement plus faible.



Gyroscope et interrupteurs à mercure

Accéléromètre

Ce type de capteur permet la mesure de l'accélération linéaire d'un objet en mouvement. En général, il est composé de trois accéléromètres qui mesurent l'accélération linéaire selon trois axes orthogonaux.

C'est en combinant un accéléromètre avec un gyroscope qu'on obtient une centrale inertuelle (IMU) permettant la mesure des accélérations linéaires et angulaires.

On peut ainsi mesurer la vitesse en intégrant l'accélération et le déplacement par double intégration. Cependant, ces calculs souffrent d'une dégradation de la précision après calibration et doivent être complétés par un autre système.

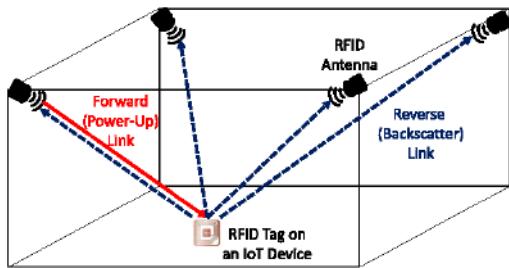
RFID

Cette technologie de radio-identification utilise des marqueurs et des lecteurs afin de récupérer et de mémoriser des données à distance. Les radio-étiquettes comportent plusieurs mémoires et une antenne associée à une puce électronique leur permettant de recevoir et répondre à des requêtes radio émises par un émetteur-récepteur. Elles peuvent alors extraire des données d'une transmission électromagnétique et les trier. Les lecteurs correspondent à des dispositifs actifs déclenchant les marqueurs proches d'eux.

Il existe deux types de marqueurs :

- ▶ Les marqueurs passifs, ne disposant d'aucune source d'alimentation, ils réceptionnent l'énergie des ondes électromagnétiques émises par les lecteurs, en dépassant un certain seuil, ces ondes permettent d'alimenter le circuit intégré.
- ▶ Les marqueurs actifs, ils possèdent une alimentation électrique dédiée (batterie, pile), ils diffusent via une antenne un signal au lecteur.

Le RFID pourrait être utilisé pour déterminer la position d'un mobile : un lecteur capturera les données d'une étiquette RFID pour signaler sa présence dans une certaine zone sphérique, il est possible de connecter ce lecteur à internet afin d'identifier l'étiquette et de suivre la position des étiquettes, c'est ce qu'on appelle la localisation par zones. Cependant, cette technologie comporte trop de contraintes : en matière de portée, elle est limitée à quelques centimètres, il existe des systèmes d'augmentation de la portée (jusqu'à 200 mètres) mais sont trop onéreux pour notre application, de plus, elle possède une précision trop approximative, elle est trop sensible aux perturbations et n'est pas adaptée à une utilisation extérieure, ni pour une application temps réel.



Localisation IoT via un système RFID

Bluetooth

Cette technologie, définie par le standard Bluetooth, permet une communication bidirectionnelle par la transmission d'onde radio à haute fréquence. La mesure de la distance se fait en déterminant la distance entre les balises et le mobile en mesurant la puissance du signal reçue (RSSI) pour ensuite réaliser une trilateration et ainsi déterminer la position du mobile. De plus, il est possible d'améliorer la précision en mesurant l'angle d'arrivée (AOA depuis le récepteur) ou l'angle de départ (AOD depuis l'émetteur), avec cette mesure d'angle, il est alors possible de réaliser une triangulation. La précision est métrique de l'ordre de 1 à 4 mètres et peut être améliorée avec la triangulation supplémentaire.

Cependant, de nombreuses causes d'erreurs (perturbation du temps et de la direction de propagation des ondes provoquant des pertes du signal, des signaux réfléchis par des obstacles) impactent la précision pour une utilisation extérieure. La portée des balises est d'environ 100 m ce qui implique d'en installer plusieurs et nécessite donc un budget plus conséquent pour équiper tout un champ.

WiFi

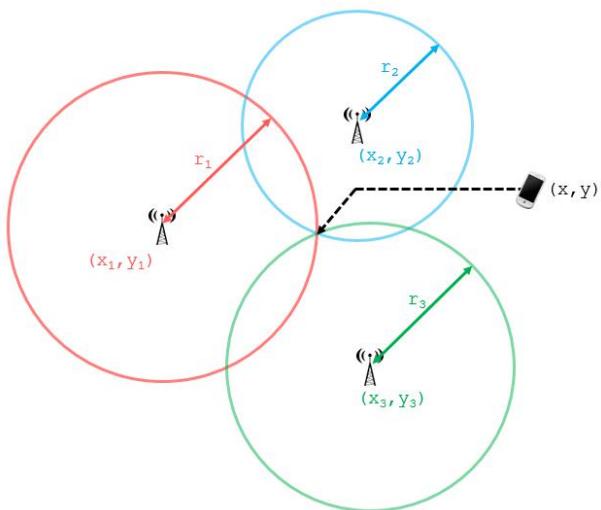
Il s'agit d'un ensemble de protocoles (IEEE 802.11) popularisé par son coût faible et son interopérabilité facilitant son implantation. Il a une portée maximale de 400 mètres même si le plus souvent la portée est plutôt entre 30 et 200 mètres selon l'environnement et le matériel utilisé. Le WiFi a un fonctionnement similaire à la technologie Bluetooth puisqu'il permet de déterminer la position par traitement du signal (mesure de la puissance du signal (RSSI), mesure de l'angle d'arrivée (AOA) et triangulation) afin d'obtenir une précision métrique. Utilisable en extérieur comme intérieur, cette technologie possède plusieurs défauts dont une consommation excessive, une grande sensibilité aux interférences et tout comme pour le Bluetooth elle nécessite un grand nombre de balises pour couvrir une large zone.



Exemple de localisation par triangulation en WiFi

GSM

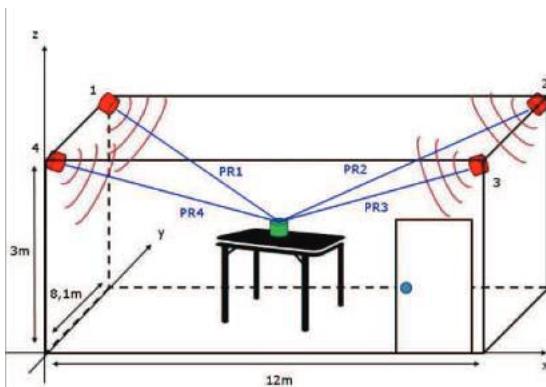
Les avantages offerts par le GSM sont nombreux, comme toutes les technologies cellulaires, elle est utilisable par un grand nombre et possède une bonne couverture (même si c'est aussi une faiblesse puisqu'elle dépend de celle-ci), ainsi, il suffit de posséder un appareil compatible avec une carte SIM pour pouvoir l'utiliser. Il est alors nécessaire que le mobile soit couvert par au minimum trois antennes relais afin d'appliquer la technique de triangulation, cependant les temps de latence sont élevés et la précision est au mieux métrique, ce qui n'est pas adapté pour une application temps réel.



Exemple de triangulation GSM

Ultrasons

Ici, l'idée est de reprendre le fonctionnement du système GPS, néanmoins, les signaux émis sont ultrasonores au lieu d'être électromagnétiques et on utilisera un récepteur à ultrason au lieu d'un récepteur GNSS. Les émetteurs ultrasons viennent imiter le comportement des satellites, leur position est connue et il est alors possible de déterminer la distance récepteur-sonore/émetteur en calculant le temps d'émission et en connaissant la vitesse de l'onde ultrasonore dans l'air ($c=340\text{m/s}$). On peut alors par trilateration déterminer la position du récepteur. La précision atteinte est centimétrique, pouvant être inférieure à 10 cm. Il s'agit d'un système à faible coût, cependant ce type de localisation est limité par la capacité de détection des capteurs à ultrason, en effet, ils ont une portée maximale de 10 à 15mètres, ce qui en fait une solution peu adaptée pour une utilisation en extérieur et pour couvrir un champ.



Système de géolocalisation par ultrason

Ultra Wide Band (UWB)

Il s'agit d'une technique de modulation radio où l'on transmet de très courtes impulsions sur un large spectre de fréquence, c'est-à-dire : un rapport largeur de bande sur une fréquence centrale supérieur à 20% ou bien une largeur de bande supérieure à 250MHz. Cette largeur de spectre permet notamment de transmettre un plus gros débit de données et ainsi réduire le temps de convergence d'un système de localisation ce qui convient parfaitement pour une application temps réel.

Avec un système UWB, on a un fonctionnement avec une logique inverse, le mobile à positionner est cette fois équipé d'un émetteur (plutôt qu'un récepteur) qui émet des signaux UWB qui pourront être captés par des récepteurs servant de balises. Il est alors possible de déterminer la distance émetteur/récepteur par calcul du temps de propagation des ondes et ainsi déterminer par trilateration la position de l'émetteur. Les avantages sont nombreux, en effet, puisqu'on émet sur des durées très courtes, on est moins sujet aux erreurs liées aux ondes multi-trajets, la consommation est aussi réduite, la précision est inférieure à 10 cm et la portée peut

atteindre 100 m selon la performance du matériel, ce qui n'est pas suffisant pour les applications nécessitant une large couverture.

Il existe d'autres types de système de localisation (par combinaison de plusieurs techniques : localisation hybride, BLE, réseau cellulaire, Lidar, champ magnétique, infrarouge, vision, etc.), cependant, ils sont assez similaires à ceux présentés ci-dessus et comportent les mêmes défauts : il s'agit de technologies plus adaptées pour des applications en intérieur et ayant une nécessité de couverture moyenne à faible. C'est pourquoi, nous retiendrons comme solution que le système de localisation satellitaire reposant sur les constellations GNSS permettant une large couverture.

Système de positionnement satellitaire

Les systèmes GNSS

Grâce à l'avènement des techniques de géodésie spatiale étayées par les systèmes de constellations de satellites artificiels, aussi appelés Global Navigation Satellite System (GNSS), une véritable révolution des applications de géoréférencement a vu le jour au début des années 1990 notamment grâce au développement de l'usage civil de ces systèmes. Le Global Positioning System (GPS) a été le premier système GNSS se basant sur un procédé de radio positionnement s'appuyant sur un réseau de satellites, il est complètement opérationnel depuis 1994, d'abord conçu et développé par le ministère américain de la défense : US Department of Defense (DoD) dans les années 70 uniquement pour un usage militaire, il a été par la suite ouvert à un usage civil. La couverture d'un tel système est mondiale, accessible à un nombre illimité d'usagers passifs, et cela, qu'importe les conditions météorologiques.

Les GNSS sont des constellations de plusieurs satellites artificiels en orbite autour de la Terre, ces satellites sont répartis de manière régulière sur les différentes orbites. Il y a aussi des satellites supplémentaires dits de réserve afin de prévoir les cas de pannes. Le but est de permettre une couverture mondiale par chaque constellation et permettre de couvrir chaque point sur Terre par au moins quatre satellites simultanément.

Calcul de la position à l'aide des vecteurs de distance

Les satellites opérationnels permettent principalement de déterminer la position d'un utilisateur exprimée par la latitude, la longitude et l'altitude.

En théorie, 3 satellites sont suffisants pour déterminer la position du point en trois dimensions, cette tâche est possible en accomplissant une trilateration : en connaissant la position précise de chaque satellite (transmise en permanence dans un message de navigation, notamment via les éphémérides), avec un vecteur d'espace ρ^s du satellite relatif au centre de la terre (géocentre), avec un vecteur géocentrique de position du récepteur ρ_r relatif au centre de la terre, on détermine la distance géométrique ρ :

$$\rho = \|\rho^s - \rho_r\|$$

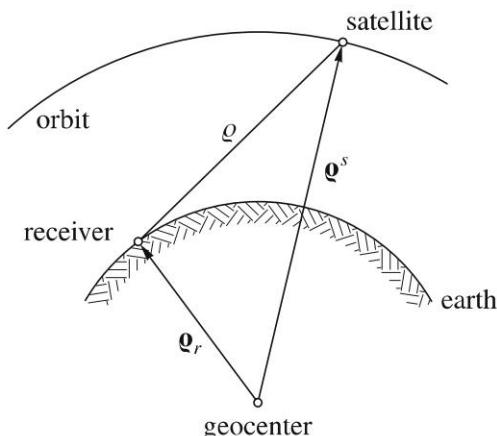


Schéma de la distance géométrique ρ

L'heure d'émission exacte est fournie par le satellite, le récepteur l'obtient en décodant le signal reçu et gardera en mémoire l'heure de réception du signal déduisant ainsi le temps de transmission satellite-récepteur par différence du temps d'émission et du temps de réception. Or, en connaissant la vitesse du signal (correspondant approximativement à la vitesse de la lumière) il est alors possible de calculer la distance récepteur-satellite correspondant à cette distance géométrique ρ .

Or, chaque distance ainsi calculée correspond à la surface d'une sphère dont le centre est la position du satellite.

Il s'agit alors d'un calcul d'équations d'interception de sphères afin de déterminer les coordonnées X, Y et Z. Comme décrit dans l'image en dessous, avec un seul satellite on obtient une sphère où le récepteur peut être un point situé sur toute la surface de la sphère, avec un deuxième satellite on réduit la possibilité de position du récepteur à l'intersection entre ces deux sphères, si on rajoute un troisième satellite, alors l'intersection entre les trois sphères permet de réduire la position du récepteur à seulement 2 points possibles, dont un improbable car situé en dehors de la Terre, on détermine alors les coordonnées finales avec le seul point d'intersection pertinent.



Trilateration GNSS

La précision des récepteurs sans correction dédiée est métrique, de l'ordre de trois à cinq mètres. Contrairement aux techniques topographiques conventionnelles, toutes les déterminations de points sont indépendantes les unes des autres.

Les récepteurs modernes utilisent une technique différente : ils utilisent une horloge en cristal qui est réglée approximativement au temps du système. Ainsi, l'horloge du récepteur au sol aura un offset par rapport au temps « réel » du système, c'est à cause de ce décalage que la distance mesurée diffère de la distance géométrique, on appellera donc la distance mesurée pseudo-distance R correspondant à la distance géométrique à laquelle se rajoute un delta de correction dû à l'erreur d'horloge du récepteur δ . Le système fonctionnant sur la mesure du temps grâce à des horloges atomiques, une erreur infinitésimale sur le temps peut provoquer une erreur de plusieurs mètres sur le positionnement final. C'est pourquoi, ce problème de synchronisation entre l'horloge du récepteur et celle des satellites, implique l'utilisation d'un quatrième satellite afin de régler le biais entre les horloges des satellites et du récepteur.

Voici le modèle simplifié de la pseudo-distance :

$$R = \rho + \Delta\rho = \rho + c\delta$$

Il est important de noter que les signaux sont diffusés de manière unidirectionnelle, ils sont uniquement reçus, il n'y a pas d'acquittement des récepteurs, il n'y a donc pas de congestion ce qui permet un nombre illimité d'utilisateurs en garantissant la même performance. Chaque constellation émet à plusieurs fréquences (entre 1 et 2 MHz), ainsi, un récepteur multicanaux pourra capter plus de signaux et améliorer sa mesure de position.

Des corrections de données en amont sont déjà effectuées par des stations spatiales de contrôle afin de corriger la position relative des satellites (communication par la bande C), les dérives d'horloge, etc. Le

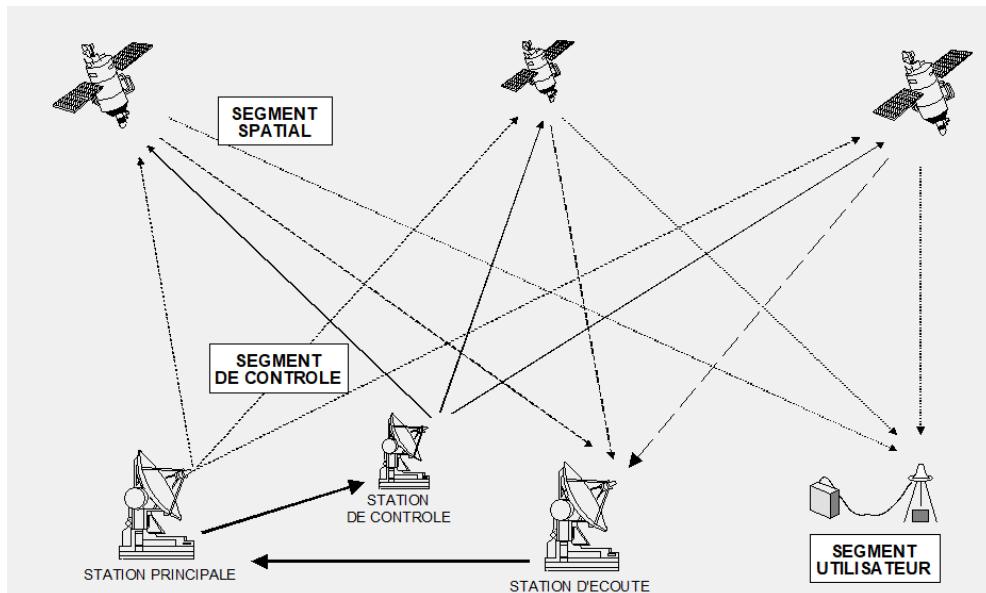
récepteur récupère l'onde porteuse d'un signal composée de message de code/phase disponible à différentes fréquences et vient le décoder afin de déterminer l'heure de diffusion du message et pourra alors calculer le delta temps d'émission – temps de réception. Le signal en provenance d'un satellite met entre 67 ms si celui-ci est au zénith et 86 ms s'il est proche de l'horizon pour parvenir au récepteur.

Configuration du système GNSS

Tout système GNSS est composé de trois segments :

- Le segment spatial
- Le segment de contrôle
- Le segment utilisateur

Chaque GNSS comporte ses propres spécificités, cependant, ils partagent plusieurs caractéristiques communes.



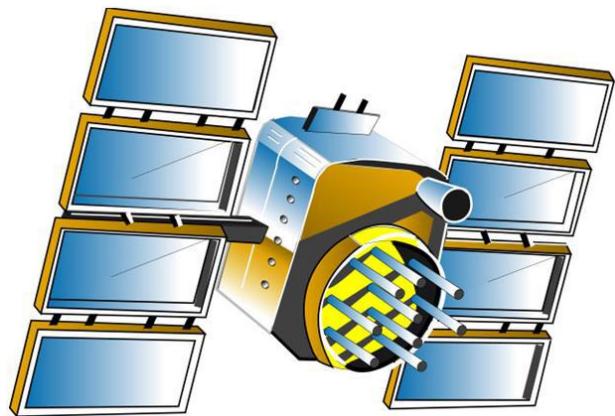
Le segment spatial

Les satellites

Ils sont composés :

- De quatre horloges atomiques (deux en rubidium et deux en césum) avec une précision de l'ordre de 10^{-13} à 10^{-14} s/jour.
- De plusieurs ordinateurs de bord.
- Divers équipements électroniques (des panneaux solaires pour l'alimentation, un système de propulsion pour les réajustements d'orbite, la stabilité et le contrôle, un émetteur/récepteur radio...)

Dans l'exemple du système GPS, la constellation comprend actuellement deux catégories de satellites lancés après 1989, différencierées notamment par leur modernisme : les satellites Bloc IIA (Advanced) et Bloc IIR (Replenishment).



Exemple de satellite

Les satellites Bloc IIA ne possèdent pas de capacité réelle de calcul et doivent donc recevoir d'une station maîtresse proche leurs paramètres d'orbite. Les satellites du Bloc IIR, quant à eux, sont munis de possibilités de calcul de leur orbite ce qui leur permet ainsi de se priver de contact avec la station maîtresse pendant plusieurs semaines.

La génération suivante de satellites lancée entre 2010 et 2016, appelée bloc IIF (Follow-On), au nombre de douze leur permet de communiquer entre eux, améliorant leur indépendance des stations de contrôles et sont équipés d'une deuxième fréquence civile (L5). La dernière génération est le bloc III, lancée en 2018, ils émettent un nouveau signal civil (L1C) sur la fréquence L1.

La durée de vie des satellites varie entre 7 ans (bloc IIA) et 10 ans pour ceux du bloc (IIR), pouvant même atteindre 15 ans pour le bloc IIF. Cependant, il s'agit d'une estimation, en effet, selon l'environnement et la maintenance apportée, la durée de vie peut être supérieure : un des satellites du bloc IIA a cessé de fonctionner après 25 ans d'activité (ils sont tous hors service dorénavant).

Le coût d'un satellite varie selon les options fonctionnelles, il tourne autour des 40 millions de Dollars US, auquel il faut rajouter plusieurs coûts annexes comme le coût de lancement.



Satellite GPS : Block IIR

Chaque satellite d'une constellation GNSS diffuse en broadcast un signal permettant de l'identifier et contenant son temps d'émission, son orbite et son statut. Ils permettent aussi à l'utilisateur de mesurer la pseudo-distance R , pour cela, ils utilisent la position spatiale du satellite ρ^s à un instant arbitraire, contenue dans le message de navigation. Ainsi, les utilisateurs peuvent déterminer leur position ρ_r sur la terre par résection.

Ils pèsent plus d'une tonne et mesurent plusieurs mètres d'envergure. Cependant, même si les orbites sont plutôt très stables et prévisibles dans le vide, il est tout de même nécessaire de calculer les infimes dérives et si possible de les corriger. En effet, même si les effets gravitationnels sont nettement réduits à plus de 20 000km

ils ne sont pas nuls pour autant, de même, ils subissent d'autres effets comme la pression des radiations solaires qui affectent aussi l'orbite. Lors des réajustements d'orbite, il est nécessaire de changer son statut en « hors service » pour informer le récepteur d'utiliser d'autres signaux.

Comme mentionné, les satellites GPS utilisent des horloges atomiques en rubidium qui peuvent être synchronisées avec des horloges locales plus précises en césum. Des horloges atomiques à très haute précision sont nécessaires comme la mesure de distance se base sur la vitesse des ondes radios émises par les satellites autour de la vitesse de la lumière (300m/s) et sur le temps de transmission, par conséquent, une erreur d'horloge de l'ordre de la nanoseconde correspond à 30 cm d'erreur sur le calcul de distance.

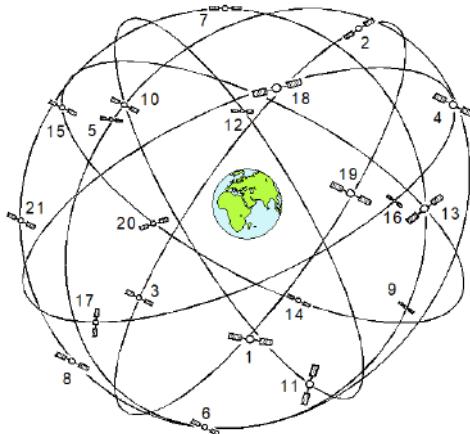
En outre, ils possèdent de nombreux moyens d'identification : le numéro de séquence de lancement, le numéro de la position orbitale, son nom, son identité internationale pour n'en mentionner qu'une partie.

La constellation de satellites

Elle comprend plusieurs satellites (généralement 20 à 30) arrangés sur différentes orbites afin de garantir qu'au minimum quatre satellites soient simultanément visibles électroniquement afin de fournir des données à toute heure et sur une certaine couverture (locale ou mondiale). GPS est par exemple composé de 30 satellites et considéré comme une constellation complète avec 24 satellites opérationnels et 6 satellites de secours.

Une constellation est définie par :

- Une altitude spécifique de l'orbite (plus ou moins circulaire) des satellites aux alentours de 20 000 km.
- Différents plans orbitaux (6 pour GPS) inclinés par rapport à l'équateur (55° pour GPS).
- 4 satellites par plan orbital (pour GPS).
- Une période de révolution spécifique (11h58mn pour GPS).



Exemple de constellation

L'avantage d'utiliser plusieurs constellations de satellites est la disponibilité améliorée ainsi que la redondance. Ainsi, si un des éléments ne fonctionne pas, les récepteurs capables de traiter plusieurs constellations pourront recevoir et utiliser les signaux d'autres satellites d'une autre constellation. De plus, en cas de masquage des signaux, utiliser plusieurs constellations permet de palier à ce problème, notamment dans les zones urbaines ou bien les zones foliacées.

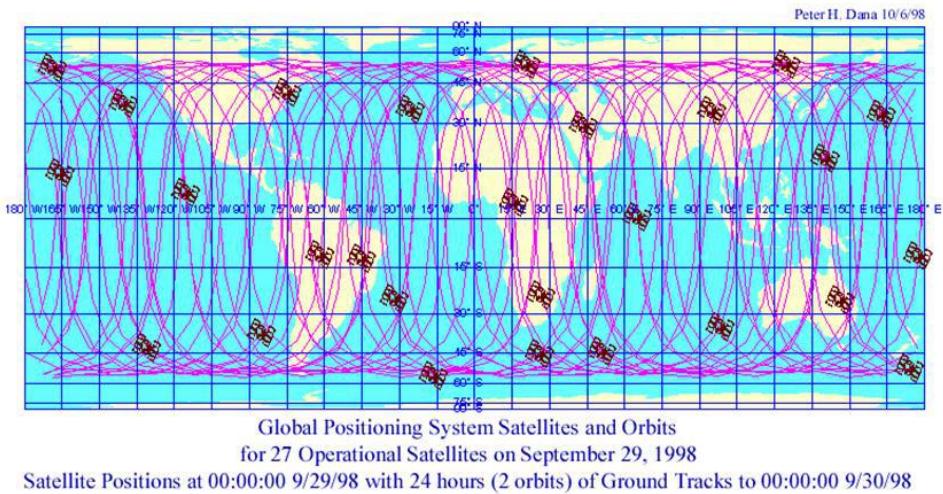
La constellation doit être désignée de façon à optimiser les critères suivants : la précision du calcul de position, la disponibilité des satellites, la couverture du service, la géométrie des satellites. Qui plus est, la taille et le poids des satellites sont aussi des aspects à minimiser, en effet, ils ont un lourd impact sur les coûts des lanceurs, de déploiement et de maintenir. Le choix des orbites est aussi important puisqu'il impacte les manœuvres de maintenance mais aussi la puissance de transmission requise.

Couverture GNSS

En reprenant l'exemple du GPS, l'orbite à 55° au-dessus de l'équateur garantit une bonne couverture des zones équatoriales et tempérées mais elle se dégrade sur les zones polaires.

Ainsi, un satellite se retrouve toutes les 11h58min à la même position au-dessus de la terre. Le système est conçu afin de capter à tout moment 4 satellites au minimum, à 5° au-dessus de l'horizon (même si l'angle de coupure idéale est plus autour des 15 degrés pour réduire les erreurs).

Le nombre de satellites visibles varie au cours de la journée, la disponibilité n'est pas toujours de 100% et dépend aussi de l'environnement (masquage), des régions, etc. Il est de 7 à 8 satellites visibles en moyenne.



Satellite Positions at 00:00:00 9/29/98 with 24 hours (2 orbits) of Ground Tracks to 00:00:00 9/30/98

Le segment de contrôle

Les systèmes GNSS sont aussi équipés d'un segment de contrôle (également appelé segment sol) composé de plusieurs centres de contrôle et d'un réseau d'antennes. Les centres de contrôle ont pour mission :

- La poursuite et le suivi du bon fonctionnement des satellites.
- Les prédictions de l'orbite, c'est-à-dire la position des satellites par rapport à la Terre, et de la dérive d'horloge afin de les inclure dans les messages de navigation des satellites.
- La détermination de l'orbite réelle et de la dérive d'horloge réelle de chacun des satellites.
- Le chargement des données de navigation sur les satellites.
- Le suivi des données auxiliaires (paramètres ionosphériques).

Il est aussi responsable du cryptage des données, des services d'authentification et de protection des attaques.

Le segment de contrôle est composé de plusieurs types de stations.

Les stations d'écoute

Elles sont comprises entre 4 et 6 et réparties dans le monde de façon à optimiser la répartition de couverture. Elles ont le rôle de suivi des satellites afin de recevoir leurs données et leurs statuts et de les transmettre à la station maîtresse.

Les stations de contrôle

Moins nombreuses, aux alentours de 3, elles reçoivent les données de la station maîtresse et les transmettent aux satellites dont les messages de navigation ainsi que les corrections d'orbite et des horloges de haute précision embarquée afin de maintenir la précision.

La station de contrôle principale

Elle reçoit les données des satellites des stations d'écoute afin de les traiter et de générer les messages de navigation. Elle s'assure aussi du chargement de ces messages de navigation sur les satellites, soit directement, soit par l'intermédiaire des autres stations de contrôle, et cela, toutes les deux heures environ.

C'est cette station de contrôle qui s'assure la conservation du temps GPS à l'aide de 50 horloges atomiques.

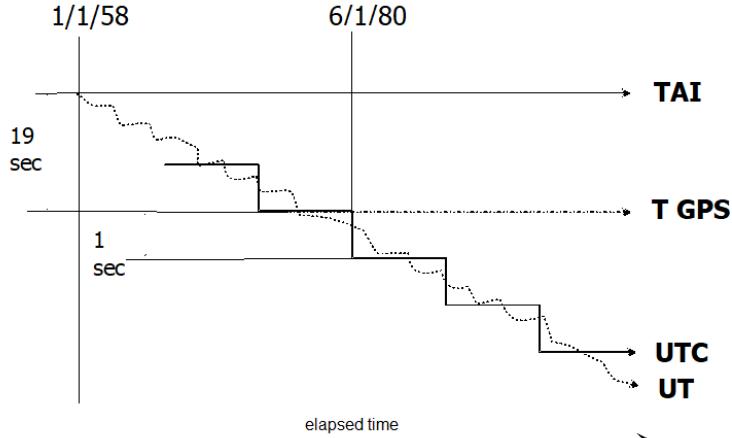
Le temps GNSS

Une erreur d'un millionième de seconde sur le délai de transmission entraînerait une erreur de plus de 300 mètres sur la distance, c'est pourquoi, la mesure du temps est l'un des facteurs les plus importants dans le positionnement par satellite. Pour cela, des horloges très précises (atomiques) sont embarquées dans les satellites. Cependant, les récepteurs ne sont pas équipés d'horloge aussi précise en raison du coût élevé et de l'encombrement inhérent à ce matériel. De ce fait, les horloges ne sont pas synchronisées. Par conséquent, un système de temps ayant une échelle indépendante est défini pour chaque GNSS afin de synchroniser le plus précisément possible l'horloge du récepteur à celle du satellite.

Le temps est mesuré dans un référentiel propre au système GNSS, par exemple pour le GPS, on parle de temps GPS utilisé pour toute mesure GPS.

Ce référentiel est relié aux différents systèmes de temps basés sur divers procédés périodiques comme la rotation de la terre :

- **Le Temps Universel (UT)** : il s'agit du temps solaire moyen de Greenwich au passage inférieur du soleil, pour être plus précis, c'est le temps civil de Greenwich. Il se repose sur une échelle de temps basée sur la durée entre deux midis solaires. Il n'est, cependant, pas uniforme, il y a des instabilités court terme, la durée du jour augmentant lentement (0.002s/siècle).
- **Le Temps Atomique International (TAI)** : temps basé sur la seconde issu d'horloges atomiques (moyenné sur 200 horloges réparties à travers le monde), c'est le système qui fournit la meilleure mesure de temps uniforme (avec le moins d'instabilités) mais il n'est pas diffusé au public civillement.
- **Le Temps Universel Coordonné (UTC)** : l'UTC est utilisé pour coordonner les activités scientifiques mondiales et permet de résoudre un défaut propre au système TAI : la valeur de la seconde est indépendante par rapport à la rotation de la terre ce qui pose un problème pratique, le ralentissement séculaire de la terre autour du soleil d'environ 1sec/an, rendant le jour solaire non synchrone du TAI. C'est pourquoi une seconde UTC s'écoule à la même vitesse qu'une seconde TAI, cependant, cette dernière est incrémentée d'une seconde tous les 18 mois afin de conserver un écart entre les systèmes UTC et UT inférieur à 0.9s. Il s'agit d'un compromis entre le TAI et le temps UT1.
- **Le Temps GPS (TGPS)** : Il est calé sur l'UTC à la date du 06/01/1980 à 0 heure, cependant le TGPS n'est pas incrémenté d'une seconde tous les 18 mois comme l'UTC.
Il y a donc un décalage correspondant à un nombre entier de secondes entre le TGPS, l'UTC et le TAI.
Il y a un offset de -19s avec le TAI et +13s avec l'UTC.



Les types de système de Temps

Le 6 Janvier 1980 à 0 heure sert donc d'origine des temps GPS transmis par les satellites. Ainsi, le temps GPS aura la forme d'un numéro de semaines écoulées depuis cette origine et d'un numéro de secondes écoulées depuis le début de la semaine GPS en cours. Les horloges embarquées dans les satellites sont synchronisées sur l'horloge atomique de la station de contrôle maîtresse, en effet, elles sont périodiquement contrôlées afin

de les recaler pour réduire les erreurs. En sachant que les jours sont sujets à des variations de durée dues aux marées zonales, océaniques, aux variations atmosphériques, etc.

Structure du signal

Les signaux satellitaires doivent permettre des mesures de distance en temps réel, la transmission de données à un nombre illimité d'utilisateurs, et cela, sans perturber les autres services/systèmes. La méthode moderne de mesure de distance repose sur la corrélation entre deux signaux : celui provenant du satellite et reçu par le récepteur et le second signal, identique, généré par le récepteur. Si les deux impulsions sont émises simultanément à l'instant t , on observera un retard de quelques millisecondes du signal provenant du satellite, retardée par la distance séparant le récepteur du satellite (environ 20 000km), par les couches atmosphériques, etc.

Si on prend par exemple la constellation GPS, chaque satellite transmet en permanence plusieurs signaux sur deux fréquences différentes :

- Un message de navigation comportant la position et les caractéristiques du satellite
- Deux codes permettant d'identifier les satellites et de calculer la position.

De nombreuses bandes de fréquence ont été considérées, cependant, c'est la bande L qui offre le meilleur compromis, ainsi les fréquences comprises dans cette bande (entre 1 et 2 GHz) GNSS bénéficient de plusieurs avantages :

- Elles induisent une simplification du design des antennes.
 - ▶ En effet, des fréquences plus élevées impliquent des antennes plus complexes pour la réception des signaux et des fréquences plus faibles impliquent des gains d'antenne plus faibles.
- Les effets de la météo affectant la propagation des signaux GNSS sont réduits.
- Elles permettent une bande passante plus élevée que d'autres bandes de fréquence.
- En dehors du vide, la vitesse de la lumière diminue avec la diminution de la fréquence selon le milieu traversée.
- Les effets de propagation de l'ionosphère sont plus importants à des fréquences plus faibles que celles de cet intervalle.
- La disponibilité des fréquences.
- L'incertitude de Doppler diminuée (elle est plus élevée pour des fréquences plus élevées).

Cependant, d'autres bandes comme la bande C offre de meilleures performances sur d'autres critères et sont aussi étudiées pour de futurs signaux.

La fréquence fondamentale

En gardant l'exemple de GPS, les oscillateurs à bord des satellites génèrent une fréquence fondamentale autour de $f_0 = 10.23\text{MHz}$ avec une stabilité de 10^{-13}s . Cette fréquence fondamentale est volontairement réduite de $\Delta f \sim 4.5674 \cdot 10^{-3}\text{Hz}$ afin de compenser les effets de la relativité.

A partir de cette fréquence fondamentale, on peut fabriquer les fréquences porteuses des signaux émis par les satellites correspondant à des multiples de la fréquence fondamentale.

Les fréquences porteuses

Les satellites génèrent tous les mêmes fréquences à partir de la fréquence fondamentale :

Satellites vers le Récepteur :

Trois fréquences porteuses sont ainsi générées dans la bande L :

- L1 = 1575.42 MHz = $10.23\text{MHz} \times 154$ (longueur d'onde de 19cm)
- L2 = 1227.60MHz = $10.23\text{MHz} \times 120$ (longueur d'onde de 24.4cm)
- L5 = 1176.45MHz = $10.23\text{MHz} \times 115$ (longueur d'onde de 25.5cm)

Communication Sol - Satellites :

Deux fréquences dans la bande S :

- Satellite vers les stations d'écoute : $S_1 = 2227.50\text{MHz}$
- Station de contrôle vers les satellites : $S_2 = 1783.74\text{MHz}$

Ces « ondes porteuses » sinusoïdales sont nécessaires afin de transporter les codes, qui ne peuvent être propagés électromagnétiquement dans le vide, ainsi, la transmission des données du code est possible par modulation du signal par la phase de l'onde porteuse, ce point sera détaillé ultérieurement.

Le code PRN (ou C/A)

Le récepteur utilise un code pseudo-aléatoire : pseudo code périodique (Pseudo Random Noise code PRN). Ils portent ce nom car ils présentent les mêmes caractéristiques statiques que des signaux aléatoires.

Il s'agit d'un code court de 1023 bits (0 ou 1) et d'une durée de 1ms avec une fréquence de $1.023\text{MHz} (=f_0/10)$. La longueur d'onde correspondante est de 297m. La durée relativement courte de ce code permet des acquisitions de signaux rapides, il est cependant plus susceptible aux interférences.

10111100011001101001110001011110001100110100111000111000



Exemple de code PRN

Le code PRN est unique pour chaque satellite, ce qui permet de l'identifier (présent uniquement sur la fréquence L1 en GPS).

C'est en étudiant la corrélation entre le code émis par le satellite et celui généré par le récepteur qu'il est possible de déterminer le temps de propagation et ainsi la distance satellite-récepteur.

Le code P (Precise ou Protected)

Il est utilisé pour le PPS (Precise Positioning Service) par GPS et est actuellement protégé pour un usage militaire.

Pour GPS, il a une fréquence de 10.23MHz , correspondant à la fréquence fondamentale.

Le code contient 2.3547×10^{14} bits correspondant à une durée de 266.4 jours, soit 38 semaines.

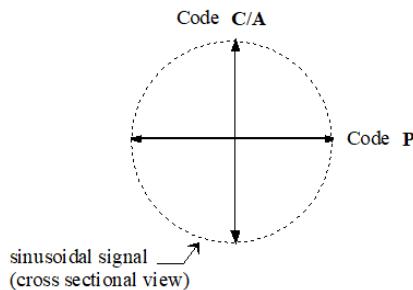
Le code est alors découpé en segments d'une semaine définissant ainsi 37 codes PRN qui sont alors assignés à 32 satellites et 5 stations d'écoute. Le code redémarre donc au début de chaque semaine GPS.

La durée très longue du code P est due à deux raisons principales :

- Il s'agit d'un code pratiquement indétectable : il est noyé dans le bruit atmosphérique.
- Il possède un meilleur pic de corrélation, impliquant une meilleure précision de mesure.

Le code P est déporté de 90° par rapport au code PNR (aussi appelé code C/A : Clear Access ou Coarse Acquisition) sur l'onde circulaire sinusoïdale :

C/A & P CODE OFFSET



Le code P est réservé à un usage militaire car il est protégé depuis 1994 par cryptage contre le leurrage notamment, se traduisant par l'émission délibérée d'un signal GPS erroné afin de tromper le récepteur (antispooing AS). Ce code P crypté est alors appelé code Y, l'acquisition de ce code sans la clef de cryptage et un circuit spécifique.

Il y a aussi une équivalence avec le Commercial Service Authentification (CS-AUTH) sur la bande E6 et l'OS Navigation Message Authentification (OS-NMA) par Galileo.

Le message de navigation

Il s'agit d'un message comportant des informations permettant au récepteur de connaître :

- Les éphémérides (orbite) du satellite.
- Son état et statut.
- Les corrections des dérives d'horloge du satellite par rapport au temps GNSS et l'âge de ces corrections.
- Almanach des satellites.
- Modèle ionosphériques STANAG avec les paramètres de propagation.

Les ondes porteuses, en plus de la modulation de code, sont aussi modulées par le message de navigation avec une fréquence de 50Hz soit une rapidité de modulation de 50 bauds (ici, le signal est bivalent, valeur égale à 0 ou 1, soit une valence de 2, donc le débit correspond à 50 bits/s, faible comparé au code PRN).

Chaque bit dure 20ms et comprend 20 codes PRN (1 par ms) qui permet le calcul de la distance. A cause d'un faible rapport signal sur bruit, un débit faible est nécessaire pour garantir un taux d'erreur bit faible (BER).

En effet, les messages de navigation sont contenus dans une trame principale composée de 25 trames de 1500 bits (50 mots de 30bits), c'est-à-dire $25 \times 1500 = 37500$ bits, avec un débit de 50bits/s on a $37500/50 = 750$ s, soit 12 minutes et 30 secondes. Cette trame principale est divisée en 5 sous trames de 300 bits chacune.

C'est pourquoi un récepteur au démarrage nécessite un certain temps pour pouvoir acquérir la première mesure de position après l'initialisation du récepteur, c'est ce qu'on appelle le Time To First Fix (TTFF). En effet, les messages de navigation possédant un débit faible, un certain temps est nécessaire pour que le récepteur obtienne toutes les données, ici 12 minutes et 30 secondes. Tandis que les paramètres des orbites sont diffusés toutes les 30 secondes.

L'assistance GNSS est un système qui permet de palier ce TTFF très long. Cela consiste à récupérer les informations contenues dans le message de navigation des satellites par un réseau de récepteurs GNSS de référence, et ce, régulièrement, afin de transmettre les données récupérées à un serveur qui viendra, à la demande, retransmettre ces données au récepteur GNSS de l'utilisateur afin de déterminer directement sa position sans avoir à attendre le temps d'émission de 750s. En effet, si le récepteur est connecté à un réseau cellulaire (via une carte SIM) il pourra communiquer avec le réseau de correction et pourra recevoir les informations nécessaires pour faire le premier point. Il s'agit d'une solution locale au sol pour obtenir ces informations bien plus rapidement. De plus, les messages respectent une certaine séquence, si on ne passe pas par un réseau local de récepteur de référence et qu'on perd la communication à cause des perturbations de l'environnement, il faudra tout recommencer depuis le début ce qui est très contraignant pour des temps de convergence de plusieurs minutes. L'assistance GNSS permet donc un démarrage en quelques secondes seulement.

L'almanach

Les almanachs ont pour rôle de faciliter la recherche et l'acquisition des satellites (visibilité, vitesse de rapprochement et d'éloignement pour prendre en compte l'effet Doppler). Pour cela, l'utilisateur doit posséder des informations sur les satellites sans nécessairement atteindre la précision des éphémérides.

L'almanach de tous les satellites est transmis par chacun des satellites, il faut alors recevoir pendant 12.5 minutes consécutives le même signal d'un même satellite afin d'obtenir l'almanach complet de toute une constellation. L'almanach est mis à jour seulement tous les milieux de semaine, portant le numéro de la semaine

GNSS suivante permettant d'obtenir une position plus rapidement, en effet, si le récepteur a fonctionné dans un passé récent (de quelques heures à deux jours maximum) il n'est pas nécessaire de mettre à jour l'almanach.

L'almanach comporte plusieurs paramètres :

- Le numéro du satellite.
- L'état et le statut du satellite.
- La semaine GPS d'acquisition de l'almanach ainsi que le temps GPS dans la semaine d'acquisition.
- Les différents paramètres célestes de l'orbite du satellite.
- La vitesse de l'ascension droite du nœud (orbite).
- Les paramètres de correction d'horloge (phase et fréquence)

Les éphémérides

Il s'agit des paramètres précis des orbites pour chaque satellite, en effet, comme dit précédemment, même si les orbites sont plutôt stables et prévisibles, ils sont tout de même assujettis à certains facteurs qui ne sont pas totalement prévisibles dont : les variations de gravité de la terre, l'attraction lunaire/solaire, les vents solaires, etc. C'est pourquoi, les orbites doivent être calculées périodiquement par la station maîtresse.

Il existe deux types d'éphémérides :

- ▶ **Les orbites radio diffusées « broadcast »** : transmises par les satellites dans le message de navigation, elles correspondent à une **prédiction** de l'orbite calculée en amont par la station maîtresse de contrôle. Chaque satellite diffuse son éphéméride avec une mise à jour toutes les deux heures.
- ▶ **Les orbites précises** : il s'agit d'éphémérides **réelles** mesurées précisément en post-traitement à partir des observations des stations de contrôle. Elles sont disponibles sur internet quelques jours plus tard (via le site de la NASA).

L'un ou l'autre sera privilégié selon l'application (criticité, précision désirée).

Les éphémérides sont composées de plusieurs paramètres dont :

- Les paramètres célestes d'orbite.
 - ▶ Avec L'ascension droite du nœud ascendant notée : Ω , correspondant à l'angle orienté dans le plan équatorial.
 - ▶ L'inclinaison de l'orbite, notée i , correspondant à l'angle d'inclinaison entre le plan équatorial et le plan orbital.
 - ▶ L'argument de latitude au périgée, noté : ω , correspondant à l'angle formé entre la droite entre le centre de la terre et le satellite et la droite entre le centre de la terre et le nœud ascendant (passage de l'hémisphère Sud au Nord).
 - ▶ Le demi-grand axe de l'orbite, noté a .
 - ▶ L'excentricité notée e .
 - ▶ La période de passage au périgée, notée T_0 .

Parameter	Notation
Ω	Right ascension of ascending node
i	Inclination of orbital plane
ω	Argument of perigee
a	Semimajor axis of orbital ellipse
e	Numerical eccentricity of ellipse
T_0	Epoch of perigee passage

Tableau des paramètres célestes d'orbites

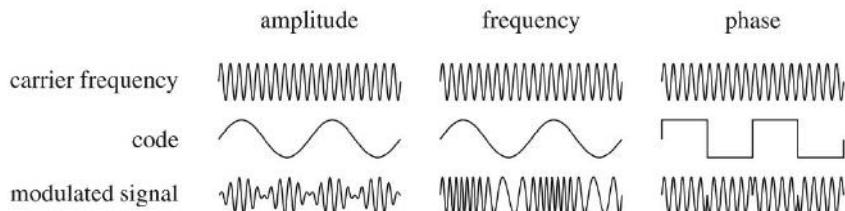
- L'âge des éphémérides.
- Le temps de référence.
- La différence de vitesse moyenne.
- Les coefficients de correction de l'argument du périgée.
- Les coefficients de correction du rayon de l'orbite.

- Les coefficients de correction de l'angle d'inclinaison.

Les méthodes de modulation

Les fréquences porteuses du signal sont modulées sur la phase par le code PRN, le code P et par le message de navigation.

Il existe trois types de modulation : la modulation de fréquence, la modulation d'amplitude et la modulation de phase. Il s'agit d'une variation temporelle des paramètres (amplitude, fréquence, phase) des ondes électromagnétiques afin de porter l'information. Plus on augmente la complexité de la modulation afin d'augmenter le nombre de données transmises, plus on augmente avec le risque d'interférences et le taux d'erreur de bit.



Les méthodes de modulation classiques

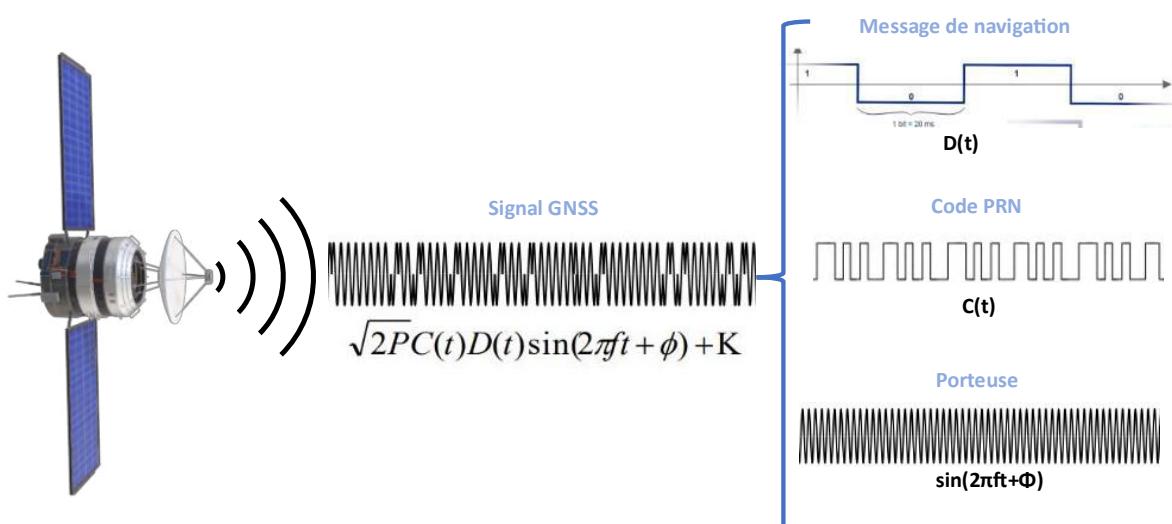
Par exemple, dans le cas de la modulation de phase, on module le signal sinusoïdal par le code binaire : la phase passe de $+\pi$ à $-\pi$ à chaque étape. La phase de la porteuse est alors décalée de π , elle est alors inversée, à chaque fois que la valeur la séquence passe de +1 à -1, c'est-à-dire à chaque changement d'état d'un bit soit 0 soit 1. Comme cette modulation ne connaît que deux valeurs de décalage de phase, on l'appelle la Binary Phase-Shifted Key (BPSK). Le spectre de fréquence du signal modulé correspond à un décalage du spectre du code vers la fréquence de la porteuse.

Le message de navigation (data) $D(t)$, le code $C(t)$ et la porteuse $\sin(2\pi ft + \Phi)$ permettent de définir la formule du signal $s(t)$ émis :

$$s(t) = \sqrt{2P}D(t)C(t)\sin(2\pi ft + \Phi)$$

Avec P la puissance du signal et $\sqrt{2P}$ l'amplitude du signal, en sachant que la puissance correspond à la quantité d'énergie transférée par unité de temps soit :

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T s^2(t)dt$$

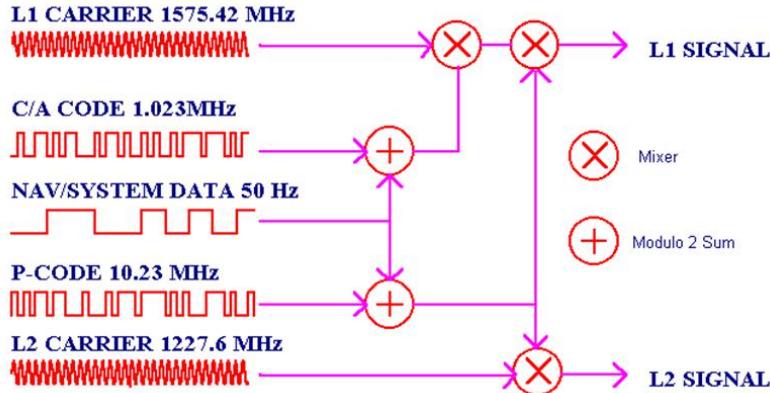


Structure d'un signal GNSS

De plus, la modulation des données de navigation est superposable à la modulation des codes. En effet, cela est possible grâce à la grande différence entre les débits des codes et du message de navigation : 1.023MHz pour le code C/A, 10.23Mhz pour le code P et 50Hz pour le message de navigation.

Pour le système GPS, la construction du signal modulé $s(t)$ se fait ainsi :

- Fréquence L1 : Code C/A (PRN) + Code P + Message de Navigation
- Fréquence L2 : Code + Message de Navigation

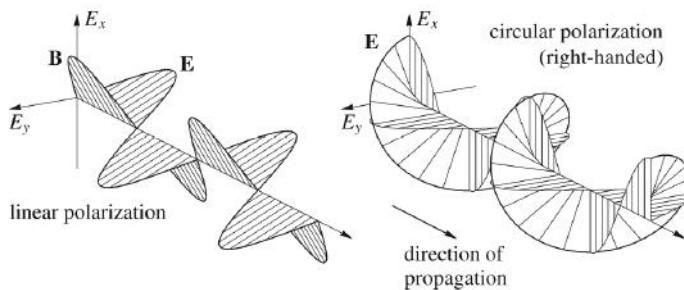


Construction du signal GPS

On pourrait alors se demander « Comment tous les satellites peuvent émettre des données en utilisant les mêmes fréquences sans interférences ? ». C'est possible grâce à des méthodes de séparation des signaux comme le Code Division Multiple Access (CDMA) qui permet d'éviter les recouvrements de fréquence (interférences) des signaux de différents satellites. Cette méthode de multiplexage exploite l'orthogonalité entre les signaux en utilisant des séquences de code orthogonales. Ainsi, les signaux de différents satellites peuvent avoir des recouvrements de spectre fréquentiel et temporel. Le récepteur connaît alors chaque code existant unique pour chaque récepteur et peut en déterminer l'origine.

La méthode Frequency Division Multiple Access (FDMA) exploite, quant à lui, la séparation spectrale des différents signaux. Les signaux des satellites se recouvrent alors dans le domaine temporel et de code. Une autre méthode est le Time Division Multiple Access (TDMA) afin d'éviter les interférences intra-système par l'émission des signaux de différents satellites sur des périodes définies dédiées.

Les satellites génèrent donc des signaux en modulant en phase la fréquence porteuse par le code PRN et par le message de navigation qui sera ensuite multiplexé et polarisé circulairement.



La polarisation linéaire et circulaire

Le récepteur reçoit les ondes émises en continu par les satellites GNSS, toutefois, un retard appelé temps d'émission apparaît dû au parcours de la distance satellite-récepteur. C'est donc ce décalage que mesure le récepteur par la différence entre l'instant de réception (utilisant l'horloge du récepteur) et l'instant d'émission (utilisant l'horloge du satellite). Néanmoins, les horloges du récepteur GNSS et des satellites GNSS ne sont pas synchronisées, provoquant une erreur dans l'écart de temps qu'il est nécessaire d'estimer.

Observation des données

Conceptuellement, les observations des données satellitaires correspondent à des distances déduites en mesurant le temps d'émission ou bien à des différences de phase basées sur le signal du satellite reçu et un signal de duplication généré par le récepteur. Contrairement aux mesures électroniques de distance terrestre, le positionnement par satellite utilise le concept « de direction unique » avec l'utilisation de deux horloges : celle du satellite et celle du récepteur. C'est pourquoi, les distances ainsi calculées sont biaisées par les erreurs d'horloge des satellites et des récepteurs, on parle donc de mesure de pseudo-distance.

Il existe alors **deux modes de mesure** qui divergent dans la façon dont est calculée la pseudo-distance récepteur-satellite : la mesure standard de position se base sur le **code binaire** (PRN) du signal, elle a l'avantage d'être très abordable, cependant, elle permet d'atteindre seulement une précision métrique (3 à 5 mètres) alors que le deuxième mode se base sur la **mesure de la phase** de la porteuse du signal ce qui permet de corriger plus d'erreurs et donc d'augmenter la précision de la mesure de position afin d'atteindre une précision centimétrique, cependant, le coût des récepteurs basés sur la porteuse est bien plus élevé.

Mesure sur le code : pseudo-distance (code-phase)

Si l'on veut exprimer la distance géométrique satellite-récepteur il faut repartir de la mesure initiale du récepteur. En réalité, le récepteur ne mesure pas la distance réelle entre l'antenne du satellite et l'antenne du récepteur, en effet, de nombreux biais altèrent la mesure et s'ajoutent au calcul de la mesure. C'est pour cela qu'on parle de mesure d'une « pseudo-distance » entre l'antenne du récepteur et celle du satellite correspondant à une équation comportant la distance réelle, les décalages d'horloge du satellite et du récepteur, les retards d'allongement atmosphériques, etc.

Un code PRN est généré en même temps sur le satellite et sur le récepteur (il existe un code pour chaque satellite). En effet, le récepteur connaît le code du satellite en question et peut alors le dupliquer.

Afin de pouvoir calculer la pseudo-distance, le récepteur va décoder le code PRN du signal reçu afin de déterminer le temps de réception par le récepteur du signal noté t_r , et le temps d'émission du signal par le satellite noté t^s . Pour cela, on utilise une boucle de code (DLL : Delay Lock Loop) effectuant la corrélation entre les deux codes. On obtient le temps de transmission noté τ en soustrayant le temps d'émission au temps de réception soit :

$$\tau = t_r - t^s$$

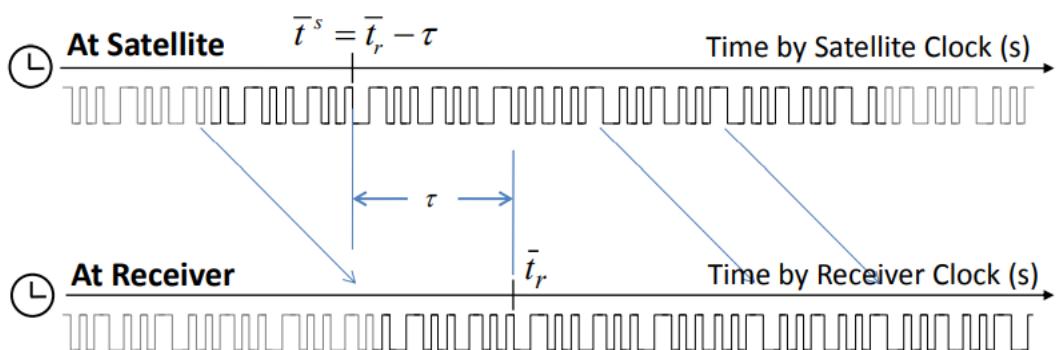
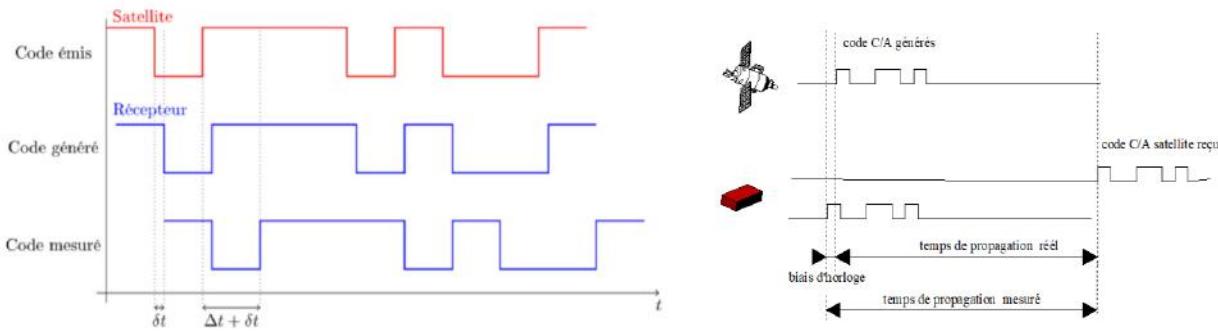


Schéma représentant le code PRN utilisé pour déterminer le délai de transmission

La mesure précise du temps de propagation se fait en corrélant les codes émis par le satellite et celui généré par le récepteur, cela consiste à faire glisser temporellement le code récepteur sur le code satellite jusqu'à obtenir le meilleur pic de corrélation possible. La valeur de temps de glissement correspond alors au temps de propagation.

Pour déterminer la pseudo-distance satellite-récepteur P_r^s , il suffit de multiplier τ par la vitesse de propagation du signal : c (c'est-à-dire la vitesse de la lumière) :

$$P_r^s \equiv c\tau = c(t_r - t^s)$$



Schémas représentants le temps d'émission Δt ainsi que le retard δt lié à la désynchronisation d'horloge

De plus, puisque les horloges des émetteurs (satellite) et récepteurs ne sont pas synchronisées, il existe des erreurs sur le temps t^s qui s'exprime alors par $t^s = t_e + dt^s$ et t par $t_r = t_r + dt_r$

Avec :

- L'instant d'émission du signal en temps GPS noté : t_e
- L'instant de réception du signal en temps GPS noté : t_r
- L'erreur liée à la désynchronisation de l'horloge du satellite/récepteur noté : dt (r pour le récepteur et s pour le satellite)
- c : vitesse de la lumière : $299792458 \text{ m.s}^{-1}$

On en déduit :

$$\begin{aligned} P_r^s &\equiv c\tau \\ &= c(t_r - t^s) \\ &= c[(t_r + dt_r) - (t_e + dt^s)] \\ &= c(t_r - t_e) + c(dt_r - dt^s) \end{aligned}$$

A cette mesure viennent s'ajouter les erreurs locales dues aux multi-trajets, le bruit au niveau du récepteur, exprimées avec ε_p , ainsi que les erreurs ionosphériques Δ_{iono} (le signe moins indiquant que la vitesse du signal a augmenté) et troposphériques Δ_{tropo} .

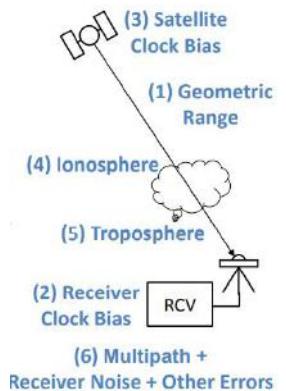
Avec ρ_r^s la distance géométrique satellite-récepteur :

$$\rho_r^s = \sqrt{[x_r(tr) - x^s(te)]^2 + [y_r(tr) - y^s(te)]^2 + [z_r(tr) - z^s(te)]^2} = c(t_r - t_e)$$

Où

Il vient :

$$P_r^s \equiv c\tau = \frac{\rho_r^s}{(1)} + c(dt_r - dt^s) + \frac{\Delta_{iono}}{(4)} + \frac{\Delta_{tropo}}{(5)} + \frac{\varepsilon_p}{(6)}$$



Finalement, dans cette équation de mesure se basant sur le code :

- ▶ La pseudo-distance P_r^s : est mesurée.
- ▶ Les retards de propagation Δ_{iono} et Δ_{tropo} , l'erreur d'horloge du satellite dt^s à l'instant t_e , ainsi que la position du satellite à l'instant t_e ($x^s(te), y^s(te), z^s(te)$) : sont connus ou bien modélisés.
- ▶ L'erreur d'horloge du récepteur dt_r à l'instant t_r ainsi que la position du récepteur GNSS à l'instant t_r ($x_r(tr), y_r(tr), z_r(tr)$) : sont inconnues et doivent par conséquent être calculées.

Les récepteurs actuels permettent en général d'atteindre une précision autour du centième de cycle (correspondant à la longueur d'un bit) pour la mesure se basant sur le code. En prenant l'exemple du GPS, le code utilisé est le C/A (Coarse/Acquisition) d'une largeur de bit (longueur d'onde du code) de 300m, donc $Incertitude = \frac{300}{100} = 3\text{m}$ environ de précision. On peut aussi le retrouver avec le nombre de bit : 1023 bits à

1.023MHz, durant 1ms soit : $Incertitude = 1\text{ms} * \frac{c}{1023} * \frac{1}{100} = 3\text{m}$. Cependant, pour le code P, la fréquence étant 10 fois plus élevée (10.23MHz) la longueur d'onde correspondant à 1 bit est 10 fois plus courte soit : 30 m, donc le 1/100 de bit donne une précision de 30cm.

Par ailleurs, il existe une **ambiguïté du code**, en effet le code PRN est répété identiquement toutes les millisecondes. Il est alors nécessaire que le récepteur puisse reconnaître et corrérer les codes générés au même instant sur les satellites et les récepteurs (au biais d'horloge près) sans avoir un décalage d'une longueur complète de code. Le code complet dure environ 1ms, par conséquent l'incertitude sur la distance due à un décalage du code complet est de 1ms multiplié par la vitesse de la lumière, soit une distance de 300km. C'est ce qu'on appelle l'ambiguïté de code. On peut éliminer cette ambiguïté en paramétrant dans le récepteur une position théorique, ainsi la position théorique sera comparée à celle obtenue par le calcul afin d'éliminer cette ambiguïté. Pour cela, la précision de la position théorique estimée pour le récepteur doit être inférieure à 100km.

Pour rappel, la distance géométrique ρ_r^s est obtenue à partir de la vraie durée de transmission du signal. En d'autres termes, on a ρ_r^s correspondant à la distance entre la position du satellite à la période t^s et celle du récepteur à la période t_r , ayant pour référence le système de temps universel, or, comme ρ_r^s dépend de deux périodes différentes et est indéfiniment dérivable, on peut aussi la décrire avec un développement en série de Taylor, soit :

$$\rho_r^s = (t^s, t_r) = \rho(t^s, t^s + \Delta t) = \rho(t^s) + \dot{\rho}(t^s)\Delta t$$

Avec :

- La dérivée de ρ en fonction du temps : $\dot{\rho}$, appelée la vitesse radiale satellite/récepteur.

Mesure de déphasage de la porteuse : Carrier-phase

L'idée consiste à mesurer la différence de phase entre l'onde porteuse du signal satellitaire reçu et celle générée par le récepteur GNSS. Ici, cette mesure se fait sur un cycle de la porteuse reconstruite, en effet, on démodule le signal afin d'en extraire le code PRN, le code P et le message de navigation.

Il existe deux types de technique afin d'isoler la porteuse du signal modulée :

■ **La corrélation du code PRN** : cette technique permet d'obtenir toutes les parties du signal séparées : le code PRN, le message de navigation, la porteuse qui sera démodulée ainsi que le temps de propagation du signal. Pour cela, il faut :

- ▶ Générer les codes PRN/P avec le récepteur
- ▶ Corréler ces signaux générés avec les signaux émis par le satellite.
- ▶ La modulation des codes PRN/P est alors enlevée.
- ▶ On élimine le message de navigation par filtrage.
- ▶ On a ainsi la porteuse démodulée, on mesure alors le déphasage.

■ **La méthode sans code (codeless/squaring)** : pour cette méthode, on élève le signal provenant du satellite au carré, ainsi, la modulation de la porteuse disparaît (les codes avec), la fréquence de la porteuse est alors doublée.

On peut alors mesurer le déphasage entre le signal émis par le satellite et celui de comparaison, généré par le récepteur. On sait que le signal est exprimé par :

$$s(t) = \sqrt{2PD(t)}C(t)\sin(2\pi ft + \Phi)$$

En généralisant :

$$s(t) = A\sin(2\pi ft + \Phi) = A\sin(\omega t + j)$$

En élevant au carré on double la fréquence et divise par deux la longueur d'onde :

$$s(t)^2 = A^2 \sin^2(\omega t + j) A^2 \frac{[1 + \sin 2(\omega t + j)]}{2}$$

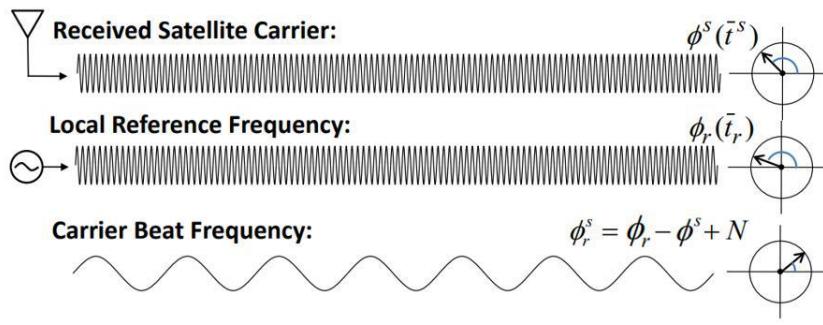


Schéma représentant le calcul du déphasage

Soit l'expression du déphasage :

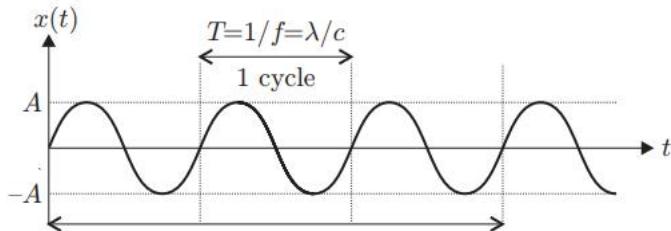
$$\Delta\varphi_r^s = \phi_r(t_r) - \phi^s(t^s)$$

Avec :

- Le déphasage : $\Delta\varphi_r^s$
- La phase de la porteuse reconstruite et émise par le satellite : $\phi^s(t^s)$
- La phase de la porteuse de référence générée par le récepteur, notée : $\phi_r(t_r)$

Cependant, le récepteur GNSS ne récupère que le déphasage décimal (soit la partie fractionnaire) entre l'onde porteuse du satellite et celle générée par le récepteur. Ainsi, le nombre de cycles entiers de la porteuse qui se sont écoulés depuis le début de la mesure est inconnu, il y a une ambiguïté de la mesure de phase. L'ambiguïté entière correspond au nombre de cycles entiers écoulés durant la propagation de la porteuse.

Un cycle peut être défini par une période du signal, soit une longueur d'onde $\lambda = c/f$.



Représentation d'un cycle de phase

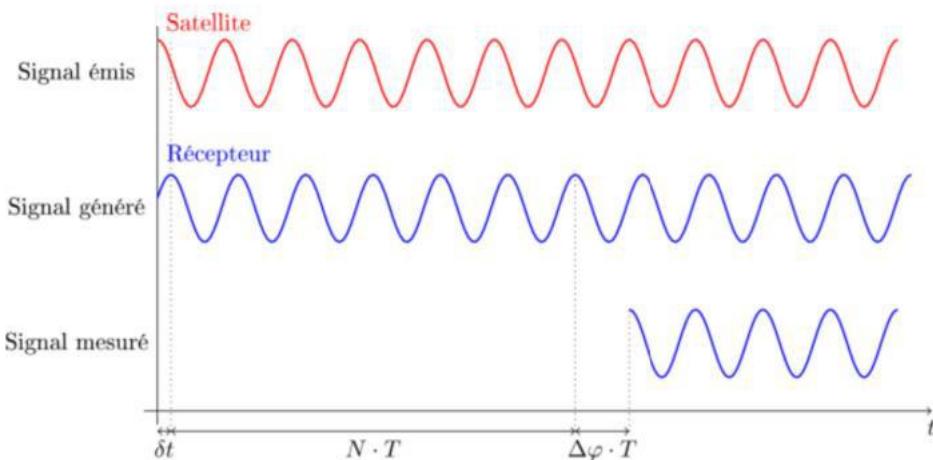


Schéma représentant la mesure du déphasage total

On peut réduire cette ambiguïté à l'aide d'un compteur permettant le comptage du nombre de cycles entiers entre deux instants t et t_1 . Cependant, cela ne permet pas de compter tous les cycles, il y a une partie inconnue de la mesure correspondant à l'ambiguïté initiale du nombre d'entiers noté N . De plus, la perte de la communication avec le satellite engendre des sauts de cycle venant fausser la mesure.

Le déphasage total correspond donc à la somme entre ce déphasage d'onde décimal et cette partie entière.

D'où le déphasage total :

$$\Delta\Phi_r^s = \Delta\varphi_r^s + N_r^s$$

Avec :

- Le déphasage total noté : $\Delta\Phi_r^s$
- L'ambiguité de mesure notée : N_r^s

Or, la phase, mesurée en radian, est notée : $\varphi = \omega t$, avec la fréquence circulaire ω (aussi appelé vitesse angulaire), alors qu'elle est notée $\varphi = ft$ lorsqu'elle est mesurée en cycles, c'est cette dernière expression que l'on utilisera pour la suite des calculs.

Ainsi, en dérivant en fonction du temps, on obtient :

$$f = \frac{d\varphi}{dt}$$

En intégrant la fréquence f entre le temps initial noté t_0 et t donne l'équation suivante :

$$\varphi(t) - \varphi(t_0) = \int_{t_0}^t f dt$$

Avec :

- La phase à l'instant d'origine t_0 notée : $\varphi(t_0)$

A partir de $\varphi = ft$, on retrouve alors :

$$\begin{aligned}\varphi &= \frac{t}{T} = \frac{\rho}{\lambda} \\ \varphi &= ft - \frac{\rho}{\lambda}\end{aligned}$$

Avec :

- La longueur d'onde du signal émis : λ
- La période : T
- La distance géométrique : ρ

En rappelant que la formule de la célérité d'un signal s'écrit $c = \lambda f$ il vient alors :

$$\begin{aligned}\varphi &= f(t - \frac{\rho}{c}) \\ \varphi &= f(t - t_0) + \varphi_0\end{aligned}$$

Avec :

- La fréquence du signal notée : f
- L'instant d'origine correspondant à l'instant d'émission du signal par le satellite noté : t_0
- L'instant de mesure correspond à l'instant de réception du signal par le récepteur noté : t
- La phase à l'instant d'origine t_0 notée : φ_0

En reprenant l'expression du déphasage total, on en déduit :

$$\begin{aligned}\Delta\Phi_i^j &= \Delta\varphi_i^j + N_r^s \\ \Delta\varphi_i^j &= \Delta\Phi_i^j - N_r^s \\ \lambda\Delta\varphi_i^j &= \lambda\Delta\Phi_i^j - \lambda N_r^s \\ \lambda\Delta\varphi_i^j &= \lambda(f(t - t_0) + \varphi_0) - \lambda N_r^s\end{aligned}$$

Or, en prenant $\varphi_0 = 0$ et $c = \lambda f$ on peut simplifier, on obtient alors l'équation de la partie décimale du déphasage mesurée par le récepteur GNSS :

$$\lambda\Delta\varphi_i^j = c(t - t_0) - \lambda N_r^s$$

De plus, on sait que t_0 s'exprime par $t^s = t_e + dt^s$ et t par $t_r = t_r + dt_r$

Avec :

- L'instant d'émission du signal en temps GPS noté : t_e
- L'instant de réception du signal en temps GPS noté : t_r
- L'erreur liée à la désynchronisation de l'horloge du satellite/récepteur notée : dt (r pour le récepteur et s pour le satellite)
- La longueur d'onde du signal émis : λ

On en déduit alors l'expression de la partie décimale du déphasage en fonction des instants et décalages d'horloge :

$$\begin{aligned}\lambda\Delta\varphi_i^j &= c[(t_r + dt_r) - (t_e + dt^s)] - \lambda N_r^s \\ \lambda\Delta\varphi_i^j &= c[(t_r - t_e) + (dt_r - dt^s)] - \lambda N_r^s \\ \lambda\Delta\varphi_i^j &= c(t_r - t_e) + c(dt_r - dt^s) - \lambda N_r^s\end{aligned}$$

Finalement, en utilisant la mesure de phase traduite en distance L_r^s et la distance géométrique satellite-récepteur $\rho_r^s = c(t_r - t_e)$, on détermine :

$$L_r^s \equiv \lambda\Delta\varphi_r^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) - \lambda N_r^s - \Delta_{iono} + \Delta_{tropo} + \varepsilon_\Phi + d_r^s$$

- Comme pour le calcul de pseudo-distance se basant sur le code, il vient s'ajouter les erreurs locales dues aux multi-trajets, le bruit au niveau du récepteur, exprimées avec ε_p .
- Δ_{iono} et Δ_{tropo} correspondent aux erreurs de retard dues à la traversée ionosphérique et troposphérique du signal
- Il est aussi possible d'ajouter au calcul d'autres erreurs avec d_r^s dont notamment : l'erreur d'offset de la phase centrale du récepteur/satellite, variation de la phase centrale, effet de la relativité, déplacement, etc.

De plus, ici, on a supposé pour simplifier que $\varphi_0 = \Phi_0 = 0$, or, ce n'est pas forcément le cas en réalité, ce qui signifie que des biais sur la phase de la porteuse peuvent s'ajouter avec : $\Phi_{r,0}$ et Φ_0^s la phase initiale du récepteur et du satellite respectivement, il est également possible de les représenter avec $B_r^s = \Phi_{r,0} - \Phi_0^s - N_r^s$.

L'équation de la mesure de phase devient ainsi :

$$L_r^s \equiv \lambda\Delta\varphi_r^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + \lambda B_r^s - \Delta_{iono} + \Delta_{tropo} + \varepsilon_\Phi + d_r^s$$

Finalement, dans cette équation de mesure se basant sur la phase :

- ▶ La partie décimale du déphasage $\Delta\varphi_r^s$: **est mesurée**.
- ▶ Les retards de propagation Δ_{iono} et Δ_{tropo} , l'erreur d'horloge du satellite dt^s à l'instant t_e , ainsi que la position du satellite à l'instant t_e ($x^s(te), y^s(te), z^s(te)$) : **sont connus ou bien modélisés**.
- ▶ L'erreur d'horloge du récepteur dt_r à l'instant t_r ainsi que la position du récepteur GNSS à l'instant t_r ($x_r(tr), y_r(tr), z_r(tr)$) et le nombre entier de cycle N_r^s : **sont inconnus et doivent par conséquent être calculés**.

En comparant à la mesure de code :

$$P_r^s \equiv ct = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + \Delta_{iono} + \Delta_{tropo} + \varepsilon_p$$

On peut alors remarquer que la mesure de phase se basant sur la porteuse permet donc de corriger encore plus de biais que le calcul de la pseudo-distance basée sur le code, la précision est, de ce fait, grandement augmentée. Pour la mesure de code, le code est ralenti au passage dans l'ionosphère alors que la porteuse est accélérée, d'où la différence de signe pour le delta ionosphère.

Les récepteurs actuels permettent la mesure du décalage de phase avec une précision de 3 millièmes de cycles. En reprenant le même exemple que pour la mesure de code : un GPS avec une longueur d'onde de 300m on a : $\frac{300}{3000} = 0.1m$, soit environ 10cm de précision. Le bruit sur la mesure de phase est d'environ 1mm rendant la précision de la mesure de phase bien meilleure que celle de la mesure de code.

En prenant GPS, la longueur d'onde des porteurs est pour $L1 = 19.0\text{cm}$ et pour $L2 = 24.4\text{cm}$ on atteint donc une précision submillimétrique soit : $\frac{0.19}{3000} = 0.063\text{mm}$ pour L1 et $\frac{0.244}{3000} = 0.0813\text{mm}$ pour L2 en théorie.

En formant des équations de doubles différences à l'aide de deux récepteurs, il est possible de s'affranchir des erreurs dues aux désynchronisations d'horloges, de réduire l'impact de l'erreur de traversée atmosphérique. Qui plus est, la qualité de cette correction dite différentielle est d'autant meilleure que la distance entre les deux récepteurs (ligne de base) est courte. Cela s'explique par la nécessité pour les deux récepteurs de partager des caractéristiques provoquant des erreurs similaires, en effet, plus les signaux traverseront des zones atmosphériques proches, plus ils partageront les mêmes contraintes de propagation et les erreurs déterminées pour un récepteur et leurs corrections associées seront applicables pour un récepteur suffisamment proche.

Les sources d'erreurs

Les signaux proviennent de plusieurs GNSS (GPS/GLONASS/GALILEO/COMPASS), permettant une couverture internationale, une meilleure précision, des temps de convergence très réduits (temps d'analyse réduit) et une utilisation 24h/24h. Au minimum, 5 satellites sont nécessaires pour garantir un positionnement centimétrique. En moyenne, un récepteur est en mesure de capturer 7 satellites d'une même constellation et donc par exemple 14 satellites couvrant 2 constellations. Plus il y a de constellations traitées par notre récepteur, plus il y a de signaux utilisés et plus on améliore ainsi la performance en matière de disponibilité et de temps d'acquisition.

Les erreurs initiales apparaissent au niveau du satellite :

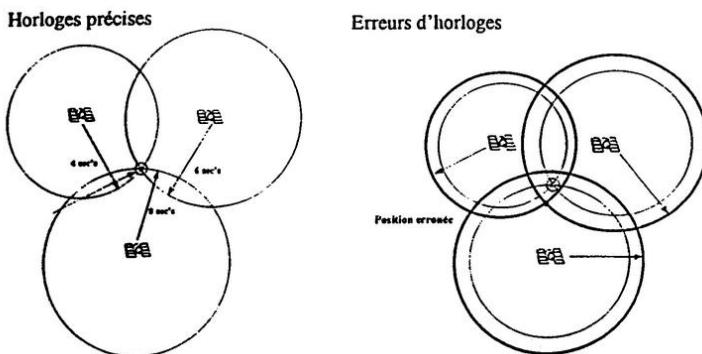
■ Erreurs d'orbites des satellites : db.

- Elle intervient sur le calcul de la ligne de base séparant deux stations de mesure et s'exprime par : $db = \frac{dr \cdot b}{r}$, avec dr l'erreur radiale sur l'orbite, r l'altitude de l'orbite et b la longueur de la ligne de base.

Il existe deux types d'orbites : les orbites radiodiffusées et les orbites précises. Les premières, comme son nom le suggère, sont diffusées en temps réel par les satellites offrant ainsi une précision métrique. Les deuxièmes sont calculées et diffusées par l'International GNSS Service (IGS) permettant d'atteindre une précision centimétrique.

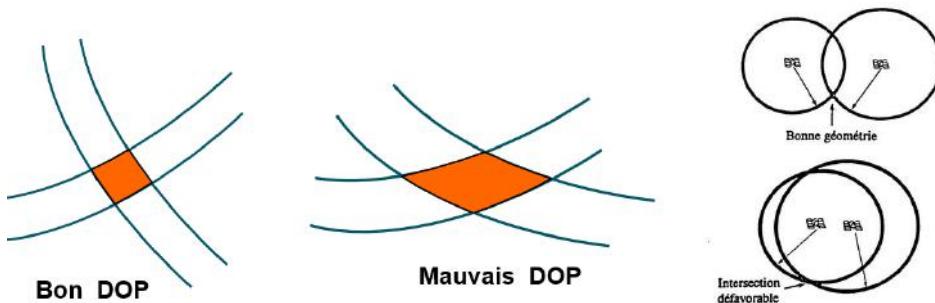
■ Erreurs d'horloge des satellites.

- Les horloges embarquées dans les satellites dérivent, elles doivent être corrigées par la station maîtresse incluant dans le message de navigation la correction à appliquer, cependant, la correction est une prédiction qui est donc une approximation de la réalité.



Erreurs d'horloge et impact sur la mesure de position

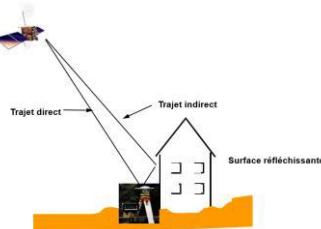
- De biais de code et de phase.
- Dilution of Precision** : DoP, correspond à l'erreur provoquée par la géométrie de la constellation de satellite, cela est dû au fait qu'en réalité on ne mesure pas un point précis mais une position \pm une erreur de mesure associée, on obtient donc une surface et non un point. Or, cette surface peut être déformée selon la position des satellites.



Déformation de la surface en fonction de la géométrie : erreur DoP

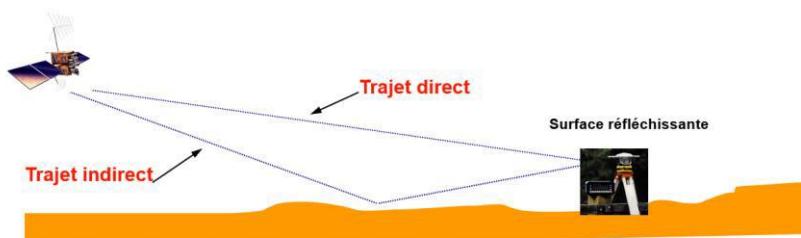
Cependant, outre les erreurs d'orbites des satellites, d'horloge des satellites, de biais de code et de phase qui impactent aussi la mesure de distance, il existe de nombreux facteurs locaux pouvant altérer le signal :

- **Trajets multiples** : l'environnement autour du récepteur peut aussi créer des perturbations de type masquage ou bien « multi-trajets » à cause de la réflexion spéculaire du signal pour les surfaces transparentes et la réflexion diffuse pour les surfaces rugueuses (métaux, monocristaux, matériaux amorphes) qui vont parasiter la réception du signal.



Effet des multi-trajets

- ▶ A cause de ces réflexions parasites, les ondes arrivent sur le récepteur et sont observées comme si elle provenait directement du satellite, or, avec les réflexions, la distance est modifiée ce qui fausse la mesure, elles créent aussi des interférences.
- ▶ Elles augmentent selon l'élévation des satellites, plus ils sont bas sur l'horizon et plus il y aura de réflexions multi-trajets.



Réflexions sur la surface terrestre : effet des multi-trajets dus à un satellite trop bas

- **Les bruits électroniques** de mesure au niveau du récepteur.
- **Les interférences** avec d'autres émetteurs ayant des signaux de même fréquence.
- **Les perturbations liées à des attaques** : leurrer un système GPS, c'est-à-dire, faire croire à un récepteur qu'il reçoit une position qui n'est pas la sienne en réalité en émettant des messages avec la même fréquence GNSS. Il existe aussi les attaques de brouillage consistant à saturer le récepteur GNSS.

De plus, il existe des erreurs liées à la propagation du signal, les messages ne se propagent pas réellement à la vitesse de la lumière, en effet, la vitesse et la direction de propagation peuvent être perturbées par :

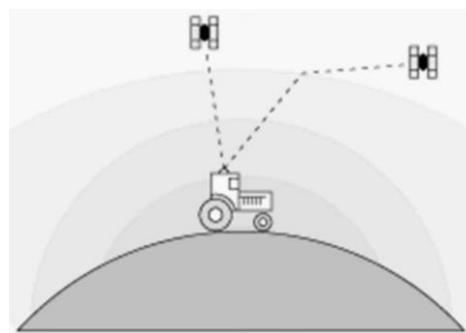
- **Les différentes couches atmosphériques (ionosphère, troposphère).**
 - ▶ **Ionosphère** : une couche s'étendant de 50 à 1000 kilomètres d'altitude, il s'agit d'un milieu dispersif, c'est l'effet d'ionisation (dû à la présence de charges libres) qui va affecter la propagation des ondes radio en altérant leur vitesse de propagation, en effet les ondes porteuses vont être accélérées alors que les codes eux seront ralentis,

en traversant ce milieu, donc le temps de transmission sera faussé causant des erreurs sur le calcul de distance satellite-récepteur. L'ionisation dépend de plusieurs facteurs dont le rayonnement solaire et l'activité solaire. Le soleil est caractérisé par des cycles d'activité ayant des périodes de 11 ans tandis que le rayonnement solaire est maximal aux alentours de midi et l'été. En cas de trop forte activité solaire, le biais peut atteindre 50m. Il est nécessaire de corriger cette erreur pour atteindre une précision centimétrique, soit en modélisant les erreurs (par les stations de contrôle) qui seront transmises dans le message de navigation des satellites. On utilise cette solution pour les récepteurs monofréquences, soit pour les récepteurs bi-fréquences, en utilisant une méthode différentielle.

- ▶ **La réfraction troposphérique** : il s'agit d'une couche électroniquement neutre, il s'agit d'un milieu non dispersif pour les ondes radios allant jusqu'à 15Ghz, donc la propagation des signaux dans cette couche ne sera pas altérée en fréquence. Cette couche s'étend de 0 à 20km d'altitude. La vitesse de propagation et sa direction sont impactées indépendamment de la fréquence du signal, dû aux variations de l'indice de réfraction du milieu qui peut varier selon la température, la pression, l'humidité relative.

Le trajet réel subira une courbure augmentant en fonction de la distance parcourue, et la vitesse de propagation sera diminuée. Ces effets varient en fonction de la hauteur du satellite et donc de son angle par rapport à l'horizon, en effet, plus l'angle est faible, plus la couche traversée sera importante.

Il n'est pas possible d'éliminer cette erreur avec des méthodes différentielles.



L'effet atmosphérique

- **La météo** (humidité, température, pression).
- **Saut de cycle** : lors de la mise en route du récepteur, le compteur de cycles de phase entiers démarre, or, le compteur redémarre à chaque coupure, des sauts de cycle apparaissent faussant le comptage.
 - ▶ Un rapport signal sur bruit trop faible peut aussi être la cause d'un saut de cycle (le rapport signal sur bruit est altéré par : des mauvaises conditions atmosphériques, trajet-multiples, élévation trop faible, présence de végétation).
- **Le centre de phase de l'antenne** : correspondant à la différence entre les centres physiques et électriques de l'antenne, cette erreur apparaît si le type d'antenne sélectionné pour le calcul est différent que celui réellement utilisé sur le terrain ou bien s'il y a une erreur dans le paramétrage de la hauteur d'antenne.
- **Les effets de la relativité restreinte et de la relativité générale**.
 - ▶ **Sur l'orbite des satellites** : le champ gravitationnel provoque une augmentation de la courbature de l'espace-temps des signaux des satellites. Il est alors nécessaire d'apporter des corrections sur les erreurs de propagation induites.
 - ▶ **Sur l'horloge des satellites** : la fréquence fondamentale $f_0=10.23\text{Mhz}$ des horloges embarquées est influencée par le mouvement des satellites et la différence du champ gravitationnel entre le satellite et le récepteur. Les effets sont cependant assez faibles et doivent être superposés linéairement. Des éléments de correction peuvent être ajoutés dans le message de navigation, ils pourraient aussi être pris en compte dans le calcul du temps d'émission directement.
 - ▶ **Sur l'horloge du récepteur** : l'horloge du récepteur à la surface de la Terre est en rotation par rapport au point de référence géocentré, cela est dû à la rotation de la Terre et donc du récepteur, pendant l'observation des signaux satellite-récepteur. On parle de l'effet Sagnac.

Par conséquent, les erreurs sur la mesure de position dépendent beaucoup de l'environnement.

Il est nécessaire de pouvoir modéliser toutes ces sources de perturbation et de les corriger avec un système différentiel afin d'atteindre une précision centimétrique.

Voici un schéma récapitulatif des sources d'erreurs :

Sources of errors



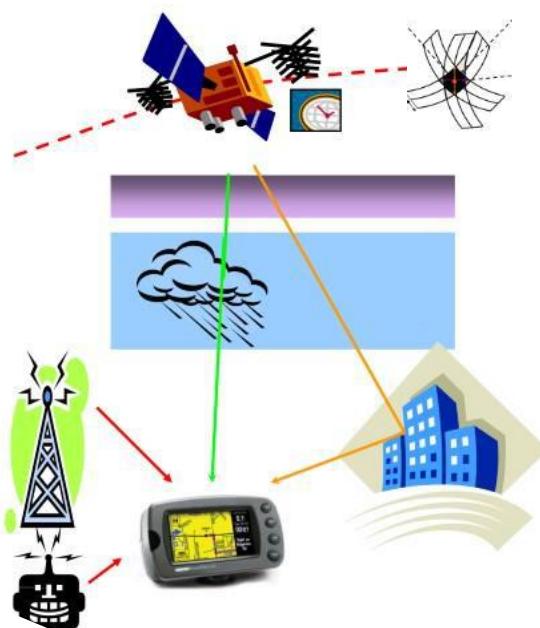
- Orbit
- Satellite clock
- DoP : Dilution of precision



- Ionosphere
- Troposphere
- Multipath



- Interference
- Hacking



Les différentes sources d'erreurs sur la mesure de position

Le format standard des données GPS utilisé pour la sortie du récepteur est le National Marine Electronics Association (NMEA).

Le standard pour la position est la trame Global Positioning System Fix Data (GGA) pouvant contenir l'heure à laquelle est partie la trame du GPS, la latitude GPS, la longitude GPS, le type de positionnement afin de déterminer si on est sur un positionnement précis ou pas précis selon le coefficient (de 1 à 4 pour précis), le HDOP (précision horizontale estimée par GPS).

La sortie varie en fonction de l'équipement : cela peut être en port série, en Bluetooth, en Ethernet, en USB, etc.

La correction différentielle

Positionnement absolu : mode naturel

Il existe de nombreuses solutions pour corriger les erreurs décrites précédemment. Il y a des solutions dites natives consistant à utiliser différentes constellations en même temps, il effectuera une mesure de code uniquement. Le point obtenu par cette méthode se nomme le point isolé, cette méthode est notamment utilisée pour la navigation non précise.

Le récepteur va calculer plusieurs positions issues de deux constellations différentes (par exemple GPS et Galileo) simultanément et effectuera la moyenne des deux positions pour obtenir une position plus proche de la valeur réelle. On peut appliquer le même concept en utilisant plusieurs fréquences (par exemple la fréquence L1 et L2 de la constellation GPS), faire un calcul de position en utilisant le signal des deux fréquences et moyenner les deux résultats afin d'obtenir une position avec une précision améliorée. Cependant, ces deux méthodes, même combinées, ne permettent pas de descendre en dessous d'une précision métrique. Ces solutions permettent d'obtenir une position absolue.

Positionnement relatif : le GNSS différentiel

Afin d'atteindre une précision centimétrique il est nécessaire de travailler sur le positionnement relatif.

Les systèmes de mesure de position reposant sur le GNSS sont améliorés par le DGNSS : le Differential GNSS permettant d'atteindre une précision centimétrique de l'ordre de 1 à 3cm.

Pour s'affranchir de la plupart des erreurs identifiées précédemment, la différence de mesure en fonction de différents paramètres (entre deux satellites, deux récepteurs, deux instants différents ou bien une combinaison) est appliquée. Pour cela, il est nécessaire que les observations entre deux entités soient simultanées, en effet, les corrections ne sont valables que pour l'instant t de la mesure.

Des bases de références avec une position connue vont permettre de déterminer les corrections à apporter aux erreurs de mesure afin d'améliorer la précision du calcul de position.

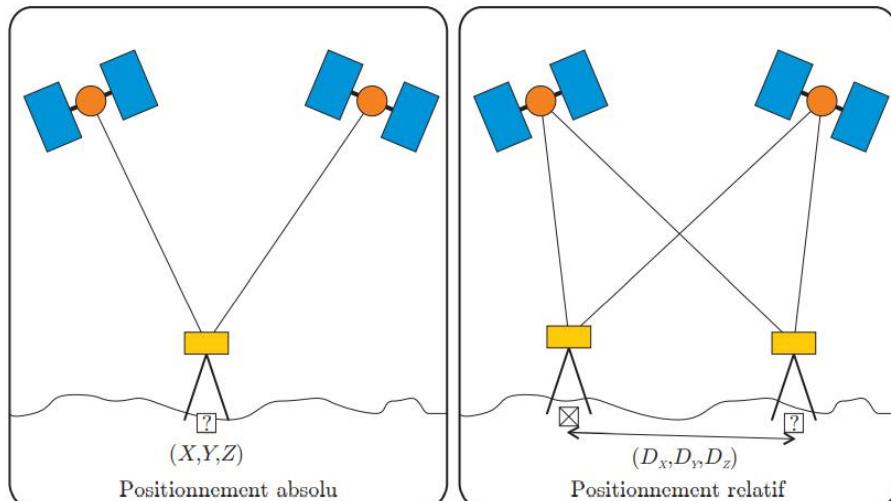
L'influence des erreurs dues à la propagation des ondes dans l'ionosphère et la troposphère est d'autant plus réduite que la ligne de base (distance base-rover) est courte.

La fréquence des mesures dépend des besoins de réactualisation de l'application : cela varie d'une fois toutes les 20 secondes pour une application statique à plusieurs fois par seconde pour une application mobile.

Il est essentiel de prendre en compte la corrélation géographique des erreurs dispersives (allongements ionosphériques) et géométriques (allongements troposphériques). On considérera l'impact de ces erreurs similaires pour des récepteurs situés dans un rayon de 30km maximum l'un de l'autre. C'est sur ce concept que repose le DGNSS.

Il existe alors deux possibilités :

- **Le DGNSS post-traitement** : consiste à enregistrer les mesures sur le point connu et sur le point à déterminer et appliquer les corrections de manière différée.
- **Le DGNSS temps réel** : les corrections sont communiquées directement au récepteur dont le point est à déterminer afin de les appliquer en temps réel.



Comparaison entre le positionnement absolu et le positionnement relatif

Détermination de la position exacte d'une base référentielle

Pour réaliser cette correction GNSS différentielle, il est impératif de connaître la position la plus précise possible de la base de référence, en effet, les corrections calculées dépendent de la précision de celle-ci.

Il est primordial de travailler sur le même référentiel géographique et d'utiliser une base fixe permanente. Pour cela, plusieurs techniques sont possibles, l'une d'elle consiste à mesurer les données satellitaires pendant près de 24 heures, de stocker ces données en les convertissant au format RINEX et de les transmettre à un service de calcul de position réelle comme l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) qui calculera précisément les coordonnées de latitude, longitude et altitude de la base. À la suite de cela, l'IGN effectuera un calcul post traitement afin de corriger les données brutes de la base de référence, pour cela l'IGN utilise leur propre base de référence appartenant à leur réseau géodésique permanent, finalement, après ce traitement on pourra obtenir une précision précise corrigée de notre base de référence, avec une « exactitude estimée » variante, indiquant la qualité du calcul.

Dans la suite de ce chapitre, on se concentrera sur les corrections différentielles cinématiques temps réel par mesure de phase de la porteuse, en effet, c'est ce type de correction qui est le plus adapté au besoin de l'application : corriger les mesures de position d'un véhicule en déplacement avec une contrainte de temps (temps réel) et de précision (inférieur à 20cm).

Mode	Méthode	Technique utilisée	Précision	Application
GPS naturel	temps réel	code C/A en temps réel mono fréquence	avec S.A. XY → 100 m Z → 140 m Sans S.A.: XY → 10 m Z → 15 m	positionnement approximatif
G.P.S. différentiel	statique	mesure de phase post-traitement mono ou bi-fréquence	centimétrique	densification de réseaux géodésiques
	statique rapide	mesure de phase post-traitement mono ou bi-fréquence	centimétrique	densification de réseaux géodésiques
	cinématique	mesure de phase post-traitement mono ou bi-fréquence	centimétrique	levé de détail
	Temps réel par le code	mesure du code C/A temps réel. Transmission en temps réel des corrections différentielles. Récepteurs mono fréquence	suivant la longueur de la ligne de base : métrique ou décamétrique	implantation sismique, positionnement de navires
	Temps réel par la phase	Transmission en temps réel des corrections différentielles. Récepteurs mono ou bi-fréquence	centimétrique	Implantation. Levé de détail.
	trajectographie	mesure du code C/A lissé par la mesure de phase post-traitement mono fréquence	submétrique	levé de détail, levé de routes, tracés ...

Tableau récapitulatif des différentes méthodes de correction du positionnement par satellite

Comme le détail ce tableau, il existe de nombreux types de correction qui ne sont cependant pas adaptés au contexte de ce projet.

Deux modes de correction

Cette partie du rapport se concentre sur le GNSS différentiel cinématique temps réel se reposant sur le calcul de corrections instantanées sur le point connu afin d'être transmises immédiatement au mobile lui permettant de corriger sa position en temps réel. La transmission des corrections est possible par radio, réseau cellulaire, satellite, internet, etc.

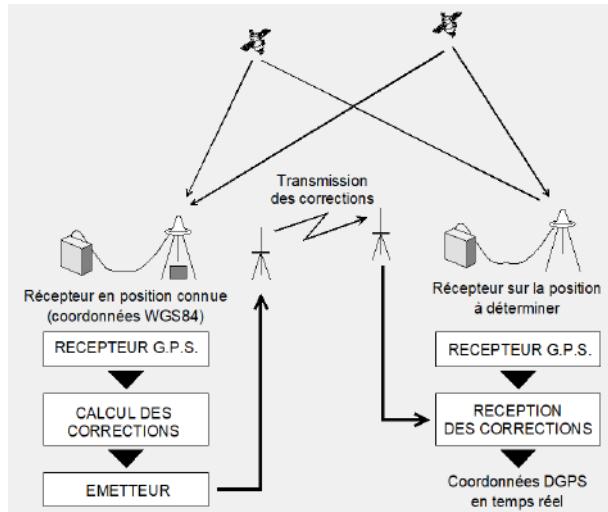


Schéma du principe du mode GNSS différentiel

Premier mode

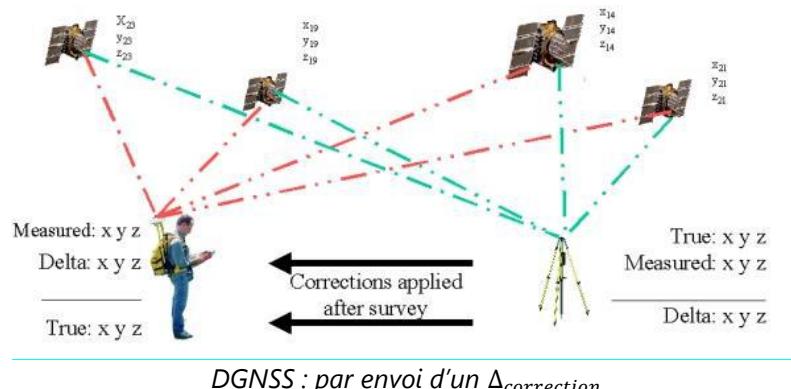
Il existe deux modes de correction différentielle : **le premier mode** consiste à mesurer la position d'un satellite avec une base référentielle mise en station sur un point connu et de faire la différence entre la mesure de distance satellite-récepteur obtenue à partir de la position réelle connue de la base et sa position mesurée afin d'obtenir le delta d'erreur qui est envoyé au rover, il suffit alors de faire pour la base de référence :

$$P_{\text{mesurée}} - P_{\text{réelle}} = \Delta_{\text{correction}}$$

Cette correction est envoyée au rover et ce dernier calcule :

$$P_{\text{corrigée}} = P_{\text{mesurée}} - \Delta_{\text{correction}}$$

Il est possible d'appliquer cette correction à d'autres récepteurs dans un périmètre proche.



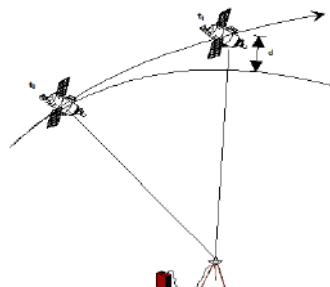
Le second mode

Il se définit par la mesure des signaux d'un ou des mêmes satellites simultanément par une base de référence et un rover et par la retransmission des données brutes (Raw data) de la base de référence ainsi que sa position réelle au rover. Une différence est alors réalisée entre la position de la base de référence mesurée et la position du rover mesurée, pour que certaines erreurs s'annulent : en effet, la base et le rover étant suffisamment proches, ils partagent les mêmes erreurs. On obtient alors un vecteur base-rover (appelé ligne de base) et en utilisant la position exacte connue de la base de référence on peut alors déterminer la position du rover avec le vecteur base-rover, et cela, avec une précision améliorée par rapport au calcul de position absolu.

La simple différence

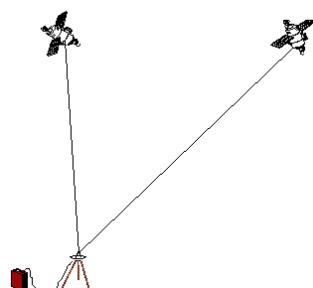
On parle alors de simple différence lorsqu'on soustrait la mesure de la base à la mesure du rover. L'intérêt de la simple différence est d'éliminer l'erreur d'horloge du satellite. En réalité, il existe plusieurs méthodes se basant sur la simple différence :

- **Entre deux périodes** : on utilise un même récepteur qui mesure un même satellite mais à deux instants différents. Cette méthode permet l'élimination des ambiguïtés des entiers par simple différence, à condition de ne pas perdre la phase provoquant des sauts de cycle. En effet, entre deux instants t l'ambiguïté des entiers est constante.



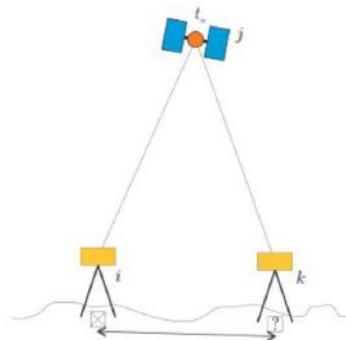
Simple différence entre deux périodes t_0 et t_1

- **Entre deux satellites** : un même récepteur observera deux satellites différents permettant d'éliminer les biais d'horloge du récepteur par simple différence.



Simple différence entre deux satellites s_0 et s_1

■ **Entre deux récepteurs :** cette fois-ci, l'observation d'un même satellite sera faite par deux récepteurs simultanément, permettant d'éliminer plusieurs biais associés aux satellites par application de différences successives, en effet ces biais seront identiques pour les deux récepteurs.



Simple différence entre deux récepteurs r0 et r1

Dans ce cas précis, la simple différence entre deux récepteurs sera étudiée.

En reprenant l'équation de la mesure de phase :

$$L_r^s \equiv \lambda \Delta \varphi_r^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + \lambda B_r^s - \Delta_{iono} + \Delta_{tropo} + \varepsilon_\phi + d_r^s$$

Si on observe le même satellite simultanément avec un récepteur servant de base référentielle (B) et un rover (A) on peut calculer les pseudo-distance : L_B^s et L_A^s (respectivement pour le rover et la base).

On simplifie l'équation en éliminant les erreurs ε_ϕ et d_r^s , en posant $I_r^s = \Delta_{iono}$ et $T_r^s = \Delta_{tropo}$.

En faisant une simple différence entre ces deux mesures on obtient :

$$\begin{aligned} \Delta L_{AB}^s &= L_A^s - L_B^s = (\rho_A^s + c(dt_A - dt^s) + \lambda B_A^s - I_A^s + T_A^s) - (\rho_B^s + c(dt_B - dt^s) + \lambda B_B^s - I_B^s + T_B^s) \quad (1) \\ &= (\rho_A^s - \rho_B^s) + c(dt_A - dt_B) + c(dt^s - dt^s) + (\lambda B_A^s - \lambda B_B^s) - (I_A^s - I_B^s) + (T_A^s - T_B^s) \quad (2) \\ &= \Delta \rho_{AB}^s + c \Delta dt_{AB} + \lambda \Delta B_{AB}^s - \Delta I_{AB}^s + \Delta T_{AB}^s \quad (3) \end{aligned}$$

On obtient ainsi un vecteur ΔL_{AB}^s correspondant à la distance base-rover aussi appelé ligne de base, en connaissant la position réelle de la base $L_{Bréelle}^s$ on peut alors déterminer la position du rover $L_{Aréelle}^s = L_{Bréelle}^s + \Delta L_{AB}^s$. Le seul terme commun aux deux récepteurs est l'erreur d'horloge du satellite (2) noté : dt^s , il s'annule complètement dans l'équation.

De plus, comme les conditions atmosphériques pour deux stations proches sont presque identiques, on réduit fortement les erreurs de propagation des ondes dans les couches ionosphériques et atmosphériques.

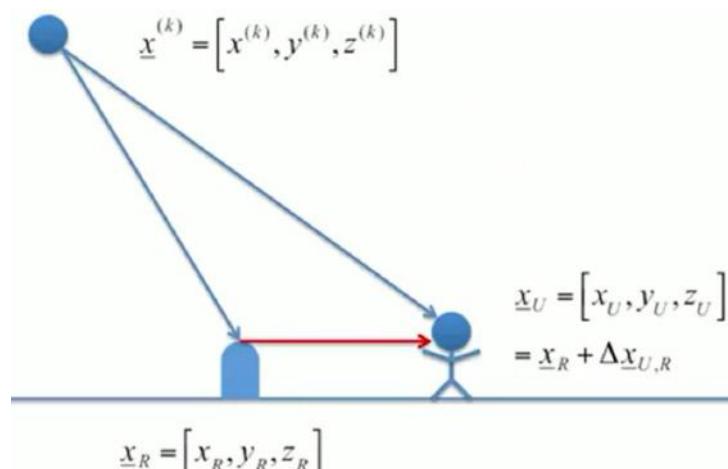


Schéma représentant le calcul de position vectorielle par simple différence avec en rouge la ligne de base

La double différence

Le principe de la double différence consiste cette fois à éliminer l'erreur d'horloge du récepteur en plus de celle du satellite. Pour cela, deux méthodes de simple différence sont combinées, on parle alors de double différence :

- **Entre deux récepteurs et deux époques :** élimination de l'ambiguïté N, des biais d'horloge et des erreurs d'orbites.
- **Entre deux satellites et deux récepteurs :** élimination des biais d'horloge (satellite et récepteur), des erreurs d'orbite et atmosphériques.

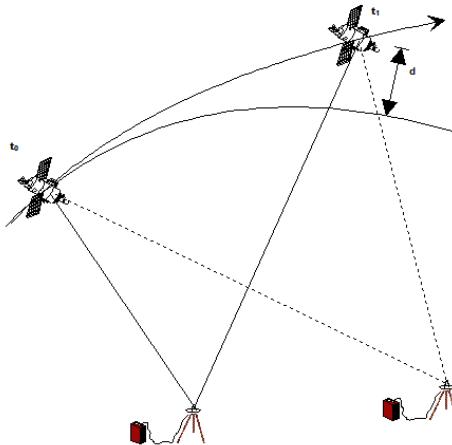


Schéma du principe de la double différence

Dans ce cas, on s'intéressera à deux récepteurs (A et B) observant simultanément deux satellites (j et k), on applique alors la simple différence deux fois pour chaque récepteur : pour le premier et le second satellite. Il est donc nécessaire de travailler avec des récepteurs bi-fréquence. Ensuite, on soustrait les résultats ΔL_{AB}^j et ΔL_{AB}^k ainsi obtenus pour appliquer la double différence.

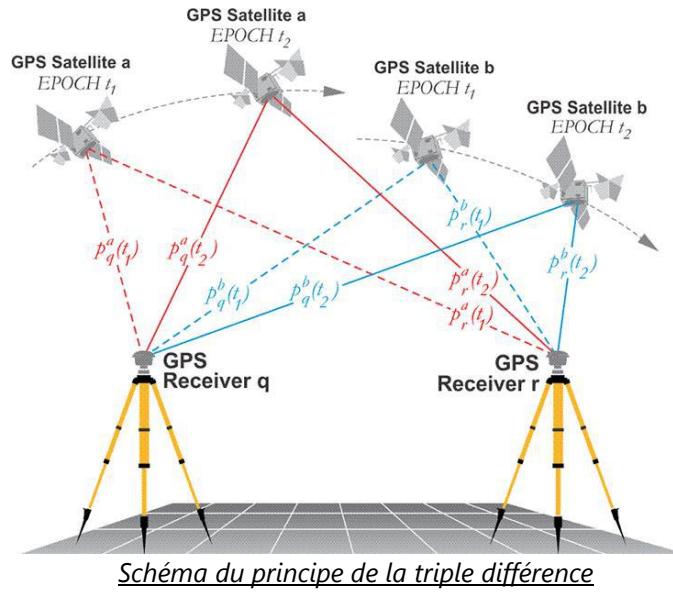
De nouveau, on peut écrire :

$$\begin{aligned}\ddot{\Delta}L_{AB}^{jk} &= \Delta L_{AB}^j - \Delta L_{AB}^k \\ &= (\Delta\rho_{AB}^j + c\Delta dt_{AB} + \lambda\Delta B_{AB}^j - \Delta I_{AB}^j + \Delta T_{AB}^j) - (\Delta\rho_{AB}^k + c\Delta dt_{AB} + \lambda\Delta B_{AB}^k - \Delta I_{AB}^k + \Delta T_{AB}^k) \\ &= (\Delta\rho_{AB}^j - \Delta\rho_{AB}^k) + (c\Delta dt_{AB} - c\Delta dt_{AB}) + (\lambda\Delta B_{AB}^j + \lambda\Delta B_{AB}^k) - (\Delta I_{AB}^j - \Delta I_{AB}^k) + (\Delta T_{AB}^j + \Delta T_{AB}^k) \\ &= \ddot{\Delta}\rho_{AB}^{jk} + \lambda\ddot{\Delta}B_{AB}^{jk} - \ddot{\Delta}I_{AB}^{jk} + \ddot{\Delta}T_{AB}^{jk}\end{aligned}$$

Le seul terme commun est le delta d'erreur d'horloge des récepteurs noté : $c\Delta dt_{AB}$, il s'annule complètement dans l'équation. On a réussi à éliminer les erreurs d'horloge des satellites mais aussi les erreurs de décalages des horloges des récepteurs.

La triple différence

La triple différence, tout comme la double différence, consiste à observer deux satellites avec deux récepteurs simultanément mais en reproduisant la mesure à deux époques différentes (t et $t+1$). Cela permet notamment d'éliminer le terme correspondant aux ambiguïtés entières, c'est-à-dire le nombre d'entiers de longueur d'onde dans une mesure de distance récepteur-satellite. Les ambiguïtés sont considérées constantes dans le temps, ce qui signifie que contrairement aux autres termes de l'équation, celle-ci ne va pas varier.



De plus, on sait que :

$$B_r^s = \Phi_{r,0} - \Phi_0^s - N_r^s$$

D'où :

$$\ddot{\Delta}B_{AB}^{jk} = (\Phi_{A,0} - \Phi_0^j - N_A^j) - (\Phi_{B,0} - \Phi_0^j - N_B^j) - (\Phi_{A,0} - \Phi_0^k - N_A^k) + (\Phi_{B,0} - \Phi_0^k - N_B^k)$$

Toutes les phases s'annulent, il ne reste que les termes d'ambigüité entière, soit :

$$\ddot{\Delta}B_{AB}^{jk} = -N_{AB}^{jk}$$

On sait que pour le temps t un premier calcul de double différence :

$$\ddot{\Delta}L_{AB}^{jk}(t) = \ddot{\Delta}\rho_{AB}^{jk}(t) - \lambda N_{AB}^{jk} - \ddot{\Delta}I_{AB}^{jk}(t) + \ddot{\Delta}T_{AB}^{jk}(t)$$

On sait que pour le temps $t+1$ un premier calcul de double différence :

$$\ddot{\Delta}L_{AB}^{jk}(t+1) = \ddot{\Delta}\rho_{AB}^{jk}(t+1) - \lambda N_{AB}^{jk} - \ddot{\Delta}I_{AB}^{jk}(t+1) + \ddot{\Delta}T_{AB}^{jk}(t+1)$$

Par conséquent, en appliquant la triple différence :

$$\begin{aligned} \ddot{\Delta}L_{AB}^{jk}(t, t+1) &= \ddot{\Delta}L_{AB}^{jk}(t+1) - \ddot{\Delta}L_{AB}^{jk}(t) \\ &= \ddot{\Delta}\rho_{AB}^{jk}(t, t+1) - \ddot{\Delta}I_{AB}^{jk}(t, t+1) + \ddot{\Delta}T_{AB}^{jk}(t, t+1) - \lambda N_{AB}^{jk} + \lambda N_{AB}^{jk} \\ &= \ddot{\Delta}\rho_{AB}^{jk}(t, t+1) - \ddot{\Delta}I_{AB}^{jk}(t, t+1) + \ddot{\Delta}T_{AB}^{jk}(t, t+1) \end{aligned}$$

A nouveau, le seul terme commun correspond à l'ambigüité entière noté : N_{AB}^{jk} , elle s'annule complètement dans l'équation si elle est bien constante en fonction du temps. On a réussi à éliminer les erreurs d'horloge des satellites mais aussi les erreurs de décalages des horloges des récepteurs.

Finalement, comme pour la simple différence, comme les conditions atmosphériques pour deux stations proches sont quasi identiques, on réduit fortement les erreurs de propagation des ondes dans les couches ionosphériques et atmosphériques.

Avec :

$$\begin{aligned} \Delta I_{AB}^j(t) - \Delta I_{AB}^k(t) &\approx 0 \\ \Delta I_{AB}^j(t+1) - \Delta I_{AB}^k(t+1) &\approx 0 \end{aligned}$$

On peut alors faire l'approximation :

$$-\ddot{\Delta}I_{AB}^{jk}(t, t+1) = \ddot{\Delta}I_{AB}^{jk}(t) - \ddot{\Delta}I_{AB}^{jk}(t+1) = (\Delta I_{AB}^j(t) - \Delta I_{AB}^k(t)) - (\Delta I_{AB}^j(t+1) - \Delta I_{AB}^k(t+1)) = 0$$

$$\ddot{\Delta}T_{AB}^{jk}(t, t+1) = \ddot{\Delta}T_{AB}^{jk}(t+1) - \ddot{\Delta}T_{AB}^{jk}(t) = \Delta T_{AB}^j(t+1) + \Delta T_{AB}^k(t+1) - (\Delta T_{AB}^j(t+1) + \Delta T_{AB}^k(t+1)) = 0$$

Et finalement :

$$\ddot{\Delta}L_{AB}^{jk}(t, t+1) = \ddot{\Delta}\rho_{AB}^{jk}(t, t+1)$$

Il ne reste plus que le delta triple de la distance géométrique entre les deux récepteurs, néanmoins, on a utilisé un modèle simplifié ce qui signifie qu'il reste tout de même d'autres erreurs et que la triple différence ne corrige pas tout, il reste : ε_ϕ , correspondant aux erreurs multi-trajets, le bruit au niveau du récepteur et d'autres erreurs locales.

Il est important de noter que la méthode par triple différence permet d'obtenir la meilleure précision, toutefois, elle implique des calculs très complexes, par conséquence, c'est la méthode des doubles différences qui est la plus utilisée pour le traitement des données.

Maintenant que certaines méthodes d'obtention des corrections ont été présentées, il faut pouvoir diffuser ces corrections aux rover. Il existe deux modes de transmission : le système LBAS et le système SBAS.

Système d'augmentation : LBAS

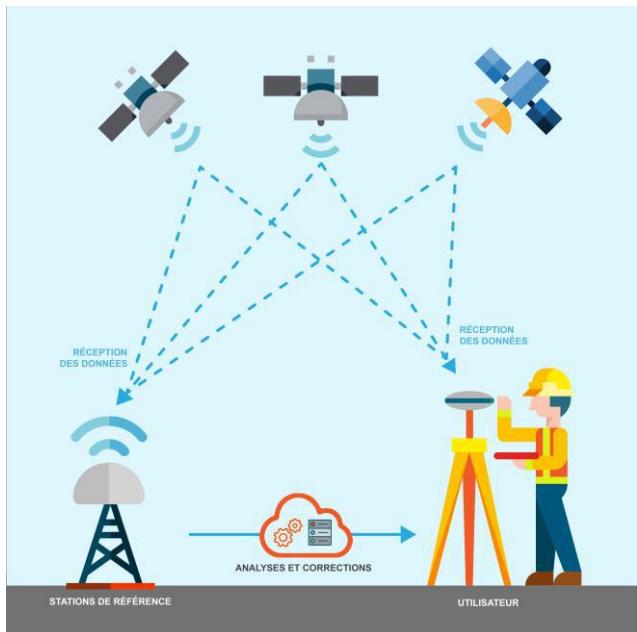
Le Local Based Augmentation System (LBAS) se base sur l'Observation Space Representation (OSR) et permet une transmission au sol des corrections, c'est-à-dire en ayant recours à des moyens de communication locaux tels que la radio, internet, le réseau cellulaire, etc.

Le système LBAS repose sur la méthode de correction différentielle des mesures, présentée précédemment. Le transport des corrections est possible pour des zones géographiques proches seulement car il existe une limite distance.

Indépendamment de la distance maximale de transport des données de corrections, c'est la distance séparant une base de référence au rover qui est limitante, comme vu précédemment, la précision des corrections diminue avec l'augmentation de la distance base-rover. Cela est dû au fait que l'atmosphère est très changeante et n'est probablement plus la même entre la base de référence et le rover. Cette limite de distance dépend de beaucoup de facteurs dont principalement le matériel. Une distance de 30km est considérée comme une distance maximale tolérable, en effet, les pertes de précision commencent à être importante au-delà de cette distance. On utilise la partie par million pour évaluer la perte de précision en fonction de la distance, on est autour de 1ppm ce qui signifie une perte de 1mm de précision par kilomètre.

On peut distinguer trois types de corrections différentielles locales :

- **Les corrections différentielles DGNSS** : la première méthode de correction des erreurs GNSS, on a présenté cette méthode de correction dans les chapitres précédents, sa particularité est qu'elle se base sur la mesure de code et non de phase, de ce fait, on ne réalise pas de triple différence, car on n'intègre pas le nombre entier de cycle N dans le calcul de pseudo-position. Elle permet tout de même d'atteindre un positionnement sub-métrique, de l'ordre de 80cm. Il s'agit d'une méthode statique.
- **Le Real Time Kinematic (RTK)**, tout comme le DGNSS, il se base lui aussi sur les corrections différentielles. Cependant, cette méthode se repose sur les mesures de phase, permettant d'intégrer les cycles entiers dans la mesure ainsi que d'autres erreurs selon les récepteurs. Le RTK permet donc d'appliquer des calculs de double ou triple différence afin d'éliminer les ambiguïtés entières, de réduire l'impact de plus d'erreurs et ainsi d'atteindre quasi instantanément une précision centimétrique avec un temps de convergence de quelques secondes, et cela, en temps réel. Les corrections sont en général transmises par la station de référence positionnée sur un point connu à la station mobile (rover) par radio (UHF). Cependant, les messages de corrections différentielles sont plus longs pour le RTK que le DGNSS car il se base sur la mesure de phase.
- **Le Post-Processed Kinematic (PPK)** est un type de correction se basant sur un traitement à postérieur en enregistrant les données de la base de référence ainsi que du rover en les convertissant dans un format indépendant : Receiver INdependant EXchange (RINEX). On calcule les vecteurs grâce à un logiciel de post traitement tel que RTKLIB. Cette méthode permet d'atteindre les mêmes niveaux de précision que le RTK et peut même être plus stable pour les applications statiques.



Principe du système LBAS (source : TERIA)

Récemment une nouvelle méthode de transmission est apparue : le transport Internet.

La base et le récepteur nécessitent alors une connexion internet (ligne ADSL, fibre, 4G/3G/2G). Dans le cas d'une application mobile pour le rover, il est nécessaire d'utiliser une connexion non filaire, une connexion cellulaire ce qui implique une bonne couverture cellulaire, l'application ne pourra pas recevoir les corrections dans les zones blanches/grises. Cependant, on s'affranchit des coûts de matériel liés à la transmission radio : transmetteur radio, émetteur radio et répéteur, mais cela nécessite un coût d'abonnement mensuel par le fournisseur de service cellulaire et un probable coût de service mensuel par les fournisseurs de corrections. Cette nouvelle méthode de transmission a permis l'essor du NRTK.

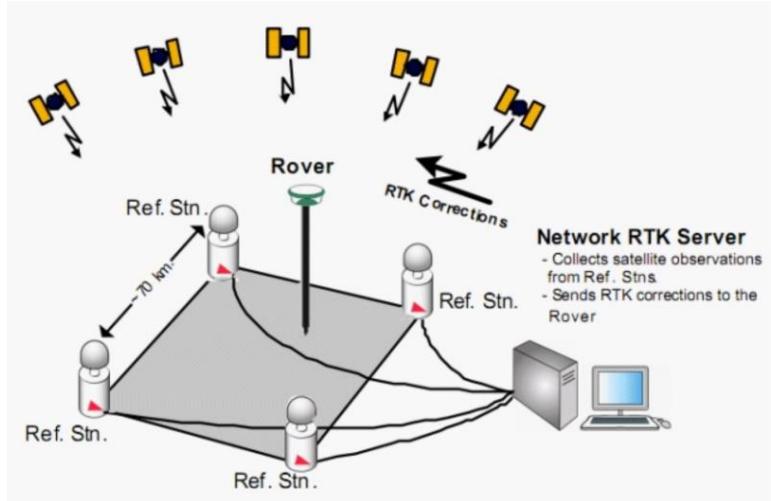
NRTK : Network Real Time Kinematic

Le NRTK est fondé sur un réseau dense de bases de référence RTK qui, contrairement à la solution RTK, ne vont pas transmettre directement au rover leurs données, mais vont passer par un centre de calcul modélisant les corrections localement et qui se chargera de diffuser aux clients ces corrections. NRTK offre l'avantage de ne nécessiter que d'un seul récepteur, réduisant les coûts matériels (pas de nécessité d'acheter de récepteur pour la base et divers répéteurs radio). Cependant, un coût mensuel pour la connexion internet ou cellulaire est nécessaire afin de se connecter au réseau.

Comme RTK, cette solution nécessite l'utilisation d'un récepteur bi-fréquentiel se basant sur la mesure de phase et non la mesure de code afin de pouvoir réaliser les doubles et triples différences et éliminer les erreurs d'horloge et les ambiguïtés. Néanmoins, les lignes de bases en NRTK sont généralement plus longues que celles du RTK car on peut s'affranchir des limites de la transmission radio.

Les corrections sont diffusées via Internet, il s'agit d'une communication bidirectionnelle : le récepteur envoie sa position non corrigée au réseau qui le diffuse aux centres de calcul et renvoie les corrections. Ce qui en fait une solution dépendante du nombre d'utilisateurs pour le débit.

La base et le récepteur nécessitent une connexion internet (ligne ADSL, fibre, 4G/3G/2G, EDGE, GPRS). Dans le cas d'une application mobile pour le rover, il est nécessaire d'utiliser une connexion non filaire comme une connexion cellulaire ce qui implique une bonne couverture du réseau cellulaire car l'application ne pourra pas recevoir les corrections dans les zones blanches/grises. Cependant, on s'affranchit des coûts de matériel liés à la transmission radio : transmetteur radio, émetteur radio et répéteur, mais cela nécessite un coût d'abonnement mensuel par le fournisseur de service cellulaire et un probable coût de service mensuel par les fournisseurs de corrections.



Le principe de la technologie NRTK

Il existe plusieurs protocoles pour le transport des données via Internet, le plus répandu est le protocole Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (NTRIP). Il est donc nécessaire d'utiliser un client NTRIP pour recevoir les données de correction au format RTCM des serveurs NTRIP (déployés avec les bases de référence) sur le mobile et ainsi les transmettre au récepteur GNSS. Il existe plusieurs clients NTRIP gratuits : RTKLIB, Lefebvre NTRIP client, BKG Ntrip client (BNC), GNSS Internet Radio. En termes de connexion, cela implique une connexion TCP/IP pour se connecter au serveur NTRIP caster ainsi qu'un port local série ou bien une connexion Bluetooth pour transmettre les données au récepteur GNSS. En fonction des GNSS supportés par le récepteur il faudra paramétrer le client NTRIP pour lui indiquer pour quelles constellations on désire récupérer les corrections, l'adresse IP sur server, le numéro de port, les identifiants de l'utilisateur, le mode de calcul.

Le schéma classique de fonctionnement est le suivant :

- 1) Connexion du client NTRIP au serveur.
- 2) Envoie par le client de la trame GGA contenant la position du rover périodiquement.
- 3) Le serveur détermine les stations de références la ou les plus proches (selon le type de correction).
- 4) Envoi du serveur toutes les secondes environ d'un message de correction au format RTCM.
- 5) Le client transmet les corrections reçues au récepteur GNSS qui les intègre à ses calculs afin d'améliorer la précision après un certain temps de convergence rapide.

Principe de fonctionnement d'un réseau NRTK

Le fonctionnement classique consiste à calculer les corrections pour une base pour tous les satellites qu'il observe. En effet, en connaissant la position fixe du récepteur de la base de référence peut alors déterminer les distances géométriques ρ_{ref}^s entre la base de référence et tous les satellites. Pour obtenir les corrections, on retranche cette distance géométrique connue à l'observation mesurée :

- Soit l'équation de mesure de phase :

$$L_r^s \equiv \lambda \Delta \varphi_r^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) - \lambda N_r^s - I_r^s + T_r^s$$

Ici, on ne considérera pas les erreurs ε_ϕ et d_r^s afin de simplifier, on calcule la correction :

$$\Delta_{correction} \equiv \lambda \Delta \varphi_{ref}^s - \rho_{ref}^s = \rho_{ref}^s + c(dt_r - dt^s) - \lambda N_{ref}^s - I_{ref}^s + T_{ref}^s - \rho_{ref}^s$$

En retranchant la distance géométrique calculée avec la position connue de la base, on élimine le terme ρ_r^s et il ne reste plus que les termes d'erreurs :

$$\Delta_{correction} = c(dt_r - dt^s) - \lambda N_{ref}^s - I_{ref}^s + T_{ref}^s$$

Il faut maintenant transmettre les corrections au rover en utilisant des messages au format RTCM. Ici, la latence correspondant au temps initial d'observation de la base de référence et l'application de la correction par le rover est en grande partie impactée par la technologie de communication utilisée (cellulaire, WiFi) et de la taille des données à transmettre.

Une fois que le rover a reçu le message et transmis au récepteur GNSS, le $\Delta_{correction}$ sera retranché à l'observation du récepteur afin de calculer une mesure corrigée :

$$\begin{aligned}\lambda\Delta\varphi_{mes,corrige}^s &= \lambda\Delta\varphi_{mes}^s - \Delta_{correction} \\ &= \rho_{mes}^s + c(dt_{mes} - dt^s) - \lambda N_{mes}^s - I_{mes}^s + T_{mes}^s - c(dt_{ref} - dt^s) - \lambda N_{ref}^s - I_{ref}^s + T_{ref}^s \\ &= \rho_{mes}^s + cdt_{mes} - cdt_{ref} - \lambda\Delta N_{ref,mes}^s - \Delta I_{ref,mes}^s + \Delta T_{ref,mes}^s\end{aligned}$$

On obtient alors une mesure corrigée, on peut observer que cette mesure est très proche de l'équation de la simple différence des chapitres précédents et qu'on a éliminé l'erreur d'horloge du satellite dt^s :

$$\Delta L_{AB}^s = \Delta\rho_{AB}^s + c\Delta dt_{AB} + \lambda\Delta B_{AB}^s - \Delta I_{AB}^s + \Delta T_{AB}^s$$

Il est alors possible d'appliquer une simple différence, pour cela il est nécessaire que le rover et la base mesurent chacun deux satellites j et k :

$$\begin{aligned}\lambda\Delta\varphi_{mes,corrige}^j &= \rho_{mes}^j + cdt_{mes} - cdt_{ref} - \lambda\Delta N_{ref,mes}^j - \Delta I_{ref,mes}^j + \Delta T_{ref,mes}^j \\ \lambda\Delta\varphi_{mes,corrige}^k &= \rho_{mes}^k + cdt_{mes} - cdt_{ref} - \lambda\Delta N_{ref,mes}^k - \Delta I_{ref,mes}^k + \Delta T_{ref,mes}^k\end{aligned}$$

On applique une simple différence de ces deux mesures corrigées pour un satellite j et k :

$$\begin{aligned}\dot{\Delta}\varphi_{mes,corrige}^{jk} &= \lambda\Delta\varphi_{mes,corrige}^j - \lambda\Delta\varphi_{mes,corrige}^k \\ &= \rho_{mes}^j + cdt_{mes} - cdt_{ref} - \lambda\Delta N_{ref,mes}^j - \Delta I_{ref,mes}^j + \Delta T_{ref,mes}^j \\ &\quad - (\rho_{mes}^k + cdt_{mes} - cdt_{ref} - \lambda\Delta N_{ref,mes}^k - \Delta I_{ref,mes}^k + \Delta T_{ref,mes}^k) \\ &= \dot{\Delta}\rho_{mes}^{jk} + \lambda\ddot{\Delta}N_{ref,mes}^{jk} - \ddot{\Delta}I_{ref,mes}^{jk} + \ddot{\Delta}T_{ref,mes}^{jk}\end{aligned}$$

La même observation que pour le calcul de correction précédent est possible : l'équation de simple différence à l'allure d'une double différence ici, on a bien éliminé l'erreur d'horloge du récepteur. Avec cette méthode, il n'est pas nécessaire d'envoyer la position de la station de référence, en effet, on l'a déjà utilisé pour le calcul de correction en amont.

Il existe plusieurs manières d'implémenter un NRTK qui varient selon les fournisseurs de service proposant plusieurs formats de solutions technologiques dont :

■ Master-Auxiliary Concept (MAC) : Il s'agit d'un concept « Maître Auxiliaire » (MAC), plusieurs stations proches de l'utilisateur seront utilisées formant une cellule (c'est-à-dire un sous-réseau du réseau complet), une station maîtresse est choisie parmi le sous-réseau, leurs observations seront transmises aux centres de calcul via le réseau, et cela, en continu. Ces observations vont être utilisées pour résoudre le problème des ambiguïtés entières. La plupart des opérations sont réalisées du côté du récepteur.

Ce concept comprend plusieurs étapes : dans un premier temps, le rapatriement des mesures, s'en suit la résolution des ambiguïtés, puis le calcul des corrections différentielles, enfin vient la transmission des corrections au récepteur et finalement l'interpolation des corrections.

Rapatriement sur le serveur des données observées par les bases de références :

Les observations sont réalisées par des stations fixes sur des sites dégagés et ces observations de phase brutes sont transmises au réseau via Internet, il est nécessaire de limiter la latence de transmission et d'assurer une transmission continue en limitant les interruptions. Cette latence doit être inférieure à une seconde, en effet, il est nécessaire de transmettre les observations, faire le calcul des corrections et de les diffuser au rover et tout cela en respectant une période de transmission inférieure à une seconde afin d'assurer une correction centimétrique. En effet, selon la précision souhaitée, les corrections ne seront plus adaptées si le temps entre le début d'émission des observations des bases de référence du réseau et la réception des corrections calculées est trop long. Pour cela, il est recommandé d'utiliser un débit élevé et un réseau télécom privé.

Cette récolte de données va permettre la construction des corrections différentielles qui seront transmises par la suite au rover. Pour cela, il est d'abord nécessaire de résoudre les ambiguïtés entières des mesures de phase brutes au sein du réseau. Une des stations de référence, la plus proche du rover, sera désignée comme station maîtresse, les autres bases de la cellule seront considérées comme les stations auxiliaires.

Calcul des corrections différentielles et résolution des ambiguïtés entières

Les ambiguïtés de doubles différences N_{AB}^{jk} (ici entre une station A et B et un satellite j et k) doivent être résolues pour toutes les stations et tous les satellites, elles peuvent être résolues grâce à un logiciel de calcul. Après cette résolution, on peut alors calculer les corrections différentielles.

Le calcul des corrections est commun à tous les types de réseaux NRTK, soit :

$$\Delta_{correction} \equiv \lambda\Delta\varphi_{ref}^s - \rho_{ref}^s = \rho_{ref}^s + c(dt_r - dt^s) - \lambda N_{ref}^s - I_{ref}^s + T_{ref}^s - \rho_{ref}^s$$

$$\Delta_{correction} = c(dt_r - dt^s) - \lambda N_{ref}^s - I_{ref}^s + T_{ref}^s$$

En effet, les positions réelles des bases de références sont déjà déterminées et permettent d'obtenir le delta de correction :

$$\Delta_{correction} \equiv \lambda\Delta\varphi_{ref}^s - \rho_{ref}^s = c(dt_r - dt^s) - \lambda N_{ref}^s - I_{ref}^s + T_{ref}^s$$

$$\Delta_{correction} \equiv \lambda\Delta\varphi_{ref}^s - \rho_{ref}^s - c(dt_r - dt^s) + \lambda N_{ref}^s$$

On peut alors calculer les corrections différentielles CD entre la station maîtresse M et toutes les stations auxiliaires de la cellule (A, B, ...), par exemple CD entre M et A :

$$\begin{aligned} CD_{AM}^s &= \Delta_{correction,M} - \Delta_{correction,A} \\ &= [\lambda\Delta\varphi_M^s - \rho_M^s - c(dt_M - dt^s) + \lambda N_M^s] - [\lambda\Delta\varphi_A^s - \rho_A^s - c(dt_A - dt^s) + \lambda N_A^s] \\ &= \lambda\dot{\Delta}\varphi_{AM}^s - \Delta\rho_{AM}^s + cdt_{AM} + \lambda\Delta N_{AM}^s \end{aligned}$$

Et entre M et B :

$$CD_{BM}^s = \lambda\dot{\Delta}\varphi_{BM}^s - \Delta\rho_{BM}^s + cdt_{BM} + \lambda\Delta N_{BM}^s$$

Les différents termes sont obtenus en :

- ▶ Calculant la différence de phase de la mesure de phase pour : $\dot{\Delta}\varphi_{AM}^s$
- ▶ Calculant la distance géométrique satellite-récepteur à partir de la position connue des bases de référence et des éphémérides (position) des satellites pour : $\Delta\rho_{AM}^s$
- ▶ Effectuant la différence des décalages d'horloge des récepteurs de la base maîtresse et la base auxiliaire A pour : cdt_{AM}
- ▶ A partir de la formule de la double différence on peut déterminer les ambiguïtés de simple différence : ΔN_{AM}^s

$$\Delta N_{AM}^s = \Delta N_{AM}^{ref} - \ddot{\Delta}N_{AM}^{ref}$$

Ces corrections différentielles CD sont calculées pour tous les satellites et toutes les bases du sous réseau. On met ainsi à un niveau commun toutes les ambiguïtés en les déterminant à partir de la station maîtresse. Deux stations de références sont dites à un niveau commun d'ambiguïté si l'ambiguïté d'entier N_r^s pour chaque mesure de phase peut être éliminée ou ajustée pour que, lors de la formation des doubles différences, les ambiguïtés d'entiers soient annulées. Lors de la construction des simples différences sur le rover (correspondant alors à une double différence pour le DGNSS) on pourra lever les ambiguïtés d'entier, en effet, en ayant mis à un niveau commun toutes les ambiguïtés d'entier, elles sont égales et donc en appliquant une différence elles s'annuleront.

Transmission des corrections différentielles

Après calcul, la mesure de la base maîtresse, ses coordonnées, toutes les corrections différentielles ainsi que les différences de coordonnées base-maîtresse/bases-auxiliaires sont transmises au rover par le

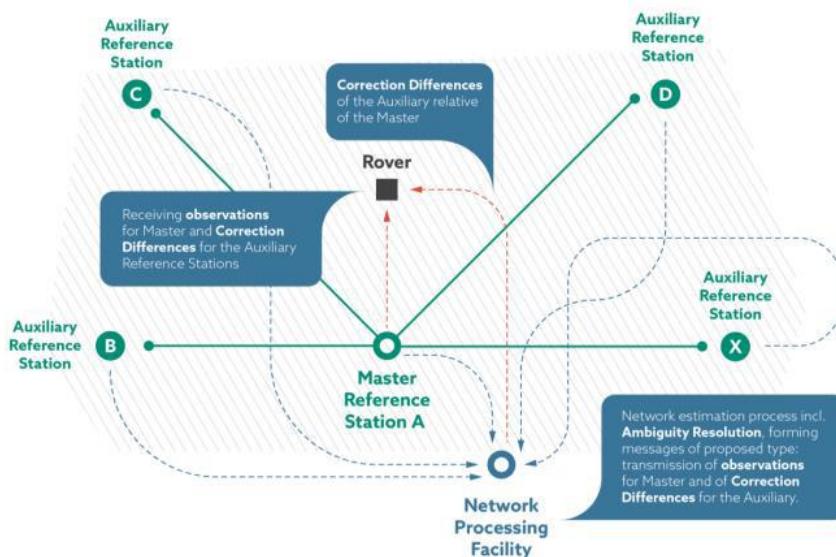
serveur au format RTCM 3.1. Le récepteur doit être connecté à Internet et plus précisément au serveur afin de récupérer toutes ces données.

Ainsi, le récepteur du rover peut éliminer les ambiguïtés pour toutes les observations brutes de toutes les bases de références. Le récepteur pourra alors déterminer la meilleure méthode de traitement parmi plusieurs dont : l'interpolation, le DGNSS à partir des observations brutes, etc.

Interpolation des données

Il existe différentes méthodes d'interpolation, comme la méthode des moindres carrés de colocalisation ou bien l'interpolation poids/distance afin de calculer une correction différentielle entre le rover et la base maîtresse.

L'un des principes de la méthode des moindres carrés est la séparation des satellites visibles en deux groupes : le groupe primaire et le groupe secondaire. Le groupe primaire est alors composé de 4 satellites (possédant une dilution de précision assez bonne), on se base alors sur ce groupe pour déterminer les ambiguïtés possibles. Le groupe secondaire, quant à lui, est utilisé pour discriminer les ambiguïtés déterminées précédemment qui sont les moins probables.

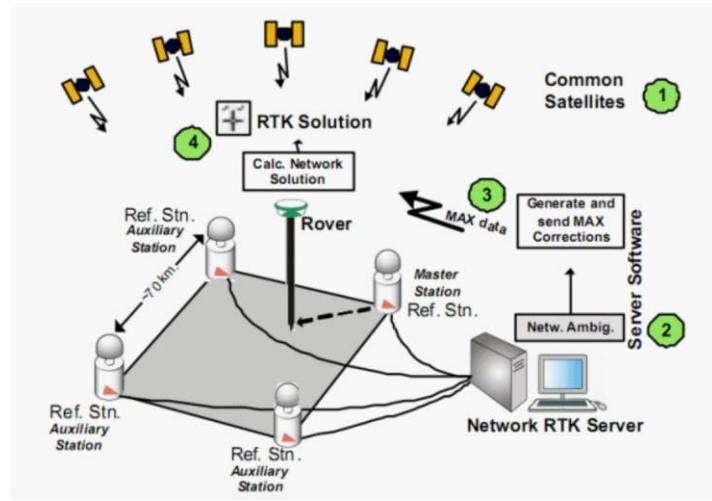


NRTK se basant sur la méthode MAC

■ **Master-Auxiliary Corrections (MAX)** : L'un des concepts les plus récents, fonctionnant sur le même principe que le concept MAC, mais offrant des traitements plus complexes incluant plus d'informations de corrections. Le réseau transmet les données brutes de correction (appelées Master Auxiliary corrections : MAX) de toutes les bases auxiliaires environnantes (formant une cellule) ainsi que celle de la station maîtresse (étant la station la plus proche du rover) et le rover peut alors utiliser les corrections combinées de la cellule de station et offrir une meilleure solution de correction, en effet, avec les méthodes classiques on dépend d'une seule base et on est beaucoup plus sensible à la visibilité des satellites, avec la solution MAX on dépend d'une cellule de station de référence et de ce fait on est moins sujet à ce problème.

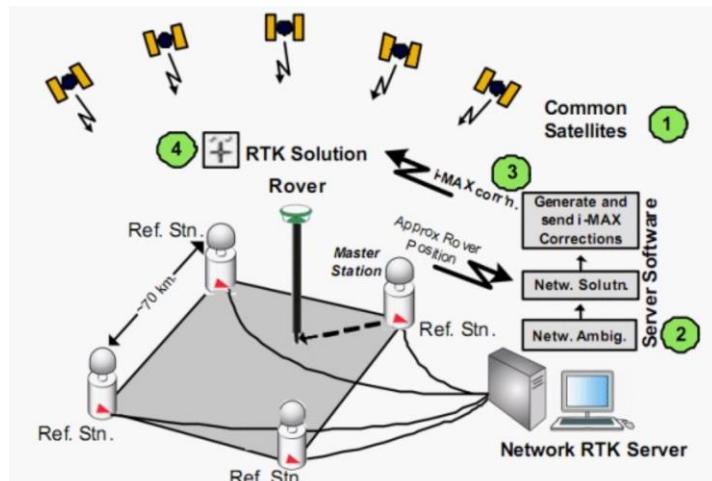
De plus, on a la possibilité de transmettre les données avec un canal bidirectionnel ou bien de les broadcaster à tous les utilisateurs dans la cellule.

Cependant, en utilisant les corrections des données MAX, le rover doit effectuer tout le traitement ce qui augmente le temps de calcul de la position, seuls les récepteurs les plus récents permettent d'utiliser les corrections MAX possédant un coût excessif.



NRTK se basant sur la méthode MAX

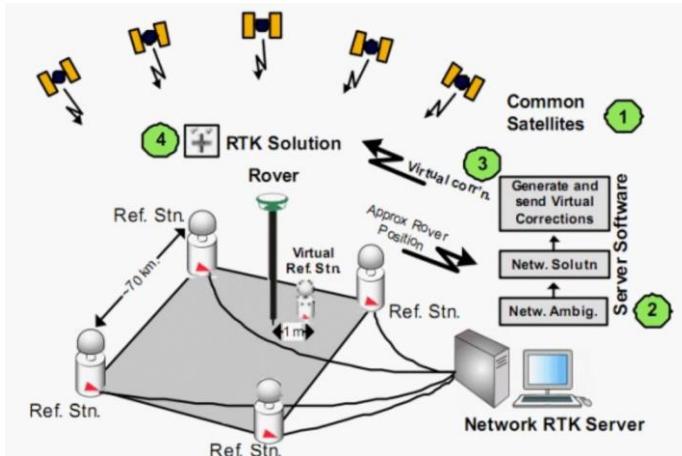
- **Individualised Master-Auxiliary Corrections (i-MAX)** : Concept utilisé pour les récepteurs les plus anciens ne supportant pas les trames RTCM 3.x, quand le rover se connecte au système, celui-ci nous indique la base de référence la plus proche de nous à laquelle il se connecte, appelée station maîtresse. Cependant, les corrections que reçoit le rover correspondent à la carte atmosphérique créée à partir des données de corrections collectives des bases proches de cette position. C'est pour cette raison que le rover doit envoyer périodiquement sa position au réseau au format NMEA, pour qu'ainsi les données de corrections remontées correspondent bien à notre position spécifique, ce qui implique forcément une communication bidirectionnelle. Ici, les corrections sont calculées dans les centres de traitement avant d'être transmises au rover.



NRTK se basant sur la méthode i-MAX

- **FKP (Flaschen Korrektur Parameter)** : étant l'une des premières méthodes, développée par la société GEO++. Il s'agit d'une technique où sont réparties les opérations équitablement entre le récepteur et le serveur. Cette méthode permet au réseau RNTK d'améliorer la précision lui en envoyant les données brutes de la station la plus proche. Comme nous l'avons vu dans le détail des calculs DGNSS pour la triple différence, le réseau va améliorer ces données en rajoutant des informations de corrections sur les erreurs liées à la troposphère et l'ionosphère ce qui va permettre au récepteur de converger rapidement, pour obtenir ces informations atmosphériques, le serveur doit modéliser plusieurs paramètres. Ces informations doivent être calculées par le réseau afin d'améliorer la précision, le récepteur les intégrera dans son calcul par interpolation sur sa position.
- **Virtual Reference Station (VRS)** : est une méthode NRTK où la majorité des opérations sont effectuées côté serveur. Elle se repose sur un concept similaire au i-MAX, mais au lieu de se connecter à une base de référence maîtresse qui est réelle, le réseau va créer une base de référence virtuelle et

faire penser au rover qu'il y est connecté, c'est pourquoi ce dernier doit communiquer sa position approchée au serveur. Celle-ci va alors fournir des mesures artificielles brutes qui seraient obtenues pour une station très proche, ces mesures sont obtenues à l'aide de modèles créés par les données réelles des stations de référence permanentes du réseau.



NRTK se basant sur la méthode VRS

La précision offerte par les méthodes i-MAX et VRS est similaire même si en général i-MAX est préférée car cette méthode connecte le rover à une base réelle avec une position réelle connue. La méthode VRS a l'avantage de réduire les erreurs en diminuant la ligne de base, comparé à un système avec une station de référence réelle plus éloignée. De plus, la position de la base virtuelle peut évoluer selon la position du rover.

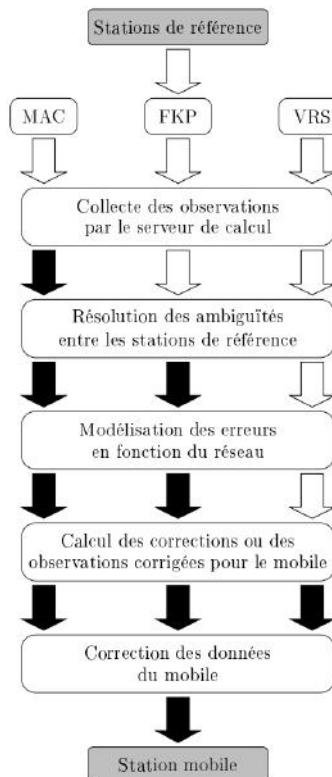
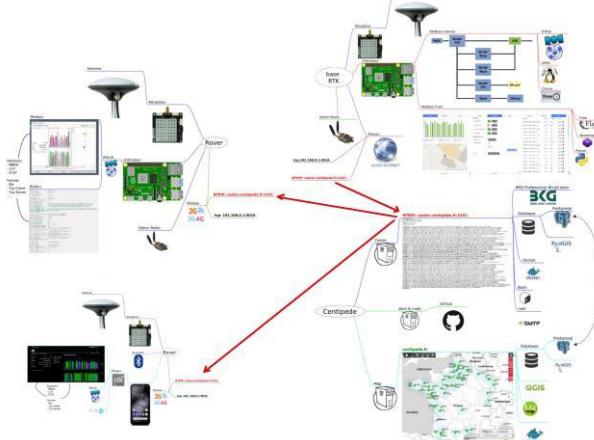


Schéma récapitulatif des différentes méthodes RTK avec : en noir les opérations côté récepteur et en blanc les opérations côté serveurs

Le NRTK présente certains désavantages :

- ▶ Il s'agit d'une solution inadaptée pour une utilisation par un grand nombre d'utilisateurs, en effet la bande passante diminue avec l'augmentation du nombre de connexions sur le réseau, contrairement aux solutions SBAS permettant de broadcaster de manière unidirectionnelle les corrections sans limite d'utilisateurs et sans dégradation de la communication.

- ▶ Permet une certaine mobilité par rapport à RTK, mais plus restreinte que PPP/SBAS. En effet, si le récepteur est en mouvement, s'il sort de la zone de couverture de la base maîtresse ou virtuelle, il devra se reconnecter à une nouvelle base, ce qui nécessite plusieurs secondes d'interruptions.

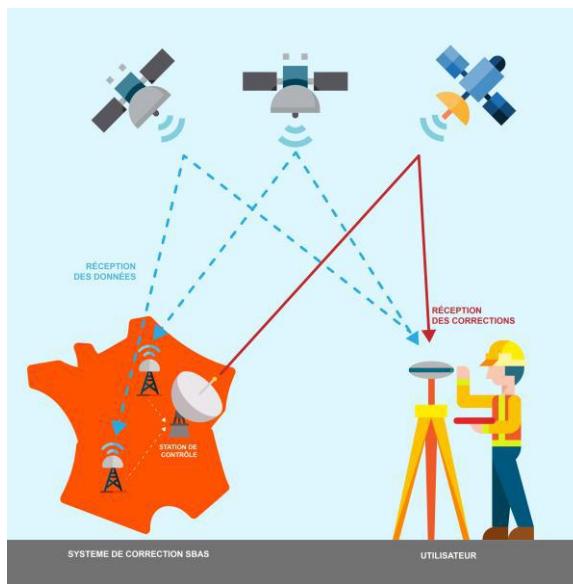


Exemple d'architecture NRTK avec le réseau Centipede

Système d'augmentation : SBAS

Le Satellite Based Augmentation System se repose sur le State Space Representation (SSR) et comme son nom l'indique, il permet la diffusion des corrections à travers des satellites géostationnaires en utilisant une bande de fréquence dédiée : la bande L.

Il utilise un réseau de stations de référence au sol se chargeant de l'observation des erreurs et délivrant les corrections en temps réel en recourant aux satellites géostationnaires permettant un broadcast d'une large zone géographique, ne nécessitant pas une bande passante très large. Les stations de référence vont modéliser localement les erreurs pour une large zone appelée State et vont transmettre les corrections à tous les utilisateurs présents dans la zone de couverture via les satellites géostationnaires afin de les appliquer aux observations. Cette solution permet, tout comme le LBAS, une correction avec une précision centimétrique (0.80cm) et en temps réel.



Principe du système SBAS (source : TERIA)

Il existe plusieurs fournisseurs de service SBAS comme : WAAS pour les US, notamment pour les applications avioniques. Il y a aussi le système européen de complément à la navigation géostationnaire EGNOS, le système japonais MTSAT ainsi que d'autres services commerciaux comme StarFire, OmniSTAR et TERIA.

Il est possible de réaliser des simulations à l'aide du simulateur SBAS Simulator édité par l'European Space Agency (ESA), réalisé avec l'IGUASSU.

Cette technologie est surtout utilisée pour des applications maritimes (plateforme offshore, pose de câbles sous-marins) où il n'y a pas de possibilité d'installer une station GNSS fixe sur une infrastructure terrestre permettant la transmission de données et où la couverture du réseau cellulaire est limitée ou absente.

Precise Point Positioning (PPP)

Cette technologie se base sur le positionnement absolu, elle permet d'améliorer la précision du calcul de position en corrigeant les erreurs d'orbites et d'horloges des satellites sur les mesures de code et de phase. Il s'agit une technologie de broadcast : ce sont les mêmes corrections qui sont transmises par satellite à l'ensemble des utilisateurs sur l'ensemble de la zone de couverture.

L'avantage principal est la possibilité de transmettre les corrections à un ensemble d'utilisateurs peu importe où ils se situent, en effet, il s'agit d'un service mondial se reposant sur un réseau de stations terrestres planétaire.

Le PPP ne se base pas sur un calcul différentiel, un seul récepteur est alors suffisant. En effet, pour cette technologie, chaque source d'erreurs est corrigée individuellement. Le PPP ne corrige que les erreurs d'orbites des satellites, d'horloge des satellites et certains biais électroniques sur le code et la phase. Les erreurs ne dépendent plus de la distance entre la base de référence et le rover, il n'y a plus la notion de limite de distance, en effet les erreurs sont spécifiques aux satellites ici et indépendantes de la localisation de l'utilisateur.

Des stations vont calculer les erreurs d'orbites et de satellites, les transmettre à un centre de calcul avant de les diffuser aux satellites géostationnaires qui diffuseront à grande échelle les données de correction.

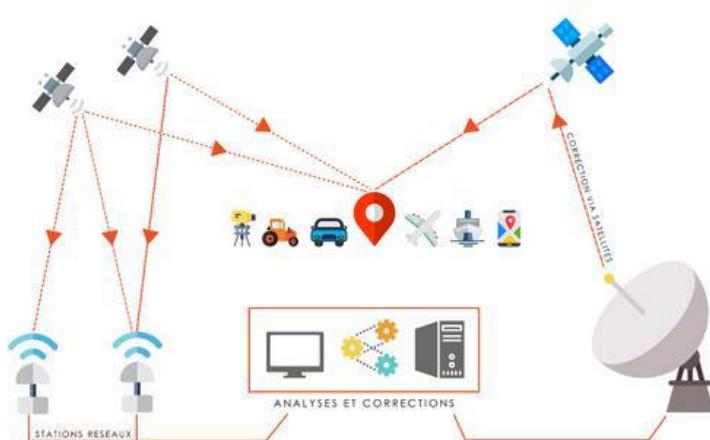


Schéma du principe de la correction PPP (source TERIA)

En ce qui concerne la performance de cette technologie, elle est plus ou moins équivalente à celle du RTK. Les corrections fournies permettent d'atteindre une précision centimétrique qui reste cependant inférieure à NRTK.

Le gros point noir du PPP simple est son temps de convergence pouvant aller de 10 à 30min afin d'obtenir la première mesure. En effet, les corrections sont diffusées via des satellites géostationnaires utilisant la bande L, ayant un débit faible. De plus, ce temps de convergence doit être renouvelé à chaque perte du signal. Il n'est pas approprié pour des applications critiques. Qui plus est, cette technologie ne permet pas de résoudre les erreurs d'ambiguités de la mesure de phase, à la place, elle utilise des estimations de celle-ci, impliquant des temps d'initialisation assez long.

PPP-RTK

Il existe aussi une version améliorée de la correction PPP appelée correction PPP-RTK.

Il s'agit d'une correction PPP hybride entre le PPP et RTK. Le principe est d'augmenter les estimations de PPP avec un modèle de correction ionosphérique et troposphérique, on a des corrections supplémentaires avec

l'ajout d'informations sur l'ionosphère et la troposphère, ici le temps de convergence est de quelques secondes seulement car on peut résoudre les ambiguïtés avec cet ajout d'information.

Le PPP-RTK utilise une carte atmosphérique d'erreurs générée par un réseau de bases de référence terrestres, la qualité avec laquelle est générée cette carte détermine les capacités de résolution de l'ambiguïté du service fourni. En effet, tout comme pour les services NRTK/RTK, la qualité de cette carte dépend de la distance rover-base de référence, la carte a une bonne précision proche des bases du réseau et se dégrade lorsqu'on observe des points éloignés de toute base du réseau ce qui provoque une augmentation du temps de convergence. Si la résolution de l'ambiguïté n'est pas possible, on a alors une transition entre le service PPP-RTK et le service PPP seul, en effet l'ambiguïté est alors estimée comme pour un service PPP non augmenté.

Cas d'usage : applications agricoles (Europe/Amérique du Nord), car les transmissions de données par satellite permettent de couvrir de très grandes zones, pas toujours bien couvertes par les réseaux téléphoniques, de plus, on sait qu'on sera en milieu rural, il y'a moins de risque de présence d'obstacles (bâtiments, végétations). Pour un environnement urbain, il est préférable de passer par la technologie réseau RTK.

La performance pour un service PPP-RTK dépend de la quantité d'informations transmise à un récepteur mais aussi à la vitesse de transmission, limitée par la bande passante disponible, il y a un équilibre à trouver, en effet plus on augmente la quantité de données à transmettre, plus le temps de transmission sera élevé.

Cette technologie offre une précision centimétrique avec un temps de convergence faible à un nombre illimité d'utilisateurs (broadcast unilatéral), cependant, elle nécessite d'être proche du réseau de bases, tout comme NRTK.

Exhibit 13: Message Format Comparison [RD.59]

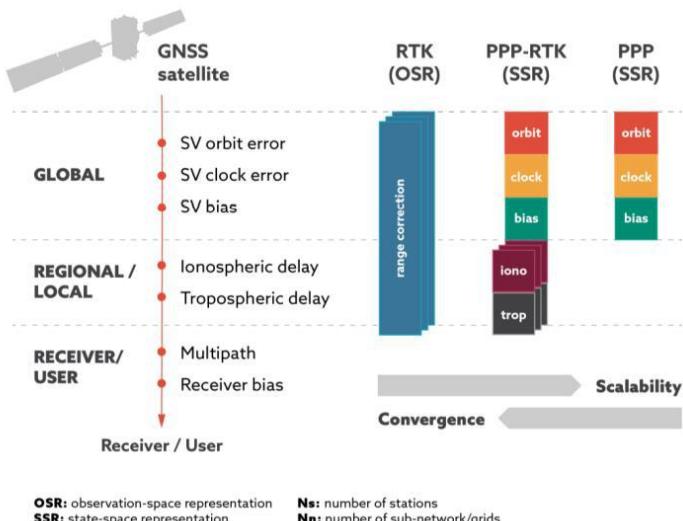


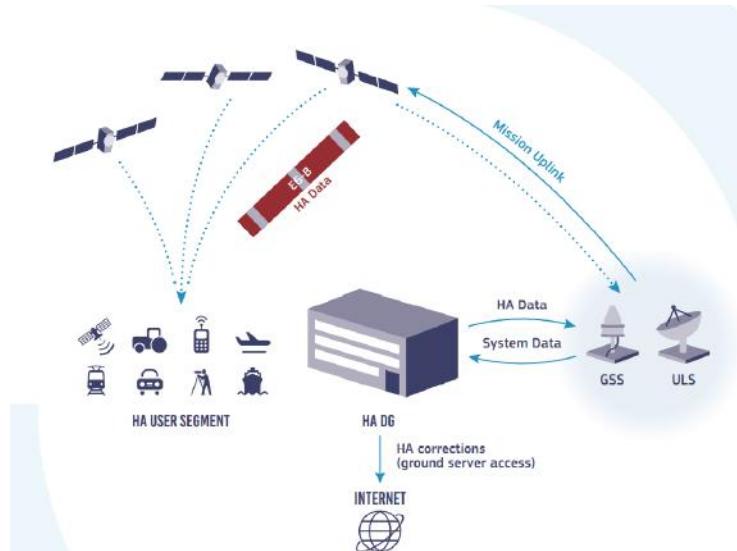
Schéma global des différentes technologies de correction

Galileo High Accuracy Service (HAS)

La constellation européenne Galileo offre plusieurs services commerciaux. Il offrira notamment un service de haute précision gratuit appelé Galileo HAS. Ce service permettra d'atteindre une précision de l'ordre de 20cm en transmettant des données PPP, ainsi, l'objectif de ce service est de pouvoir couvrir plus d'application nécessitant une meilleure précision que celle offerte par son service actuel Galileo Open Service (OS). Les données seront diffusées publiquement à une échelle globale. Pour cela, le service utilisera une combinaison de plusieurs signaux via la bande satellitaire E6, avec le canal E6-B afin de diffuser des données de correction PPP. Un débit de 448bps est annoncé pour chaque satellite Galileo afin de permettre l'émission des données de correction pour les orbites et les horloges des satellites. Le service devrait découper les corrections afin de les transmettre via plusieurs satellites différents et ainsi de réduire le temps de convergence en ayant une bande passante plus élevée. L'amélioration du temps de convergence en utilisant des bases de références au sol (concept du PPP-RTK) est encore à l'étude. Le service devrait utiliser des trames RTCM Compact SSR (CSSR),

qui doit cependant encore être standardisé. Comme les données seront broadcastées, le service pourra, par ailleurs, proposer un système d'authentification, il s'agira d'un mécanisme implanté au niveau des signaux pour s'assurer que ces derniers proviennent bien des satellites Galileo (ce qui n'est pas possible avec GPS). Le temps de convergence serait inférieur à 100s. Les données pourraient aussi être transmises via Internet, comme NRTK, via le protocole NTRIP 2.0 avec des trames RTCM.

Le principe de fonctionnement consiste à collecter des observations GNSS en utilisant un réseau de stations de référence au sol, de transmettre ces données dans des centres de calcul, calculer les données PPP et de les transmettre aux satellites géostationnaires via les émetteurs des segments sol de Galileo. Ces satellites pourront alors disséminer les informations via la bande E6 et/ou via Internet aux utilisateurs finaux. Cependant, le mode dégradé de ce service correspondant au service initial HAS est prévu pour 2022 selon la roadmap.



Principe de fonctionnement du service Galileo HAS

Les récepteurs devront au choix, pouvoir recevoir et traiter les signaux via la bande E6B ou bien se connecter à Internet pour récupérer les corrections et ils devront avoir des algorithmes PPP.

Les systèmes de coordonnées

Il existe une multitude de systèmes de coordonnées en GNSS, aussi appelés systèmes de référence, regroupant un ensemble précis de conventions afin de déterminer la position précise d'un point situé dans l'espace.

Il s'agit d'un système en trois dimensions pour lequel on aura des coordonnées en X, Y et Z, c'est-à-dire les coordonnées géographiques (latitude, longitude, altitude) que l'on associe à un ellipsoïde de référence ayant pour principal intérêt de décrire un point quelconque de l'espace en fonction de ses coordonnées géographiques.

Le système géodésique le plus connu est le World Geodetic System 1984 : WGS84, utilisé notamment par GPS. Il y a aussi le système international : ITRF. Il est très proche de WGS84 et est reconnu pour sa grande précision, cependant, il possède une contrainte : les positions ne sont pas figées dans le temps.

Il y a aussi des systèmes locaux : pour la France métropolitaine c'est le système RGF93, à la Réunion c'est le RGR92 par exemple. Il existe un écart de 60cm entre les 2 systèmes de coordonnées.

Ainsi, chaque zone géographique mondiale possède son propre système de coordonnées. Il est nécessaire d'avoir plusieurs systèmes de coordonnées car on est sur des plaques tectoniques, ce qui signifie que la surface se déplace par rapport à la Terre, or, les systèmes de coordonnées sont définis par des constellations satellitaires, ce qui signifie que la position d'un objet est définie indépendamment du mouvement des plaques tectoniques, ce qui fait que si on prend un système international comme l'ITRF ou bien le WGS84, un point mesuré à une dérive de 2,5cm tous les ans.

Dans notre cas particulier, si on prend un système international comme système de coordonnées, notre champ agricole va inévitablement se déplacer de 2,5cm chaque année, cela implique que l'on n'a pas la répétabilité des mesures dans le temps. C'est pour cela que les systèmes locaux (en France, en Europe) sont basés sur un recalage du système de coordonnées afin de compenser la dérive due au déplacement des plaques tectoniques européennes (qui peut varier en fonction des régions, d'où les zones géographiques différencier). Par ailleurs, c'est un des avantages des systèmes de correction basés sur des réseaux RTK, dans le temps, on aura une garantie d'obtenir la même position pour un récepteur à un endroit x_1 , ainsi pour un temps t_1 puis un temps t_2 , x_1 sera constant, assurant ainsi la répétabilité des mesures.

A titre d'illustration, si l'on vise une précision inférieure à 20cm et que notre système permet une précision centimétrique de l'ordre de 1cm, au bout de 8 ans il y aura un offset de 20cm, d'où la nécessité d'un choix pertinent du système de coordonnées. C'est pourquoi, il est aussi important de bien installer et configurer les bases RTK, si on fait le choix de cette technologie, afin de garantir la répétabilité de la mesure.

Fonctionnement et architecture simplifiée d'un récepteur GNSS

Le système composant le récepteur est en général composé d'une antenne de réception des signaux radio et d'un calculateur avec une chaîne radiofréquence (un bloc analogique, un processeur de signal numérique : (DSP)) et un processeur de navigation et parfois d'une interface pour les entrées/sorties. Il existe plusieurs types de récepteurs : basés sur le Software-Defined Radio (SDR), FPGA ou le ASIC.

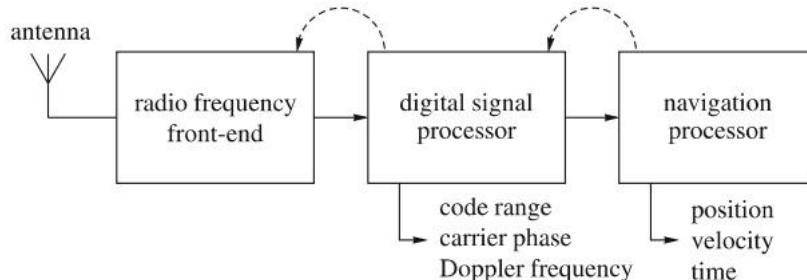
Ils sont aussi équipés d'horloges à quartz avec une précision de 10^{-10} s/jour. Ils sont, en général, capables d'acquérir simultanément les signaux de plusieurs satellites, selon le nombre de canaux d'enregistrement qu'ils possèdent (en moyenne 12 et jusqu'à 20 pour les plus sophistiqués).

Au début de la chaîne il y a tout d'abord une antenne L-bande permettant de recevoir les signaux des satellites, ensuite il y a une chaîne radiofréquence (amplificateur, oscillateur, filtre passe bande) pour la démodulation du signal et son conditionnement, on a un CAN afin d'échantillonner le signal, puis pour la partie numérique on utilise un amplificateur de gain afin de traiter le signal, un microprocesseur, des ROM/RAM pour la partie calcul.

Le processeur de signal numérique (DSP) permet, quant à lui, de réaliser la corrélation entre le signal généré localement par le récepteur et le signal réceptionné par l'antenne en provenance du satellite. On obtient ainsi les mesures de : pseudo-distance (mesure de code), mesure de phase et les fréquences Doppler.

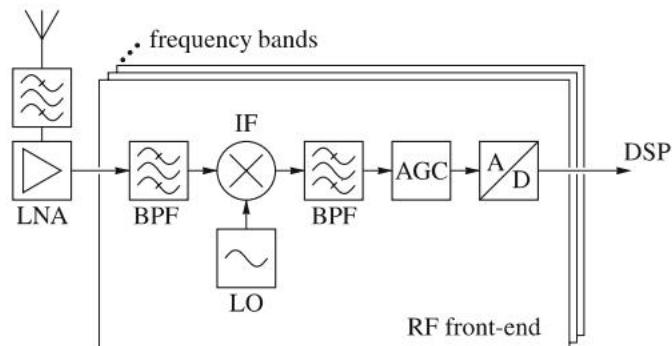
Pour les systèmes haut de gamme on peut aussi accéder aux données de navigation en sortie ainsi qu'aux mesures brutes et faire du post traitement derrière (pseudo distance, doppler et la phase du signal). Pour cela, un processeur de navigation est utilisé pour décoder le message de navigation du signal afin d'obtenir les éphémérides, l'almanach et finalement de pouvoir calculer les données de position corrigée, la vitesse et le temps (PVT).

A la sortie de la chaîne du récepteur GNSS on obtient les mesures brutes corrigées : une position, une vitesse et un temps (PVT).



Architecture simplifiée d'un récepteur GNSS

La chaîne de radiofréquence

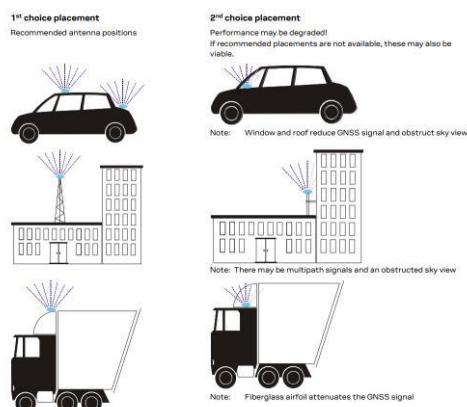


La chaine radiofréquence

L'antenne GNSS

L'une des parties les plus importantes pour un système de localisation GNSS, en effet, même le meilleur des récepteurs ne pourra pas corriger les erreurs liées aux pertes inhérentes à l'antenne. Il s'agit de l'interface directe entre le segment spatial (GNSS) et le segment sol (récepteur). Le fonctionnement d'une antenne peut se décrire par la réception des signaux des satellites, la transformation énergique des ondes électromagnétiques en courants électriques afin de les transmettre à la chaîne de radiofréquence.

Les antennes doivent recevoir les signaux du plus grand nombre de satellites possible. Les erreurs locales (bruit, multi-trajet, interférence, masquage) impliquent une utilisation avec un environnement le plus dégagé possible et de bien le placer sur le véhicule/rover.



Problème de placement d'antenne

Les types d'antennes les plus fréquents sont :

- La première est le Choke Ring, une antenne centrale est entourée de plusieurs anneaux conducteurs de forme concentrique, ce qui permet de rejeter les signaux multi-trajet. Ce type d'antenne va réfléchir les signaux venant du sol, les signaux provenant des multi-trajets vont être concentrés dans des canaux Choke afin d'être annulés ou bien réfléchis hors de l'antenne centrale.
On l'utilise sur des stations de réception lorsqu'il est nécessaire d'éviter de capter les multi-trajets, cependant, son prix est excessif.
- Les antennes sous la forme d'hélice axiale sont généralement utilisées pour les applications nécessitant plusieurs orientations d'antenne. Il s'agit d'une antenne robuste qui possède de bonnes performances pour assurer la navigation.
- L'antenne planaire (Patch Antenna) est une antenne plane extrêmement fine, peu encombrante mais ne permet aucune sélection de signal, ou de filtrage. Il peut s'agir d'antenne mono ou bi-fréquence.

Le gain d'une antenne dépend de l'azimuth et de son altitude, toutefois, les antennes omnidirectionnelles sont caractérisées par un gain uniforme quelle que soit la direction.

L'oscillateur de référence

Les récepteurs possèdent une horloge généralement moins sophistiquée que celles embarquées dans les satellites pour des raisons évidentes de coût et d'encombrement. Elles sont, en général, composées d'un cristal de quartz d'un oscillateur local beaucoup moins précis qu'une horloge atomique. L'oscillateur de référence doit être le plus stable possible et être le moins sensible possible aux vibrations.

Le module radio

Les signaux des satellites sont amplifiés grâce à un amplificateur faible bruit (low-noise amplifier : LNA), puis filtrés par un filtre passe-bande (BPF), avant d'être convertis en fréquences intermédiaires (IF) avec un mélangeur de fréquences. Puis le signal est normalisé par le bloc de contrôle automatique de gain (AGC) afin de faciliter le traitement du signal avant d'être échantillonné par le convertisseur analogique numérique : CAN (A/D) qui va discréteriser le signal analogique en entrée du bloc dans le temps (échantillonnage). Le taux d'échantillonnage minimum est défini par le théorème de Nyquist (Shannon).

Le processeur de signal numérique (DSP)

En entrée du bloc, le signal est séparé dans différents canaux. On retrouve en sortie de chaque canal la distance déterminée à partir du code, des données d'horodatage, les données des messages de navigation, le rapport signal sur bruit, etc. Certains récepteurs permettent aussi de faire la mesure de phase dans ce bloc.

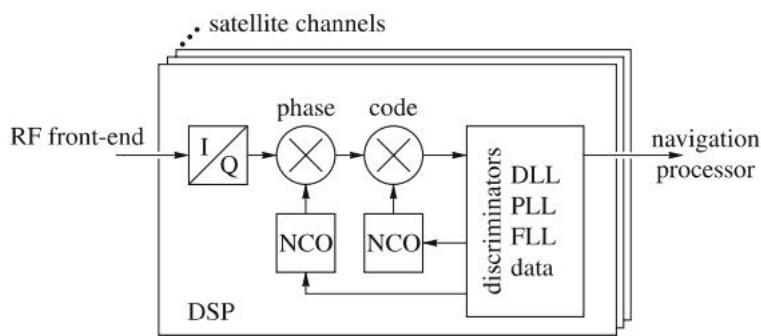


Schéma du bloc du DSP

Le processeur de navigation

Ce bloc permet d'effectuer trois tâches :

- Premièrement : le signal démodulé est utilisé pour décoder le message de navigation et déterminer la position des satellites.
- Deuxièmement : le code, la phase et les observations Doppler sont traités afin de calculer la position, la vitesse et le temps (PVT).
- Troisièmement : le bloc réinjecte certaines informations utiles aux boucles de poursuite et aux différents filtres.

Critère de choix du récepteur

Plusieurs types de récepteurs GNSS existent :

Il est nécessaire de tenir compte de plusieurs critères pour choisir le bon récepteur dont : le niveau de précision souhaité (et donc la technologie de correction), disponibilité des données nécessaires pour l'application, de sa criticité (importance de l'intégrité, de la confiance dans la précision que l'on a), de la périodicité de la localisation (plus on a besoin de la position souvent, plus le système de calcul devra être puissant), de l'encombrement (masse/volume), de l'alimentation, l'IHM et puis enfin le coût.

Il y a deux types de récepteurs :

- Les récepteurs de navigation monofréquences :

- ▶ Permet de réceptionner qu'une seule fréquence à la fois, précision métrique (position absolue en mode naturel sans correction).
 - ▶ Avantages : faible coût (quelques euros), encombrement réduit, bonne autonomie due à une consommation électrique plus faible.
 - ▶ Désavantages : temps d'analyse élevé pour arriver à la précision souhaitée (plusieurs minutes) avec des faibles performances notamment dans les environnements contraints, absence d'algorithme de correction performants.
- Les récepteurs géodésiques bi-fréquences :
- ▶ Mesure simultanée de plusieurs fréquences : acquisition des données de code et de phase, permet de déterminer des vecteurs (positionnement relatif en mode différentiel), précision centimétrique avec corrections.
 - ▶ Avantages : performances améliorées notamment dans un environnement contraint, temps d'analyse faible, algorithmes permettant l'utilisation de corrections intégrées.
 - ▶ Désavantages : prix excessif, encombrement contraignant, consommation plus élevée.

Précision et qualité de la mesure

Afin de qualifier la performance d'un système de navigation il est primordial de se concentrer sur la qualité de la précision, pour cela, il faut tout d'abord définir les paramètres de qualité.

L'intégrité

Comme déjà mentionné : l'intégrité correspond à la confiance que l'on accorde à la mesure. Elle peut être matérialisée par des alertes lorsque le système estime qu'il ne fournit plus un degré de confiance assez élevé.

La précision

La précision n'est pas la même selon l'axe et dépend de nombreux facteurs dont :

- ▶ La technique utilisée
- ▶ Le type de récepteur
- ▶ Le type d'antenne
- ▶ Le nombre de constellations et de satellites observées
- ▶ Le temps d'observation
- ▶ L'environnement (multi-trajets notamment)

La précision de la position est souvent spécifiée à 2σ ou σ près, avec σ l'écart-type de la mesure (représentant le niveau de confiance) :

- 1σ : correspond à une précision où 68% des mesures sont dans l'intervalle $\pm\sigma$
- 2σ : correspond à une précision où 95% des mesures sont dans l'intervalle $\pm 2\sigma$
- 3σ : correspond à une précision où 99.9% des mesures sont dans l'intervalle $\pm 3\sigma$

Il s'agit donc d'une mesure statistique avec un modèle d'erreur Gaussien non biaisé, et normalement distribué, donnant seulement un degré de conformité entre un paramètre (pouvant être la mesure de position ou de vitesse) mesuré et la vraie valeur de ce paramètre à un instant t.

Il existe trois types de précision :

- La précision absolue (ou prévisible) qui offre un certain degré de conformité entre la position estimée du récepteur et sa position réelle.
- La précision répétable, il s'agit de la précision avec laquelle un utilisateur pourra retourner sur la position mesurée a posteriori en utilisant le même récepteur.
- La précision relative désignant la précision avec laquelle un utilisateur pourra déterminer sa position par rapport à celle d'un autre utilisateur ayant le même récepteur.

La disponibilité

La disponibilité des signaux des satellites correspond au pourcentage de temps où les signaux sont utilisables afin de réaliser correctement la prise de mesure. La disponibilité des signaux dépend fortement des conditions

environnementales des satellites et du récepteur ainsi que du matériel pour le récepteur. La disponibilité dépend du créneau horaire de la journée.

La continuité

Cette notion est liée à la disponibilité, elle quantifie la capacité d'un système de positionnement par satellite à être performant sans interruption (non programmées) par l'utilisateur dans un laps de temps. Cela correspond donc à la probabilité que le système maintiendra sa mesure de manière continue.

La couverture

Cela correspond à la surface ou bien le volume dans lequel le système reste performant et sans interruption pour mesurer sa position avec un niveau de précision contraint. La couverture est dégradée par le masquage, les interférences, la composition atmosphérique, les multi-trajets, etc.

La fiabilité

La fiabilité est définie par la capacité d'un système à répondre aux besoins en termes de performance pour la mesure de position dans des conditions données et pour une certaine durée sans interruption. La fiabilité d'un système réparable peut être résumée au temps moyen entre les pannes et le temps moyen pour les réparer.

CONCLUSION

Afin de répondre aux contraintes de notre projet, les systèmes de localisation terrestres ont été écartés. Il a été retenu la localisation satellitaire via GNSS, notamment afin de pouvoir se localiser en extérieur, dans un champ de plusieurs hectares et atteindre une précision centimétrique inférieure à 20cm. Pour cela, plusieurs méthodes sont possibles, néanmoins, la plus intéressante reste la technologie NRTK, permettant de répondre à nos besoins tout en respectant nos contraintes : précision de l'ordre de 1 ou 2cm, coût faible (besoin d'un unique récepteur) ainsi qu'un temps de convergence faible.

Notre récepteur devra être compatible avec le NRTK, pour cela, il devra :

- ▶ Réaliser des mesures de phase
- ▶ Avoir une antenne bi-fréquence compatible avec le récepteur
- ▶ Accepter les trames de correction au format RTCM 3
- ▶ Pouvoir se connecter à internet ou bien de manière indirecte à l'aide d'un module (WiFi, Ethernet, Bluetooth, carte SIM)
- ▶ Avoir les algorithmes de correction RTK pour réaliser les calculs

Avec un récepteur permettant de traiter les corrections PPP, de recevoir et traiter des signaux sur la bande E6B, il serait aussi possible de tester les services de corrections PPP, PPP-RTK ainsi que le service Galileo HAS, lorsque celui-ci sera enfin déployé en accès libre.

Annex 4 – State of art on V2X solutions

COMMUNICATION V2X

OFF-HIGHWAY SATELLITE HIGH PRECISION PLATOONING : V2X

9 décembre 2021

Établi par Florian LEON et Walid KHALED
Lieu INSA Toulouse
Version V1.0
Référence EA2



TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES.....	2
Définition.....	4
Les différentes technologies utilisées.....	4
V2X : Norme IEEE 802.11p.....	4
Liaison sans fil dans V2X :.....	4
C-V2X : 5G	6
Modes de transmissions	7
Différences fondamentales	8
Développement logiciel du V2X.....	8
Premières pistes.....	8
Développement V2X	8
Eclipse Sumo	9
OMNeT++	9
Veins	9
Plexe.....	9
Les messages échangés.....	10
CAM : Cooperative Awareness Message.....	10
DENM : Decentralized Environmental Notification Message.....	10
CPM : Collective Perception Message	10
TIM : Traveller Information Message	10
IVI : In-vehicle Information message	11
PCM : Platooning Control Messages	11
Présentation du projet 5G CROCO de ORANGE :.....	11
Cas d'utilisation de 5G CROCCO	12
1) TOD (Tele Operated Driving)	12
2) HD MAPING.....	13
3) ACCA (Anticipated cooperative collision avoidance)	13

COMMUNICATION V2X

Définition

V2X signifie Vehicle to Anything et fait référence à la transmission de données entre un véhicule et une entité agissant sur le véhicule. Ces communications sont essentielles pour la prochaine génération de gestion de trafic actives en termes de sécurité et de gestion. On y retrouve 4 types différents :

- V2V pour Vehicle to Vehicle où les véhicules s'échangent des données entre eux.
- V2I pour Vehicle to Infrastructure où les véhicules communiquent avec les infrastructures le long des routes comme les conditions de circulations ou des alertes.
- V2P pour Vehicle to Pedestrians où les piétons et les véhicules s'échangent des données entre eux.
- V2N pour Vehicle to Network qui permet d'effectuer les 3 modes précédents mais où les messages s'échangent via un réseau cellulaire, on parle alors de C-V2X.

Les états et les industries ont participé à permettre l'interopérabilité entre les différentes marques de voitures et les infrastructures avec des messages normalisées. Pour la plupart des pays, le V2X est une technologie essentielle pour permettre de réduire les accidents de la route et d'atteindre le niveau 5 de la conduite autonome.

Les différentes technologies utilisées

V2X : Norme IEEE 802.11p

La norme IEEE 802.11p est une évolution de la norme IEEE 802.11a pour les communications véhiculaires. IEEE 802.11p utilise une couche physique (PHY) basée sur l'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) avec une largeur de bande de canal de 10 MHz. La norme IEEE 802.11p utilise les mêmes schémas de modulation et de codage que la norme IEEE 802.11a. Elle prend en charge des débits de données allant de 3 à 27 Mbps en utilisant les taux de codage 1/2, 2/3 ou 3/4 (codage convolutif) et les modulations BPSK (modulation par déplacement de phase binaire), QPSK (modulation par déplacement de phase en quadrature), 16-QAM (modulation d'amplitude en 16 quadratures) ou 64-QAM.

La méthode d'accès de base de la norme IEEE 802.11p est la Fonction de coordination distribuée (DCF) de la norme IEEE 802.11, connue sous le nom de Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA). En CSMA/CA, un nœud doit détecter le canal radio avant de transmettre un paquet. Le nœud ne transmettra pas si un autre nœud utilise le canal. Si le canal est détecté comme étant libre, le nœud peut commencer sa transmission. Si le canal est perçu comme occupé, le nœud reporte sa transmission jusqu'à la fin de la transmission en cours.

Liaison sans fil dans V2X :

Le tableau suivant montre les caractéristiques des technologies sans fil utilisées dans V2X :

Caractéristiques de la liaison sans fil	Technologie			
	802.11 p WAVE	1.0.1.a - Wi-fi	Cellulaire	Infrarouge
Débit de données	3-27 Mb/s	6-54 Mb/s	< 2 Mb/s	< 1 Mb/s < 2 Mb/s
Portée de communication*	< 1000 m	< 100 m	< 15 km	< 100 m(CALM IR)
Puissance d'émission (max)	760 mW (US) 2 W EIRP (EU)	100 mW	2000 mW (GSM) 380 mW (UMTS)	12800 W/Sr pulse peak
Bandes passantes	10 MHz 20 MHz	1-40 MHz	25 MHz (GSM) 60 MHz (UMTS)	N/A
Spectre alloué	75 MHz (US) 30 MHz (EU)	50 MHz@2.5 GHz 300 MHz@5 GHz	Dépend de l'opérateur	N/A
Aptitude à la mobilité	Haute	Basse	Haute	Moyenne
Bande de fréquences	5.86-5.92 GHz	2.4, 5.2 GHz	800 MHz, 900 MHz, 1800 MHz	835-1035 nm

Source :

https://serres.ifsttar.fr/fileadmin/contributeurs/serres/Action3/3-11_Etat_de_l_art_V2X-1.pdf

Le tableau suivant résume plusieurs projets qui ont utilisé le standard V2X :

Nom du projet	Information projet		
	Période	Type de financement	Objectifs
AKTIV	2006-2010	Ministère de l'économie et de la technologie (Allemagne)	Design, développement et évaluation de systèmes d'aide à la conduite et communications V2V et V2I. http://www.aktiv-online.org/index.html
Communication véhicule-véhicule consortium (C2C-CC)	En cours	N/A	Développement de standards européens pour les communications V2X, applications de sécurité et de prototypages, démonstration, harmonisation à travers le monde, déploiement et business plans. http://www.car-2-car.org/
CityMobil	2006-2010	Europe	Intégration de systèmes de transport automatisés en milieu urbain, basés sur des implantations en vraie grandeur. http://citymobil-project.eu/
COM2REACT	2007-2008	Europe	Applications de trafic distribuées basées sur des communications cellulaires et V2V, et véhicule vers centre de communication. http://www.com2react-project.org/
COOPERS	2006-2010	Europe	Applications télémétriques pour l'infrastructure routière, systèmes de trafic coopératifs impliquant des véhicules et des unités bord de voie. http://www.coopers-ip.eu/
CVIS	2007-2011	Europe	Terminaux multi-voies pour la connexion Internet itinérante, architecture de communication ouverte, localisation, applications commerciales, boîte à outils (modèles, guides et recommandations), et carte de déploiement
Cybercars2	2006-2008	Europe	Coopération entre véhicules courte portée (platooning) et aux carrefours (traversée) http://cybercars.org
CyberMove	2001-2004	Europe	Nouveaux systèmes de transports intelligents basés sur les Cybercars (véhicules automatiques) comme un complément aux transports de masse. http://www.cybermove.org
ETSI TC ITS	En cours	N/A	Activités de standardisation pour aider au développement et l'implémentation des ITS. http://portal.etsi.org/portal_Common/home.asp
EVITA	2008-2011	Europe	Communications intra-véhicules sûres. Architectures et réseaux d'unités à bord des véhicules. http://www.evita-project.org/
GeoNet	2008-2009	Europe	Spécifications, développements et tests de réseaux IPv6 qui peuvent être utilisés par une architecture coopérative (e.g., CVIS). http://www.geonet-project.eu/
HAVE-IT	2008-2011	Europe	Mise en circulation de véhicules (autos, bus et camions) hautement automatisés. Conduite semi-automatisée. http://haveit-eu.org
IEEE P1609	En cours	N/A	Standard pour accès sans fil en environnements véhicules (WAVE). http://standards.its.dot.gov/fact_sheet.asp?f=80
ISO TC 204 WG16/CALM	En cours	N/A	Protocoles et paramètres pour les liaisons moyennes et longues distances de communication ITS. http://www.isotc204wg16.org/
PATH	En cours	Epartement des transports Californie (Caltrans)	Multidisciplinaire programme de recherche géré par l'Université de Berkeley et Caltrans. http://www.path.berkeley.edu/

SAFESPORT	2006-2010	Europe	Réseaux AzdHoc, localisation relative précise, carte de trafic locales, applications de sécurité. http://www.safespot-eu.org/
SEVECOM	2006-2009	Europe	Architecture de sécurité pour les communications entre véhicules. http://www.sevecom.com
IntelliDrive connu avant comme le consortium VII (VIIC)	En cours	Département transports USA des	Initiative sur un programme global ITS. http://intellidriveusa.org/
COVEL	2009-2011	Europe	Localisation précise au niveau des voies et communications Adhoc entre véhicules et véhicules-infrastructure (Unités bord de voie et Poste de contrôle). http://www.covel-project.eu
PANsafer	2009-2012	ANR-VTT	Réseaux Adhoc de communication entre passages à niveau et véhicules environnants. http://pansafer.inrets.fr/
SCOREF	2010-2013	FUI	Système Coopératif Routier Expérimental projet de recherche collaboratif, d'expérimentation des systèmes coopératifs routier s'inscrivant dans un cadre Européen d'expérimentation. http://www.scoref.fr/

Source

https://serres.ifsttar.fr/fileadmin/contributeurs/serres/Action3/3-11_Etat_de_l_art_V2X-1.pdf

C-V2X : 5G

Plus de 800 opérateurs mobiles dans le monde ont déployé des réseaux compatibles avec les normes 3GPP, ce qui leur permet de bénéficier d'une interopérabilité mondiale et d'économies d'échelle. En juin 2017, le 3GPP a achevé la normalisation de la technologie C-V2X (Cellular Vehicle-to-Everything). Basée sur le LTE, cette technologie cellulaire est conçue pour connecter les véhicules entre eux, aux infrastructures routières, aux autres usagers de la route et aux services basés sur le cloud.

Pourquoi C-V2X ?

De nombreux constructeurs automobiles ajoutent la connectivité C-V2X à leurs véhicules car elle présente plusieurs avantages clés par rapport aux technologies antérieures conçues pour permettre les communications entre véhicules. Elle peut :

- Tirer parti de la couverture complète des réseaux LTE sécurisés et bien établis.
- Permettre des communications en temps réel très fiables, à des vitesses élevées et dans un trafic dense
- Prendre en charge les transmissions à courte et longue portée entre les véhicules et les infrastructures routières.

Elle fait partie de la feuille de route vers la connectivité 5G.

Dans notre cas, le C-V2X sera utilisé pour soutenir le platooning. Le platooning est la formation d'un convoi dans lequel les véhicules sont beaucoup plus proches les uns des autres qu'il n'est possible de le faire en toute sécurité avec des conducteurs humains, ce qui permet de mieux utiliser l'espace routier, d'économiser du carburant et de rendre le transport de marchandises plus efficace. Le C-V2X peut être utilisé pour permettre la communication entre jusqu'à trois véhicules du peloton, afin qu'ils ralentissent ou accélèrent tous simultanément. Le C-V2X pourrait également être utilisé pour signaler la présence du peloton aux autres véhicules et aux infrastructures routières. Les pelotons seront flexibles dans la mesure où ils seront généralement établis sur une autoroute, puis séparés lorsqu'un véhicule quitte l'autoroute. Pour les pelotons de plus de trois véhicules, le relais des informations entre les véhicules prend trop de temps pour permettre un freinage synchrone. Par conséquent, les pelotons de plus de trois véhicules devront également utiliser l'infrastructure de réseau cellulaire à faible latence qui sera déployée avec la 5G.

Modes de transmissions

C-V2X utilise deux modes de transmission complémentaires :

1) Communications directes entre véhicules, entre véhicules et infrastructures, et entre véhicules et autres usagers de la route, tels que cyclistes et piétons. Dans ce mode, C-V2X fonctionne indépendamment des réseaux cellulaires.

2) Les communications réseaux, dans lesquelles C-V2X utilise le réseau mobile conventionnel pour permettre à un véhicule de recevoir des informations sur l'état de la route et le trafic dans la zone.

1) La bande de fréquences ITS 5,9 GHz a été mise de côté par les gouvernements du monde entier pour permettre aux véhicules de communiquer entre eux en utilisant des fréquences dédiées qui ne seront pas soumises à des interférences. Grâce à cette bande, C-V2X peut prendre en charge des connexions directes à faible latence sur de courtes distances, sans l'intervention du réseau cellulaire. Comme le 802.11p, le C-V2X utilise le système mondial de navigation par satellite (GNSS) pour déterminer la position du véhicule et synchroniser les communications entre les véhicules et avec l'infrastructure routière. Dans ce mode, aucune carte SIM n'est nécessaire, car le véhicule n'a pas besoin de se connecter au réseau cellulaire. Le véhicule et son conducteur restent anonymes, car aucun abonnement cellulaire n'est nécessaire pour les communications de sécurité directes. C-V2X et 802.11p peuvent coexister dans le spectre ITS en utilisant des canaux différents dans la bande 5,9 GHz. Seulement 10 MHz de spectre dans la bande 5,9 GHz sont nécessaires pour prendre en charge les services de sécurité de base, tandis que 70 MHz pourraient prendre en charge des services de sécurité avancés, tels que le partage de grandes quantités de données collectées par des capteurs embarqués.

2) C-V2X peut également prendre en charge les applications de véhicule à réseau (V2N) fournies sur le spectre cellulaire sous licence commerciale. Ce mode peut être utilisé pour fournir une assistance réseau pour les fonctions liées à la sécurité, ainsi que des services commerciaux, nécessitant l'intervention d'un opérateur mobile, donnant accès à des données ou des informations basées sur le cloud. Ce mode permet également au C-V2X d'exploiter la sécurité et la confidentialité des données des réseaux mobiles. Les services à délai d'exécution critique peuvent être pris en charge par l'informatique en périphérie, c'est-à-dire le déploiement de serveurs informatiques et l'analyse de données en périphérie du réseau.

Développé pour être à la fois déployable à court terme et à l'épreuve du temps, C-V2X est suffisamment polyvalent pour prendre en charge les cas d'utilisation d'aujourd'hui et de demain. Compatible avec les réseaux cellulaires 4G et 5G, il est conçu pour être à la fois évolutif et interopérable. À terme, C-V2X prendra en charge les systèmes avancés d'aide à la conduite (ADAS) dans lesquels les véhicules peuvent coopérer, coordonner et partager les informations collectées par les capteurs, et finalement, la conduite automatisée connectée (CAD).

Différences fondamentales

	C-V2X: PC5	802.11p	C-V2X: PC5 ADVANTAGE
Synchronization	Synchronous	Asynchronous	Spectral Efficiency. Synchronization enables time division multiplexing (TDM) and lowers channel access overhead.
Resource Multiplexing Across Vehicles	FDM and Time Division Multiplexing (TDM) Possible	TDM Only	Frequency Division Multiplexing allows for larger link budget and therefore longer range - or more reliable performance at the same range
Channel Coding	Turbo	Convolutional	Coding gain from turbo codes leads to longer range - or more reliable performance at the same range.
Retransmission	Hybrid Automatic Repeat Request (HARDQ)	No HARQ	Leads to longer range - or more reliable performance at the same range.
Waveform	SC-FDM	OFDM	Allows for more transmit power with the same power amplifier. Leads to longer range - or more reliable performance at the same range.
Resource Selection	Semi-persistent transmission with relative energy-based selection.	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA-CA)	Optimizes resource selection with selection of close to 'best' resource with no contention overheads. By contrast 802.11p protocol selects the first "good enough" resource and requires contention overhead.

Source: [5GAA](#)

Développement logiciel du V2X

Premières pistes

Développement V2X

À la suite de la réunion avec Orange, nous avons pu obtenir des informations complémentaires sur le développement logiciel de la couche applicative du V2X (même que le C-V2X). Tout d'abord, le développement se fait avec des outils open sources en Rust et le but à terme est de migrer sur du python. Quatre outils seront principalement et conjointement utilisés au cours de nos travaux : OMNeT++, Veins et Plexe au sein d'Eclipse Sumo plébiscité par Orange. Nous donnerons une courte description de ces outils ainsi que des messages échangés au cours des communications.

Eclipse Sumo

Eclipse SUMO pour Simulation of Urban Mobility est un outil open source et portable de simulation de traffic multi-modal conçu pour les grands réseaux. Parmi les fonctionnalités proposées par l'outil nous retiendrons :

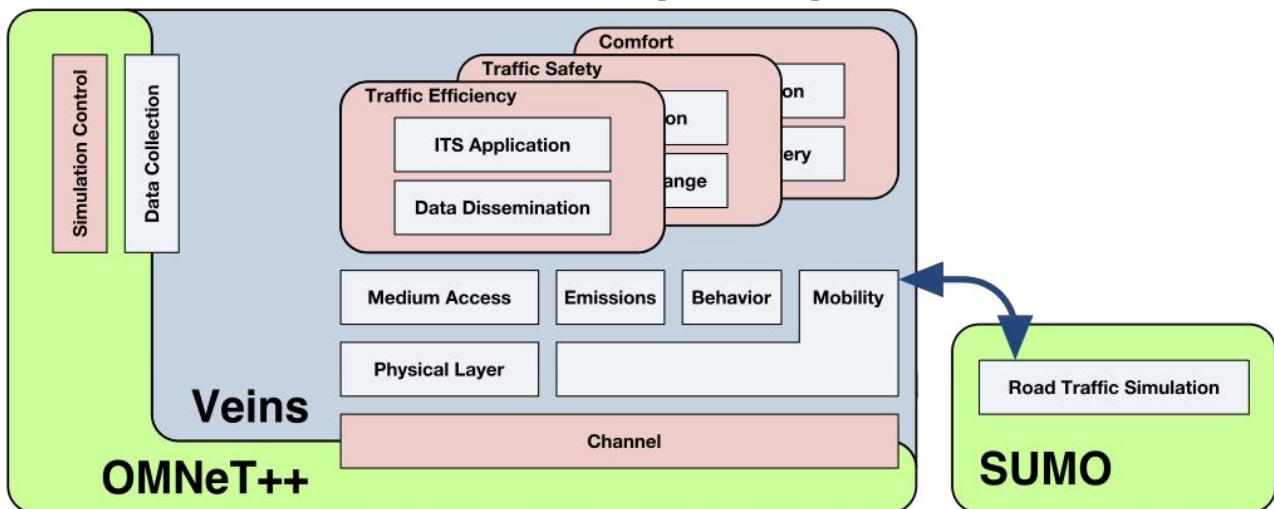
- La conduite autonome qui nous permet d'équiper des véhicules avec un appareil de transition de control (ToC)
- La possibilité de contrôler les mouvements de chaque objet individuellement
- De pourvoir importer des cartes ou du moins des réseaux routiers par exemple sous format OpenStreetMap.
- Permet l'implementation et le test des communication V2X couplé avec un simulateur de réseau.

OMNeT++

OMNeT++ est une bibliothèque C++ principalement utilisé pour construire des simulateurs de réseaux filaire mais aussi sans fil dans de nombreux domaines comme des réseaux de capteurs et dans notre cas le V2X. Dans notre cas, nous utiliserons le plugin OpenCV2X qui nous permettra de simuler un réseau C-V2X. Cet outil sera directement intégré à Veins.

Veins

Veins est un outil open source qui regroupe les deux précédents outils, OMNeT++ et Eclipse SUMO dans le même IDE. Son but est de rendre les simulations le plus réaliste possible. Voici son fonctionnement.



Il repose sur la couche réseau simulé par OMNeT++ et simulée traffic via SUMO. Il fonctionne principalement sur le V2X IEEE 802.11p mais nous avons la possibilité d'utiliser un modèle tiers basé sur 3gpp LTE and C-V2X. Nous pouvons également importer des scénarios entiers d'OpenStreetMap.

Plexe

Plexe est un outil collaboratif qui étends SUMO et Veins en permettant une simulation réaliste du platooning. Il rassemble donc tous les avantages et fonctionnalités de Eclipse SUMO et Veins tout en nous permettant de simuler un convoi de platooning.

Les messages échangés

CAM : Cooperative Awareness Message

Objectif → partager les informations basiques sur un véhicule

Il comporte :

- Type du véhicule
- Vitesse
- Position
- Accélération
- Direction (Heading)
- État des feux/sirènes
- Etc.

Caractéristiques techniques :

- Taille du message → 50 - 100 octets
- Broadcast timing → 100ms - 1s

DENM : Decentralized Environmental Notification Message

Objectif → diffuser des alertes sur les événements sur route

Ces événements peuvent être :

- Accident
- Alertes météo
- Embouteillages
- Travaux
- Etc.

Peut être envoyé directement par les RSU et automatiquement par les véhicules pour alerter ses voisins.

Les véhicules qui reçoivent cette information décident de sa pertinence selon l'historique.

Caractéristiques techniques :

- Taille du message → 50-400 octets
- Broadcast timing → toutes les 100 ms

CPM : Collective Perception Message

Objectif → c'est le message "Je vois quelqu'un là-bas" à la différence du CAM ("Je suis là")

Les véhicules avec des capteurs intelligents et/ou des caméras peuvent partager les informations avec les autres véhicules mais aussi à propos des véhicules "non connectés".

Il comporte des informations similaires à CAM mais abstraites.

Caractéristiques techniques :

- Taille du message → 50 - 1400 octets
- Broadcast timing → toutes les 100ms

TIM : Traveller Information Message

Version électronique des panneaux de signalisation pour une zone circulaire ou un chemin aux coordonnées définies.

Informations partagées :

- Limite de vitesse
- Rue à sens unique
- Conditions de la route comme un accident ou une route glissante

Renvoi un code qui est ensuite converti en phrases :

268 12594 8721 → Speed Limit 50 km/h

Version US non utilisable en Europe mais utile pour la suite.

IVI : In-vehicle Information message

Version EU du message TIM mais en plus précis, par exemple sur le type de véhicule :

"Speed limit 80 km/h for trucks larger than 15t"

→ Peut être utiliser pour afficher des informations sur un HUD

Caractéristiques techniques :

- Taille du message → 100 - 400 octets
- Broadcast timing → every 1s

PCM : Platooning Control Messages

Objectif → Permettre de former un peloton et de coordonner les déplacements

Pour former un peloton, les véhicules échangent :

- La puissance du moteur
- La puissance du freinage
- Poids du véhicule
- Dimensions du véhicule
- Etc,

Une fois le peloton formé, on peut coordonner la vitesse et le freinage pour conserver une distance minimale tout en gardant une marge de sécurité

Caractéristiques techniques :

- Taille du message → 50 - 200 octets
- Broadcast timing → toutes les 100ms

Bien que ces messages nous permettraient d'obtenir directement le comportement voulu, ils ne sont pas encore implémentés officiellement dans le standard mais la présentation finale du [projet](#) n'est prévu que pour Mars 2022 et donc pas utilisable pour notre projet.

Présentation du projet 5G CROCO de ORANGE :

Un projet qui cherche à assurer la qualité et la continuité de service pour les clients (voitures connectées) durant leur franchissement des frontières, un projet en coopération avec plusieurs partenaires de plusieurs domaines comme les opérateurs mobiles et les fournisseurs de technologies télécom et aussi les autorités routières.

Le véhicule étant connecté au réseau du pays 1 entre dans le pays °2, il reste un moment connecté à son réseau local jusqu'à perdre la synchronisation, à ce moment-là une actualisation et recherche d'un réseau est faite et il se connecte sur le réseau du pays n°2 et reçoit une adresse IP (ROAMING).

Le projet cherche aussi à avoir un service d'alertes par des messages qui s'échangent entre les véhicules passant par le cloud afin de prévenir les différents utilisateurs de potentiels dangers sur la route.

Des antennes 5G sont déployées tout le long des bordures des autoroutes afin d'assurer la connectivité des véhicules en proximité.

Des essais réels sont actuellement réalisés entre la France et l'Allemagne et le Luxembourg pour tester et évaluer cette nouvelle technologie.

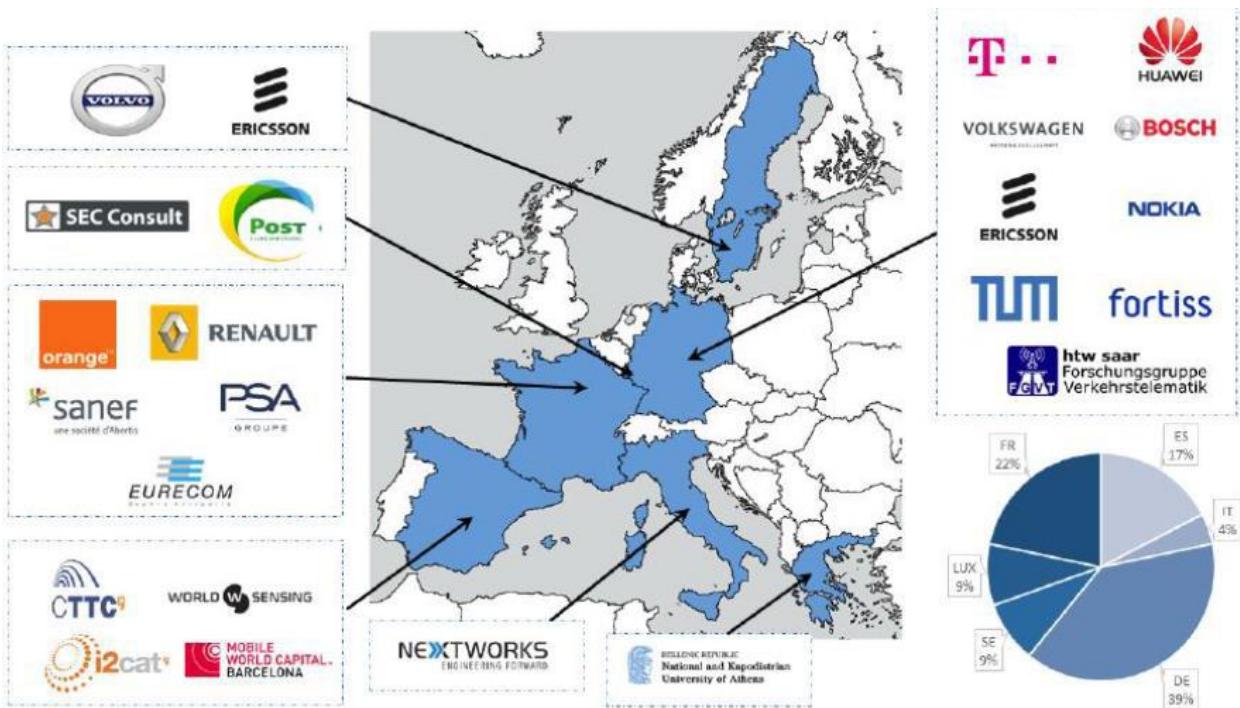
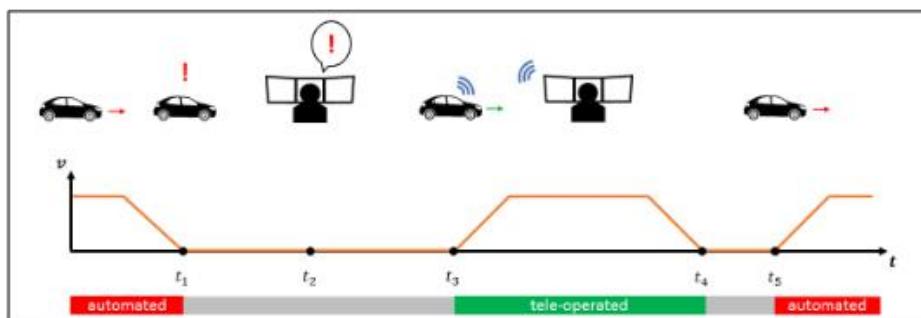
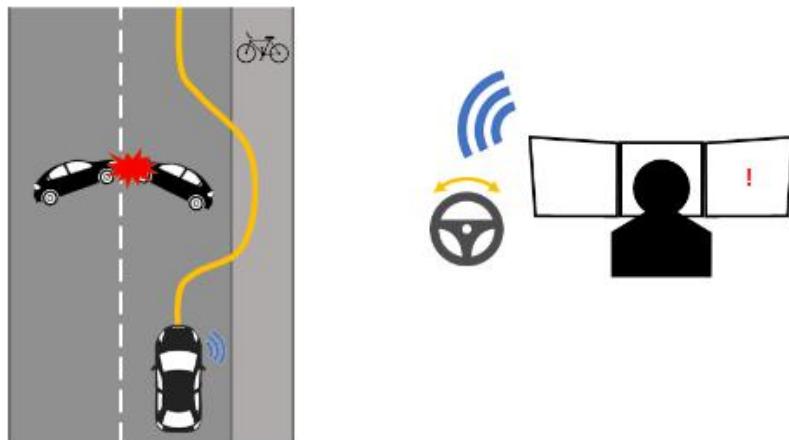


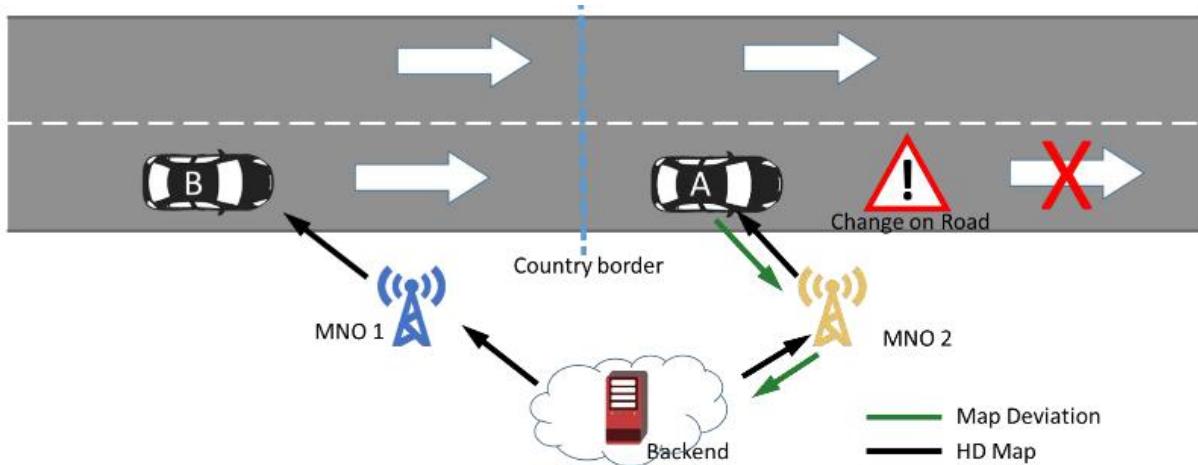
FIGURE 1 DIFFERENTS PARTENAIRES DU PROJET 5GCROCO

Cas d'utilisation de 5G CROCCO

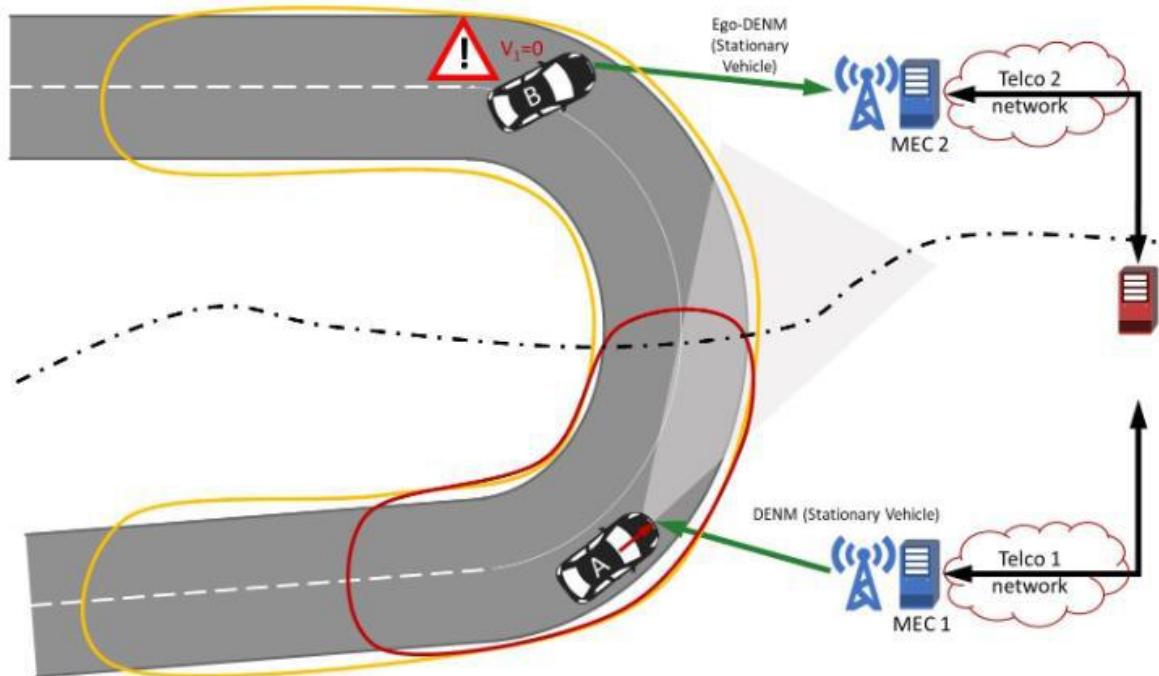
1) TOD (Tele Operated Driving)



2) HD MAPING



3) ACCA (Anticipated cooperative collision avoidance)



Source : https://5gcroco.eu/images/templates/rsvario/images/CLEEN_WS.pdf

Annex 5 – Github with all our codes

https://github.com/walidmr11/Platooning_Project/invitations

Annex 6 – Roles distribution on the project

Tâche(s)	Membre(s) de l'équipe	Etat d'avancement
<u>Phase état de l'art Positionnement par satellite</u> Teo : Tout	Teo	Terminé
<u>Phase état de l'art V2X/CV2X :</u> Walid/Florian : Tout > Recherches et Rédaction état de l'art CV2X Alexandre : Recherches CV2X et prises de contact ainsi que de réunions avec des acteurs industriels implémentant le CV2X (Orange, Continental, NXP, YoGoKo)	Florian + Walid + Alexandre	Terminé
<u>Test et installation du récepteur GNSS :</u> Teo : Réalisation en totalité de la fonctionnalité -Montage et test des 2 récepteurs classiques -Montage, configuration et test du récepteur GNSS Novatel et l'INS -Test des réseaux NRTK/PPK/HAS des fournisseurs de service : TERIA/Premium Positioning/Centipede/TerraStar -Métrie/Mesure de la précision -Collecte/Stockage/Traitement (Node-RED/Javascript) et transmission des données (MQTT) -Codage de la fonction de parsing et de conversion des données (Python/Javascript) -Codage de la fonction de calcul de distance	Teo	Terminé
<u>Partie fonctionnelle V2X :</u> Walid/Florian : Installation de Eclipse SUMO et simulation de Trafic et de platooning Alexandre/Florian : Installation OMNet++, INET, Veins et SUMO et réalisation de simulations en suivant un tutoriel youtube (https://www.youtube.com/watch?v=PfAWhrmoYgM)	Florian + Walid + Alexandre	Terminé

<p>Walid/Florian/Alexandre : Test des API ORANGE (Client SUMO, Client OBU, Client ITS)</p> <p>Florian : Réalisation en totalité de la fonctionnalité</p> <p>Codage de la fonction V2X :</p> <ul style="list-style-type: none"> -Adaptation du code d'Orange -Mise en place du serveur MQTT distant -Collecte/Stockage/Traitement (python) et transmission des données (MQTT) -Ecriture du script facilitant la récupération des informations sur le véhicule esclave - Ecriture du script permettant de récupérer les données GPS via MQTT 		
<p><u>Réalisation du système d'observation :</u></p> <p>Teo : Réalisation en totalité de la fonctionnalité</p> <p>Dashboard Node-RED (capteurs + interface web) et système d'observation (Google earth Pro + Node-RED) + conversion des trames GGA en KML + création de serveur distant pour l'actualisation de l'observation en temps réel.</p>	Teo	Terminé
<p><u>Algorithme de suivi de trajectoire</u></p> <p>Teo/Alexandre : lecture de tout le code de Diep, proposition de fonction</p> <p>Florian/Alexandre/Elliott : Test réel sur la navette</p> <p>Alexandre : Installation et prise en main ROS : réalisation des tutoriels officiels ROS (http://wiki.ros.org/ROS/Tutorials) ainsi que des tutoriels trouvés sur youtube :</p> <p>https://www.youtube.com/watch?v=eJ4QPrYqMIw&t=1089s</p> <p>https://www.youtube.com/watch?v=k3axKeaS66A</p>	Toute l'équipe	En cours

<https://www.youtube.com/watch?v=B-7-xK- rYw&t=1210s>

et recherche et compréhension de packages déjà existants sur ROS utiles pour notre projet (navigation, move_base, gps_goal, etc)

Alexandre/Florian : Recherche et compréhension de packages déjà existants sur ROS utiles pour notre projet (navigation, move_base, gps_goal, etc)

Alexandre : Fonction python d'obtention de la position (latitude et longitude) actuelle de la navette ACTIA

Alexandre : Fonction python de calcul de la distance à parcourir entre la position actuelle de la navette ACTIA (esclave) et la position du maître

Walid : Installation ROS et recherches de TUTOS

Walid : Etude du code de Diep pour adapter le mode manuel au mode automatique

Walid : fonction (python) qui calcule l'angle entre deux positions GPS pour avoir la direction à suivre en degrés

Walid : fonction qui convertit les données GPS (latitude, longitude) en pixels x, y (adaptation à ROS)

Walid : Décortication d'un code de suivie de trajectoire utilisant PID (en cours)

Elliott : Prise en main du code déjà réalisé sur la navette + formation à la notion de système ROS.

Elliott/Alexandre : Tentative d'implémentation d'un projet de calcul de trajectoire via github

(https://github.com/danielsnider/gps_goal)

Alexandre/Walid/Elliott/Teo : Fonction python de déplacement de la navette en temps réel selon la position du maître

Teo/Alexandre : Etude du code de Diep pour remettre en place la ressource Tree de oneM2M pour les relèves des données des capteurs de la navette à utiliser pour le système d'observation.		
<u>Installation de ROS et prise en main du code Diep pour la navette :</u>		
Elliott : Mise en place d'un système nomade (Configuration réseau local + Accès internet + contrôle de la raspberry) via Ethernet	Elliott + Alexandre	Terminé
Elliott/Alexandre : Mise en place de l'architecture sur la raspberry		
Elliott/Alexandre : Simulations		
Elliott : Mise en page du rapport		
<u>Gestion de projet :</u>		
Alexandre : Organisation des réunions et envoie des mails aux différentes parties prenantes du projet (ACTIA, Orange, M. Monteil)	Teo + Alexandre	En cours
Teo : Mise en place de Trello + automatisation de Trello (rapport d'activité)		

Annex 7 – CV's of team members



TEO GENEAU

INGÉNIEUR MOBILITÉ ÉLECTRIQUE - DISPONIBLE À PARTIR DE JANVIER 2022

CONTACT

BORDEAUX | PARIS | TOULOUSE
06.72.03.80.49
geneau.teo@gmail.com
24 ans

LANGUES

 ANGLAIS
Courant (C1)

 ESPAGNOL
Bilingue

COMPÉTENCES

Métreologie, contrôles et essais qualités, analyse des résultats de mesures, définition d'une chaîne de mesures.

Informatique, électronique, traitement du signal, automatique, microcontrôleur.

Intégration IoT, middleware IoT.

Système d'Hypervision et supervisions.

Machine Virtuelle, Cloud computing.

- Python
- Java
- C, C++
- ARM
- Labview
- R
- MatLab
- Pack Office 
- VBA
- HTML/CSS

CENTRES D'INTÉRÊT

-  Sport : Rugby, Tennis
-  Voyages
-  Musique
-  Reportages Animaliers, Cinéma
-  Sciences : Computer Science, Energies Renouvelables, IoT
-  Bénévolat : Entraînement d'une équipe de rugby junior.

EXPÉRIENCE PROFESSIONNELLE

CHEF DE PROJET - DÉPLOIEMENT MOBILITÉ ÉLECTRIQUE

TOTAL ÉNERGIES, Nanterre | Juin 2021 - Août 2021

Pilotage du déploiement des implantations des infrastructures intelligentes de recharge pour véhicules électriques (IRVE), automatisation des processus métiers (VBA/HTML/CSS/CRM), conseil technique, étude de faisabilité, chiffrage et gestion des délais.

CHEF DE PROJET - INGÉNIEUR SYSTÈMES

EGIS, Smart Mobilité & Systèmes, Paris | Février - Juillet 2021

Pour le Ministère de l'intérieur :

- Coordination technique dans le cadre de l'intégration d'équipements automatisés, au sein du système d'information du Département du Contrôle Automatisé (DCA) ;
- Suivi de l'expérimentation de mise en œuvre de nouveaux radars innovants, y compris la gestion des différents systèmes d'information ;
- Montage d'outils de gestion de projet (suivi, reporting, VBA).

Pour la Métropole de Toulouse :

- Déploiement d'objets communicants (IoT) : éclairage public intelligent (Lora), système de mesure de la qualité de l'air (Sigfox).

PROJET CAR PLATOONING

ACTIA, Toulouse | Septembre 2021 - Février 2022

Projet industriel : Car Platooning de véhicules agricoles, V2X communication, V2I WiFi/5G, géolocalisation GPS avec corrections PPP.

PROJET EDGE COMPUTING - CAR PARK

INSA, Toulouse | Septembre 2020 - Février 2021

Création et développement d'une application permettant de déterminer les emplacements libres dans un parking par reconnaissance de formes (Python, OpenCV, Android).

STAGE EN ÉLECTRONIQUE ET OPTIQUE

TAMK, Tampere University, Finlande | Avril - Juillet 2017

Réalisation de l'automatisation d'un système complet de mesure du taux de poussière lors de la production de papier en plus du développement de ses méthodes d'analyse et réalisation de fiches techniques.

FORMATION



MASTER RÉSEAUX EMBARQUÉS & OBJETS CONNECTÉS

INSA-ENSEEIHT, Toulouse | Depuis 2021

Master en collaboration entre l'ENSEEIHT et l'INSA Toulouse. Architectures avancées et Qualité de Service pour les Réseaux Avionique et IoT (Bus CAN, AFDX) ; Virtualisation de fonctions réseaux (SDN, NFV, P4).



INGÉNIEUR AUTOMATIQUE & ÉLECTRONIQUE

INSA, Toulouse | Depuis 2017

Spécialisation Innovative Smart System : Conception innovante, modélisation, analyse et développement des systèmes de commande automatique et des systèmes électroniques (smart system, IoT).



DUT MESURES PHYSIQUES

IUT de Bordeaux | 2015 - 2017



Florian Leon

Recherche de stage

A propos



143 Avenue de Muret
31300, Toulouse
06 51 69 39 38
leon-florian@hotmail.fr
www.linkedin.com/in/florianleon/
Mobilité internationale
Permis B

Compétences

Informatique :

- Bonne connaissance des suites bureautiques
- Bonne connaissance des systèmes Windows, Linux et MacOs
- Expérience de programmation en Java, Python, C, Git, base de données, OneM2M

Langues :

- Anglais : TOEIC : 980 points
- Espagnol : Niveau B2/Intermédiaire

Autre :

- Obtention du Brevet d'Initiation à l'Aéronautique (BIA) avec mention bien

Centres d'intérêts

- Voyage : Plusieurs voyages effectués autour du monde, découverte de nombreuses cultures
- Aéronautique : Prise de cours de pilotage
- Tennis : 5 ans en club, participation à des compétitions en solo et en équipe
- Photographie : www.eyeem.com/u/florianleon

Formation

2017-2022 INSA (Institut National des Sciences Appliquées)
Toulouse

- Cinquième année d'Informatique et Réseaux
- Spécialité Informatique, Innovative Smart Systems, IoT

2017 - Baccalauréat série S, Science de l'Ingénieur, option mathématiques

- Mention très bien et félicitations du jury
- Lycée Paul Moreau Ile de la Réunion
- Représentant des élèves pendant deux ans

Expérience professionnelle

07/2021 - 09/2021 : Stage en Recherche et Développement
SII | Toulouse, France

- Collaboration avec Fans4All pour faciliter la transcription d'un message ATIS pour aider des pilotes malentendants
- Développement d'un outil de Speech to Text
- Rédaction d'un état de l'art
- Constitution d'un dataset et traitement des données
- Entrainement d'un modèle de Deep Learning

07/2018 - 08/2018 : Stage d'un mois dans un service informatique
Air Austral | Sainte-Marie, Ile de la Réunion

- Utilisation du Gestionnaire Libre de Parc Informatique (GLPI)
- Déploiement et implementation des nouveaux ordinateurs
- Création de procédures pour les nouveaux stagiaires
- Participation à la mise en place d'un nouveau système d'inventaire

Projets

2020 - Programmation sur microcontrôleur en C

- Projet scolaire de trois mois en équipe de quatre personnes
- Gérer les principales fonctions pour le contrôle d'un voilier
- Développement sur Keil (pour STM32)
- Utilisation de timers, GPIO, PWM, ADC

2020 - Développement d'une application de communication

- Projet scolaire de quatre mois en binôme codé en Java
- Utilisation des sockets
- Codage de l'interface

2021 - Maintenance prédictive de cobots

- Projet scolaire d'un an en équipe de quatre personnes
- Rédaction d'un état de l'art
- Utilisation de Machine Learning pour prédire la fin de vie d'un cobot



Walid KHALED

Ingénieur en électronique embarquée & Télécommunication

FORMATION

INSA TOULOUSE

Master spécialisé MSIOT

Sept 2021 - Aout 2022

Université de Paris Nanterre

Sept 2020 - Aout 2021

Master 2, EESC (électronique embarquée et systèmes de communication)

Sept 2019 - Aout 2020

Master 1, EESC (électronique embarquée et systèmes de communication)

Université de Bejaia

Majeur de promotion

Sept 2016 - juillet.2017

Licence, électrotechnique

EXPERIENCES PROFESSIONNELLES

SNCF RESEAU

Saint-Denis, France

Responsable électronique embarquée (Alternance)

Sept 2020 - Aout 2021

▪ Assistant en pilotage projet

▪ Traduction des cahiers de charges en projets et sélection des moyens nécessaires à leurs réalisation (capteurs...)

Responsable électronique embarquée (stage)

Avril 2020 - Sept.2020

▪ Recherche et intégration de nouveaux capteurs sur un pantographe instrumenté

AL HARAMAIN AUTOMATION

Alger, Algérie

Installateur / Technicien (stage)

Juin 2018 - Sept.2018

▪ Installation et conception d'armoires électriques BT

Université de Bejaia

Algérie

Projet de fin d'étude

Janvier 2019 - Juillet 2019

▪ Commande par mode glissant d'un drone quadri-rotors

COMPETENCES

Gestion de projet



Curiosité



Travail d'équipe



Logique et esprit d'analyse



Communication



LANGUES

Arabe courant

Anglais intermédiaire

✉ Walidbac1995@gmail.com

📍 6 Rue des pépinières, 94400

📅 25 ans

🚗 Permis B

📞 0629566866

LOGICIELS

Arduino ●●●○○

- Réalisation d'un robot qui esquive les obstacles

Solidworks ●●●●○

- Conception et simulation de pièces mécaniques

Ansys HFSS ●●●●●○

- Simulation des antennes en hyper fréquences

Ecodial ●●●○○

- Calcul des sections de câbles pour une installation industrielle

GI BENCH ●●●●○○

- Data acquisition, FFT...

LANGAGES

C ●●●○○○

Python ●●●●●○○

Matlab, Simulink ●●●●●○○

Java ●●●○○○

CENTRES D'INTERETS

Photographie (paysages)

Voyage

Sport (Fitness)

RESEAUX SOCIAUX

In Walid Khaled

Instagram Walid_mr11_fr

Alexandre AL AJROUDI

INSA



Elève Ingénieur en M2 Génie Informatique et Réseaux à l'INSA Toulouse | Double diplôme MsC Entrepreneuriat et Business Development à la Toulouse Business School | En recherche d'un stage de fin d'études à partir de Mars 2022

Les nouvelles technologies m'inspirent et j'aimerais apporter ma pierre à l'édifice d'une entreprise innovante. Mon objectif dans l'avenir serait de concilier business et technique dans un poste tel qu'Ingénieur d'affaire.



Compétences

INFORMATIQUE

Programmation :

- C, Java, Ada, Python, PHP, Bash Assembleur ARM, HTML, CSS, JavaScript, SQL, Angular

Systèmes communicants :

- Interconnexion de réseaux, réseaux mobiles, antennes, protocoles des différentes couches OSI

Système d'exploitation :

- Linux, Windows, MacOS

Autres :

- GIT, Pack Office, Wordpress

BUSINESS

- Gestion de projets, Stratégie, Business Development, Gestion de rentabilité, Négociations commerciales

HUMAINES

- Leadership, Sérieux, Responsabilités, Empathie, Ambitieux



Communication

Anglais : TOEIC : 890/990



Hobbies

Sport, Cuisine, Voyage

Contact

Permis B | +33 6 52 72 38 13

alajroud@insa-toulouse.fr



<https://www.linkedin.com/in/alexandre-al-ajroudi-1706651a6/>



Formation

2017 - 2022

INSA Toulouse

Ingénieur en génie Informatique et Réseaux

2021 - 2022

Toulouse Business School

Master of Science Entrepreneuriat et Business Development

Stratégie et organisation internationale, Stratégie de développement et opportunités d'affaires, Mise en place de l'offre et de la démarche commerciale, Environnement juridique et financier de l'entreprise, Enjeux et tendances en entrepreneuriat et en innovation



2020 - 2022

Certifications

Programme Ingénieur & Leader – Fondation INSA Toulouse

Programme sélectif à l'INSA Toulouse visant à travailler la posture managériale et gagner en leadership.

Cisco Certified Network Associate Routing & Switching – Cisco Academy

Modules 1, 2, 3 et 4



2021 - actuellement

Expérience

AEQES – Expert Elève Ingénieur

Réalisation d'audits : évaluation de la qualité de l'enseignement supérieur
Rédaction de rapports d'évaluation



2021 - actuellement

Mon Panier Etudiant – Président

Création d'une association visant à développer le circuit court dans une démarche de développement durable.

Développement du site internet www.mon-panier-etudiant.fr,

Sourcing des producteurs partenaires, Recrutement, Business Plan, Comptabilité, Management, Stratégie



06/2021 - 09/2021

Dynergie – Stage Consultant Financement de l'Innovation

Participation aux audits : évaluation de l'éligibilité technique des projets de R&D et d'Innovation au Crédit Impôt Recherche ; Réalisation du chiffrage et rédaction d'états du marché et états de l'art, relation client : interface avec les équipes techniques, responsables R&D



2021

Amazon Campus Challenge – en équipe avec 3 étudiants de l'EDHEC

Concours organisé par Amazon et destiné à des étudiants de Master. Accompagnement d'une entreprise française dans son virage digital : Prospection, Analyse de marché, Planification budgétaire du développement d'un canal de vente sur Amazon, Création des pages produits, Gestion des campagnes sponsorisées, Analyse des résultats



2019 - 2021

Studcar – Co-Fondateur

Accompagnement par le catalyseur de l'UPS dans le projet « Studcar » visant à créer une application de covoiturage innovant entre étudiants.

Business Model Canvas, Etude de marché, Comptabilité, Droit des sociétés, Stratégie, Business Plan, Propriété Intellectuelle, Protection du projet, Pitch Participation au concours CRECE : Résultat : 7^{ème} ex-aequo sur 28 équipes



ELIOTT DOUTRIAUX

ETUDIANT

24B rue Saint Anne, 31000,

Toulouse.

+33 6 34 56 16 07

elliott.doutriaux@hotmail.com

[Profil LinkedIn](#)

COMPETENCES

Code

C, Matlab, Python, C++, Linux, VHDL, HTML, LaTeX

Avancé

Logiciels

Git, Docker, Kicad, Eagle, LTSpice, Xilinx

Bon

Analyse de Projet

Google Scholar, Business Plans, Esprit de synthèse

Bon

Office 365

Word, Excel, PowerPoint

Maitrisé

LANGUES

Français – Langue maternelle

Anglais – Compétence professionnelle (TOEIC 950)

Espagnol – Intermédiaire

Chinois – Notions

Recherche de stage de fin d'études (6 mois) à partir d'avril 2022 en fonds d'investissement.

Étudiant en double diplôme Systèmes Embarqués (Ingénieur) et Entrepreneuriat (Commerce), je souhaite m'orienter vers le domaine du financement d'entreprise. Je suis à l'écoute, persévérant, et toujours prêt à mener à bien un challenge.

FORMATION

2021 – 2022 TBS – Master Of Science

- MSc Entrepreneuriat et Business Development

2019 – 2022 INSA Toulouse – Diplôme d'Ingénieur

- Spécialité Systèmes Embarqués
- Certificat Big Data

2017 – 2019 IUT De Ville D'Avray – DUT en génie Électrique & Informatique Industrielle

Spécialité Hyperfréquences

Juin 2016 BACCALAUREAT SCIENTIFIQUE

EXPERIENCES PROFESSIONNELLES

Jun 2021
3 mois

Consultant en financement de l'innovation – STAGE CHEZ LEYTON FRANCE

- Audit avec les responsables R&D des entreprises clientes
- Rédaction de dossiers techniques (État de l'art, résumé des travaux, ressources mises à disposition, etc.)

2020
1 an

Chef de Projet – JUNIOR INSA SERVICES

- Gestion et organisation d'un projet de création de site Internet pour un cabinet d'avocats.
- Réalisation du cahier des charges. Recherche et recrutement de deux consultants programmeurs.

Mai 2019
3 mois

Électronicien & Programmeur – STAGE CHEZ CARMOOV ENERGY

- Conception et réalisation d'un prototype de batterie connectée en autonomie.
- Fabrication et programmation d'une carte électronique permettant de « connecter » tout type de batterie 12V.

PROJETS...

...Scolaires

- RCVA – Coupe de France de robotique. **5ème position.**
- **Bateau autonome** – Programmation sur STM32 et asservissement.
- Détection d'anomalies – Algorithme de machine Learning codé sous Python pour détecter les infractions dans une pompe à eau industrielle.

...Entrepreneuriiaux

- Concours CRECE entrepreneurial 2021 – Finaliste : Prix de 1000€.
- Statut étudiant entrepreneur
- **Mr.Pap** – Projet entrepreneurial de création d'une marque de noeuds papillons (Création, fabrication, distribution)
- Startupp Weekend sur le thème du sport à Polytechnique

CENTRES D'INTERETS

Musique : DJ occasionnel (job d'été), Producteur (Musique assistée par ordinateur), Gérant d'une chaîne de musique (GDLS LAB).

Sports de glisse : Kitesurf, Surf, Snowboard, Skateboard.

Voyages : USA (San Diego), Irlande (Dublin), UK (Londres), Chine, Thaïlande.



Rami Karaoud

5th year engineering student in Computer Sciences

- ▶ School : INSA Toulouse
- ▶ Major : Innovation and Smart Systems

Main skills

- ▶ Languages : Java, C/C++, Python, VHDL, SQL/SPARQL, JavaScript, HTML/CSS, PHP, Prolog, OCaml, Assembly
- ▶ Libraries : scikit, STM32

Languages

- ▶ English (Proficient)
- ▶ French (Native)
- ▶ Arabic (Native)
- ▶ Italian (Intermediate)

Interests

- ▶ Economics
- ▶ Hiking
- ▶ Cinema

Contact

- ✉ karaoudrami@gmail.com
- ☎ +33767527127

Work experience

Internship

06/2021 - 09/2021

Python developpement - Data Analysis
La Loop (Aix-Marseille)

La loop Aix-Marseille is a startup that aims to create a public transit system in the Aix-Marseille urban area based on on-demand driver-less busses protected from traffic. As a Python developer, my internship goal was to analyse real day-to-day mobility data in the urban area to produce enhanced data that can be used to predict demand-side dynamics in a public transit system

Internship

04/2012 - 05/2012

IT Assistant
Arc-en-ciel NGO - (Beirut, Lebanon)

Volunteer IT support in an organization of over 800 people.
Network administration and repair of defective hardware

Education

Engineering in Computer Sciences and networks

09/2019 - 06/2022

Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse (INSA)

Main studied subjects : Analysis, Statistics, Algebra, Graph Theory, Object Oriented Programming, Functional Programming, Logical Programming, Networks, IoT, some management, some social sciences

Preparatory classes in Physics and Engineering Sciences

09/2017 - 06/2019

Lycée Raoul Follereau (Belfort)

Main studied subjects : Maths, Chemistry, Physics, Engineering Sciences, Computer Sciences

Bachelor program in Computer Sciences

09/2015 - 06/2017

École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)

Main studied subjects : Analysis, Statistics, Algebra, Graph Theory, Object Oriented Programming