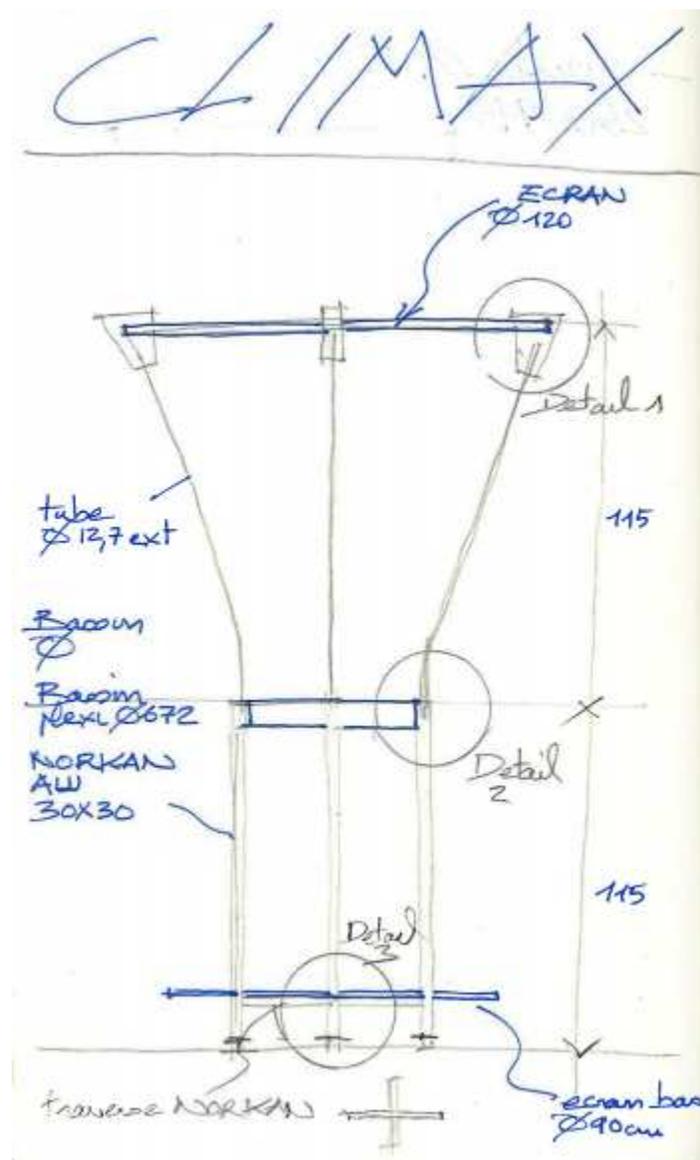


# Rapport de PSC MEC27: Projet Climax

Chloé Morel, Camille Mosser, Luiz Bezerra Pinheiro, Claire Dalmazzone

23 avril 2019



*schéma de la structure finale de l'oeuvre*



# 1 Remerciements

Nous adressons ici nos remerciements aux personnes qui nous ont aidé dans la réalisation de ce projet.

Tout d'abord, nous remercions M. Jean-Marc Chomaz, coordinateur de notre PSC, professeur du laboratoire d'hydrodynamique et qui en tant que membre fondateur de la chaire Art et Sciences de l'école nous a proposé ce sujet. Il nous a fait confiance et nous a aiguillé tout au long du projet.

Nous remercions particulièrement notre tuteur, M. Laurent Karst, architecte designer et collègue de M. Chomaz au labofactory. Il nous a apporté de précieux conseils artistiques, de design et a participé activement au montage du prototype.

Nous remercions aussi M. Didier Bouchon qui a fourni une aide indispensable pour la programmation du prototype.

Nous tenons aussi à remercier M. Nicolas Da Silva, thésard au laboratoire de météorologie dynamique, pour nous avoir fourni les données pluviométriques sur lesquelles se basent notre projet.

Enfin, nous remercions les membres du service de financement des PSC de l'école pour avoir validé le financement d'une partie du matériel du prototype.

# Contents

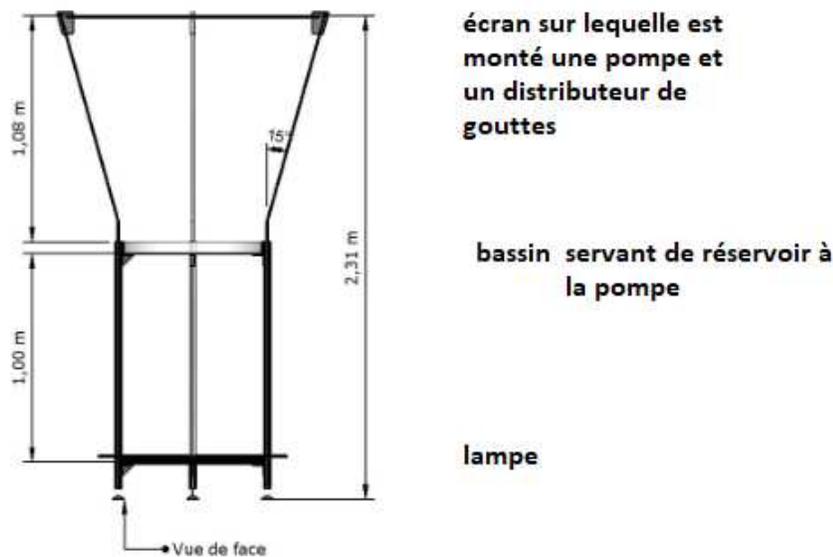
<b>1</b>	<b>Remerciements</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Présentation du projet climax</b>	<b>5</b>
2.1	L'oeuvre en soit . . . . .	5
2.2	Quel sens donner à l'oeuvre? . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Organisation du travail de groupe</b>	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>Contextualisation du projet Climax</b>	<b>9</b>
4.1	Thermodynamique de la formation des nuages . . . . .	9
4.2	Dynamique de la précipitation des nuages . . . . .	10
4.3	Rôle de la pluie en climatologie . . . . .	12
4.4	Contextualisation artistique . . . . .	15
<b>5</b>	<b>À propos des données pluviométriques utilisées</b>	<b>17</b>
5.1	Le modèle climatique LMDZ . . . . .	17
5.2	Le changement climatique en Méditerranée . . . . .	18
<b>6</b>	<b>Étude de la chute de gouttes dans le prototype</b>	<b>20</b>
6.1	Phénomène de mouillage dans le distributeur de gouttes . . . . .	20
6.2	Impact de la goutte . . . . .	21
6.3	Onde mécanique à la surface de l'eau et jeu de lumière . . . . .	23
<b>7</b>	<b>Construction d'un scénario</b>	<b>24</b>
7.1	Durée d'un scénario . . . . .	24
7.2	Quelles données sélectionner? . . . . .	25
7.3	Fréquence maximale de chute de gouttes . . . . .	25
7.4	Traitement des données pluviométriques . . . . .	26
<b>8</b>	<b>Du scénario à l'oeuvre</b>	<b>28</b>
8.1	Commande du prototype . . . . .	28
8.2	Montage du prototype . . . . .	29
<b>9</b>	<b>Conclusion</b>	<b>31</b>

## 2 Présentation du projet climax

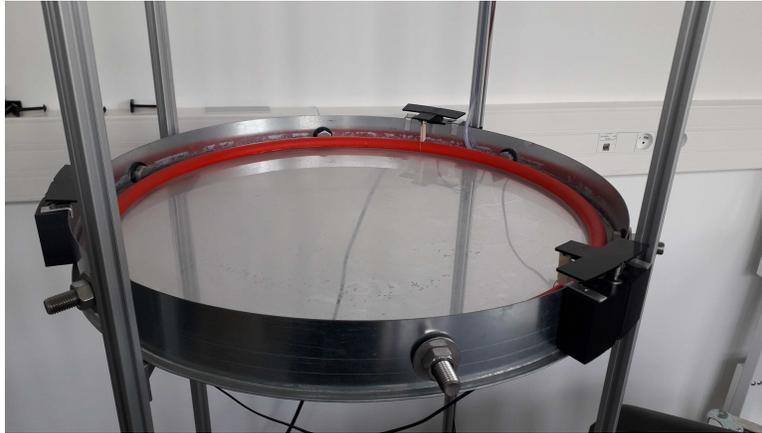
Le projet Climax a été lancé par la Chaire Art et sciences du Ladhyx, laboratoire de l'Ecole Polytechnique, en collaboration avec le *labofactory*, association qui promouvoit la collaboration entre les artistes et les chercheurs. Ce projet est plus particulièrement porté par notre coordinateur M. Jean Marc Chomaz, professeur à l'Ecole Polytechnique et M. Laurent Karst, architecte designer. Comme tout projet Art et sciences, Climax a pour but d'utiliser la démarche et les outils scientifiques non pas pour démontrer ou expliquer mais pour montrer et mettre à disposition du public. L'objet étudié ici est la pluie; dans l'oeuvre elle est matérialisée par une succession de chutes de gouttes d'eau dans un bassin. Le scénario que compose la variation de fréquence de ces chutes fait références à des données pluviométriques relevées ou simulées.

### 2.1 L'oeuvre en soit

L'oeuvre est une structure sur trois pieds de plus de 2m de haut qui soutient de haut en bas une lampe, un bassin de récupération de l'eau et un écran au milieu duquel passe un distributeur de gouttes (un embout de tuyeau plastique). La pompe, un moteur située au dessus de l'écran, se sert directement dans le bassin d'eau et est commandé par ordinateur. Il est possible de commander la fréquence à laquelle tombe les gouttes, le volume des gouttes et l'allumage de la lampe. Un cerceau est également placé dans le bassin et flotte sur l'eau; au dessus de ce cerceau se trouve trois tasseaux qui peuvent appuyer sur le cerceau via la commande d'électroaimants reliés aux tasseaux.



*Schéma de la structure de l'oeuvre*



*photo du bassin d'eau avec en rouge, le cerceau et en noir, les électroaimants*

Le bassin ne sert pas seulement de réservoir pour la pompe, il permet aussi d'observer un phénomène fascinant et hypnotique: le choc d'une goutte d'eau sur une surface d'eau provoque la propagation d'une onde à la surface. En éclairant le phénomène par en dessous (le bassin étant transparent) on peut observer ce phénomène sur l'écran du dessus. Lorsque l'on active les électroaimants pour choquer le cerceau, cela provoque aussi la propagation d'une onde à la surface mais en sens inverse.

## **2.2 Quel sens donner à l'oeuvre?**

La première question à se poser est *Pourquoi une oeuvre sur la pluie?* La pluie, est un phénomène de la vie courante parfois banalisé mais qui a pourtant une importance cruciale dans beaucoup de domaines comme nous le verrons dans la contextualisation scientifique et artistique de l'oeuvre. Dans la vie de tous les jours, la pluie permet d'irriguer les terres en relarguant le surplus d'eau de l'atmosphère: cela permet notamment d'assurer la pérennité des sources d'eau sur terre indispensables à la vie. En art, le symbole de la pluie est souvent utilisé pour retranscrire des émotions. En science, la pluie ou plus précisément les précipitations, est une grandeur mesurable qui joue aussi le rôle d'indicateur climatique. De plus, nous verrons aussi que l'évolution des précipitations mondiales est en train d'être fortement impactée par le changement climatique.

Ainsi, le projet climax a pour but de remettre à l'honneur cet objet crucial qui peut paraître banal dans un contexte où la goutte d'eau devient fascinante. En effet, cette simple succession de gouttes éveille les sens du spectateur: l'impact de la goutte sur la surface d'eau et la propagation de l'onde matérielle nous rappelle le caractère tangible de la pluie, et à cela s'ajoute le bruit de l'impact et les jeux de lumières sur l'écran.

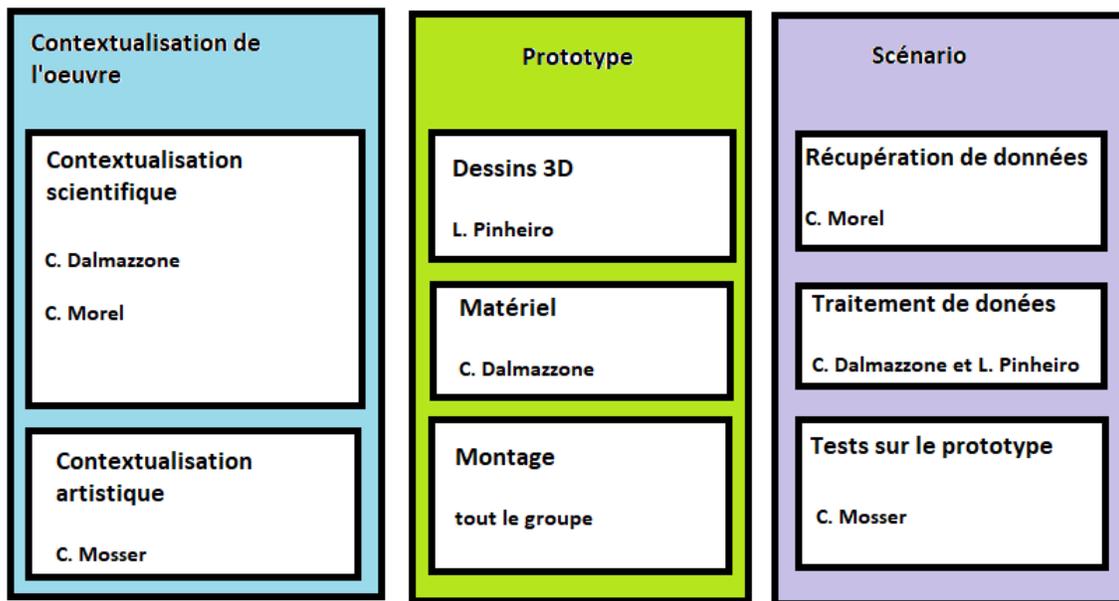
Le but plus scientifique de l'oeuvre est aussi de permettre au spectateur de visualiser, à une échelle temporelle raisonnable (la durée d'une représentation est d'environ 15 minutes), les forts changements qui sont en train de se mettre en place

dans les précipitations. Pour cela, nous avons collecté des relevés et des prévisions pluviométriques pour notre siècle d'une région pour laquelle les modèles climatiques prévoient une modification dans les schémas habituels de précipitation; nous avons choisit le pourtour méditerranéen du côté français. Après analyse des données, nous les avons traitées pour construire un scénario (une succession de chute de gouttes dans l'oeuvre) fidèle à cette évolution.

Loin de vouloir moraliser les spectateurs, l'oeuvre vise donc à utiliser les données pluviométriques et les modèles climatiques et à les transmettre sous une forme fidèle mais artistique.

### 3 Organisation du travail de groupe

Dès les premières semaines, nous avons identifié trois principaux axes de travail: le montage du prototype, l'élaboration d'un scénario et la contextualisation de notre projet. Nous nous sommes donc petit à petit réparti le travail pour que chaque membre du groupe touche à un maximum de ces trois axes et pour respecter les envies et les compétences de chacun. Par exemple, Luiz qui connaissait déjà des logiciels de dessins 3D s'est naturellement chargé de faire les dessins du prototype.



*Organigramme de la répartition du travail*

Toutefois, nous avons voulu que ces boites restent très perméables et chaque décision prise au sein d'une tâche était d'abord mis à débat entre tout le groupe mais aussi le tuteur et parfois le coordinateur. Par exemple, la forme du prototype a été sujet à plusieurs débats et a évolué plusieurs fois au cours du projet. D'autres rôles ont pu être attribués pour faciliter le travail comme le poste de responsable de communication.

## 4 Contextualisation du projet Climax

### 4.1 Thermodynamique de la formation des nuages

Pour comprendre pourquoi il est intéressant en art et sciences de proposer des œuvres autour de la pluie, il nous a fallu nous renseigner sur les différents phénomènes physiques entrant en jeu dans les précipitations. Nous avons donc commencé par la formation des nuages. D'après la définition disponible sur le site de météo France: " Un nuage est formé d'une multitude de gouttelettes d'eau ou de cristaux de glace en suspension dans l'atmosphère. [...] À l'intérieur d'un nuage, les particules sont sans cesse en mouvement. Elles fusionnent, fondent, s'évaporent, se subliment pour mieux condenser ou geler à nouveau." [5] Un nuage c'est donc des gouttes d'eau liquides (voire solides) en suspension dans un gaz (l'air) où la pression de vapeur saturante de l'eau est atteinte (saturation en vapeur d'eau):  $x_{vap}P = P_{sat}(T)$  où  $x_{vap}$  la fraction molaire de la vapeur d'eau dans la masse d'air,  $P$  est la pression de cette masse d'air et  $P_{sat}(T)$  est la pression de vapeur saturante de l'eau qui dépend de la température. Dans une masse d'air sèche où le volume d'eau liquide  $V_L$  est donc nul et donc inférieur au volume de vapeur d'eau  $V_v$ , d'après la formule de Clapeyron  $\frac{dP}{dT} = \frac{l_{L-V}}{T(V_v - V_L)}$ , et comme la chaleur latente de vaporisation  $l_{L-V}$  est positive (l'entropie d'un gaz est supérieur à celle du liquide correspondant), la pression de vapeur saturante augmente avec la température. Le refroidissement de la masse d'air entraîne donc une saturation en vapeur d'eau et une liquéfaction de celle-ci en partie pour rétablir l'équilibre. En pratique, le refroidissement d'une masse d'air se fait lorsqu'elle s'élève dans l'atmosphère.

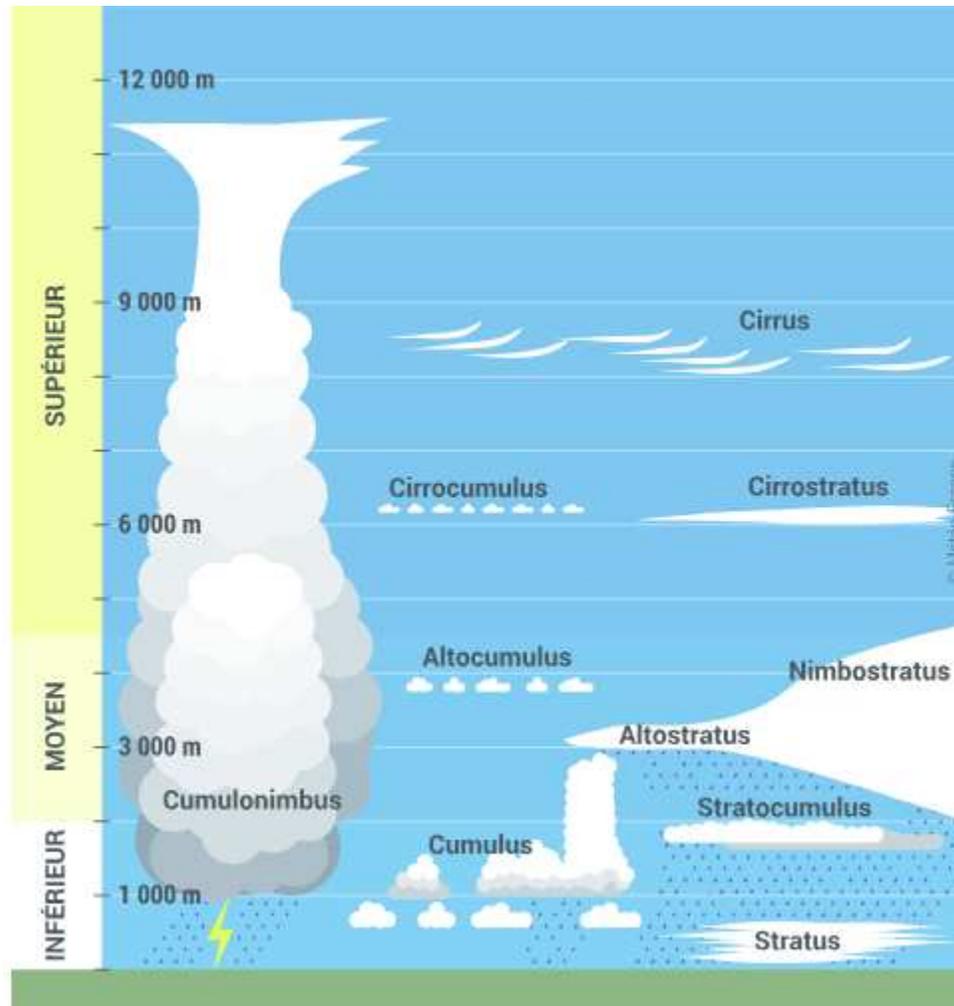
Mais en temps normal des phénomènes de sursaturation font que l'eau ne va pas se condenser aussi facilement et que on pourra avoir  $P_{vap} \geq P_{sat}$ . Ceci s'explique par la forte énergie que représente une goutte d'eau. Prenons une goutte d'eau sphérique de rayon  $R$ . A l'intérieur, les molécules s'attirent selon des forces intermoléculaires de Van Der Waals et le caractère isotrope de la goutte fait que ces forces se compensent. Mais ce n'est pas le cas à la surface de la goutte. Ceci engendre une tension de la surface de la goutte appelée tension superficielle; elle se caractérise par une différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur de la goutte qui s'exprime selon la loi de Laplace :

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{R}$$

où  $\gamma$  est la tension superficielle de l'eau. Ainsi dans une masse d'air saturée en vapeur d'eau, il n'y a pas forcément un intérêt énergétique à ce que l'eau se condense. En revanche, ajouter une impureté dans la goutte d'eau (comme une poussière par exemple) casse l'isotropie et diminue ainsi l'énergie de la goutte. C'est pourquoi dans les nuages, l'eau ne se condense pas seule mais autour de noyaux de condensation : des particules solides qu'on appelle aussi aérosols car elles sont en suspension dans l'air. Olivier Boucher explique dans son livre in-

titulé Les aérosols atmosphériques [2] que ceux-ci peuvent avoir une origine naturelle (des particules solides venant de la terre ou de l’océan sont emportées dans l’atmosphère par les vents) ou une origine anthropique (rejet de particules par l’homme lors de combustion fossile pour la majorité des cas).

En pratique on distingue 10 types de nuages (stratus, stratocumulus, l’altocumulus, l’altostratus, le cirrus, le cirrocumulus, cirrostratus, le nimbostratus le cumulus et le cumulonimbus) selon leur taille et leur altitude, mais en théorie on peut classer les nuages comme les êtres vivants en espèces et en variétés.



*Classification des dix genres de nuages sur une coupe verticale de la troposphère  
© Météo-France*

## 4.2 Dynamique de la précipitation des nuages

Seuls les nuages de relativement basse altitude (moins de 4000m) peuvent précipiter. Si ceux-ci ont une température négative, leur précipitation donnera lieu à de la

neige ou de la grêle. La pluie est issue de précipitation de nuage à température positive. Dans les deux cas, un nuage précipite lorsque que les particules (gouttelettes ou cristaux) atteignent une taille suffisante pour que la force de gravité l'emporte sur les forces d'agitation de l'atmosphère qui les maintenaient jusqu'alors en suspension. Il reste à comprendre comment ces particules grossissent.

Dans le cas des particules liquides, le grossissement peut s'expliquer par deux phénomènes. Le premier est l'effet de courbure. Comme nous l'avons déjà vu, la loi de Laplace  $\Delta P = \frac{2\gamma}{R}$  montre que à proximité d'une goutte d'eau, la pression de vapeur saturante diminue quand le rayon augmente. Ceci explique que la vapeur d'eau va se condenser sur les gouttes de plus gros rayons voire les plus petites gouttes auront tendance à s'évaporer pour se recondenser autour des plus grosses: dans les deux cas le rayon moyen des gouttes d'eau augmente jusqu'à atteindre plusieurs centaines de micromètres. Ce phénomène seul peut être à l'origine de bruine.

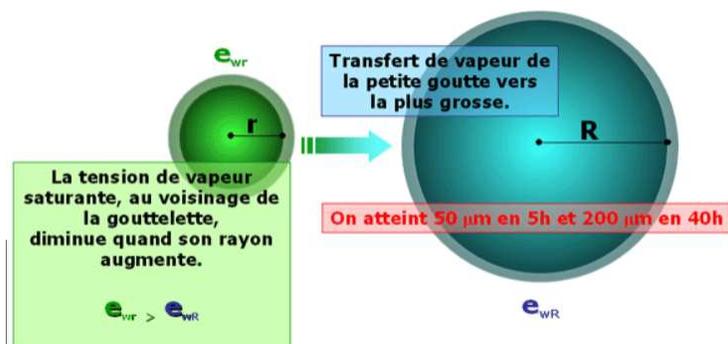


Schéma représentant l'effet de courbure © Météo-France

Le deuxième phénomène s'appelle la collection : une goutte chutant dans un nuage capte les plus petites gouttes qu'elle choque. Ces deux phénomènes se combinent jusqu'à une certaine taille de goutte (400 micromètre de rayon); au-delà seule la collection opère jusqu'à former des gouttes assez grosses pour être précipitées.

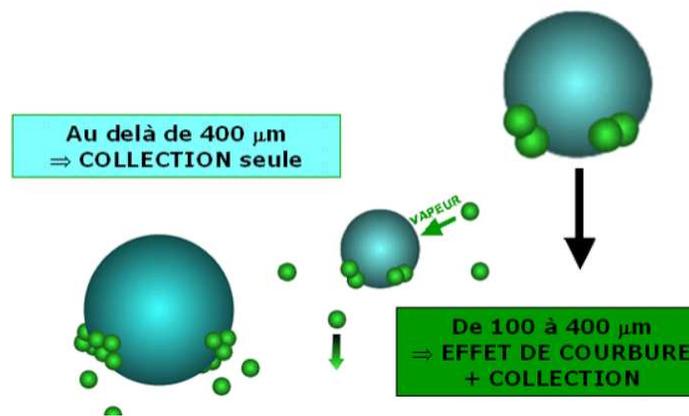
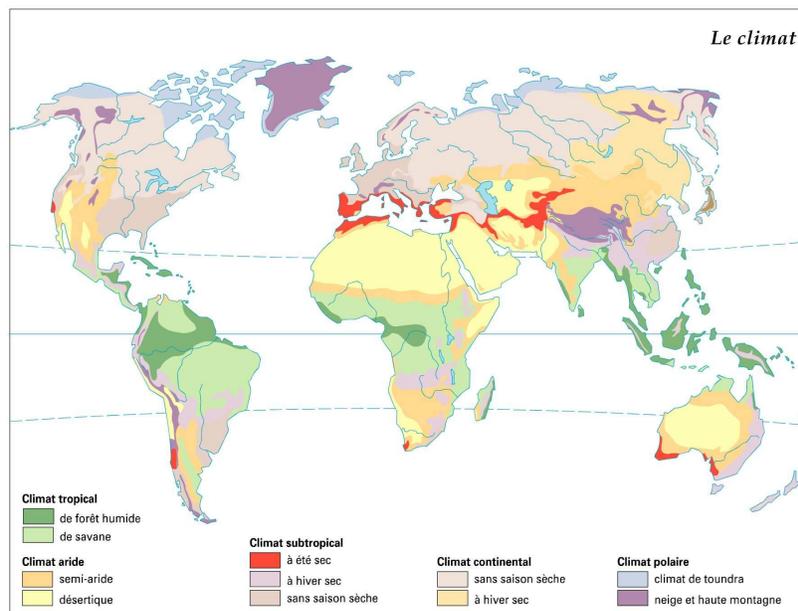


Schéma représentant la collection © Météo-France

### 4.3 Rôle de la pluie en climatologie

La pluie a un rôle déterminant dans la définition des climats dans le monde. Par exemple, selon l'encyclopédie Larousse, un climat méditerranéen est caractérisé par des étés secs alors que le climat océanique est très pluvieux. De même, dans un climat équatorial les pluies sont abondantes toute l'année alors que le climat tropical est caractérisé par des pluies irrégulières. Aujourd'hui nous avons une carte des climats qui associe à chaque région du monde un climat [4]. Mais, avec le changement climatique ces cartes sont vouées à évoluer. Ainsi, on peut se demander comment va évoluer les pluies avec le réchauffement climatique voire si la pluie pourrait être un bon indicateur du changement climatique.



Carte des climats mondiaux © Larousse

Par exemple, le phénomène des pluies acides qui s'est accrue fin 19ème siècle nous a alertés sur la présence des aérosols dans l'atmosphère et sur leurs conséquences. Un article du magazine scientifique *La Recherche* intitulé Le double jeu des aérosols [1] explique qu'en ce qui concerne les pluies acides, ce sont les rejets de dioxyde de soufre gazeux qui forment en se solidifiant des petites particules en suspension (des aérosols) qui font de très bons noyaux de condensation. L'étude de ces aérosols a permis entre autre de découvrir que le réchauffement de l'atmosphère a pendant longtemps été ralenti par la présence d'aérosols qui refroidissent l'atmosphère d'une part en formant des noyaux de condensation et d'autre part en réfléchissant la lumière du soleil.

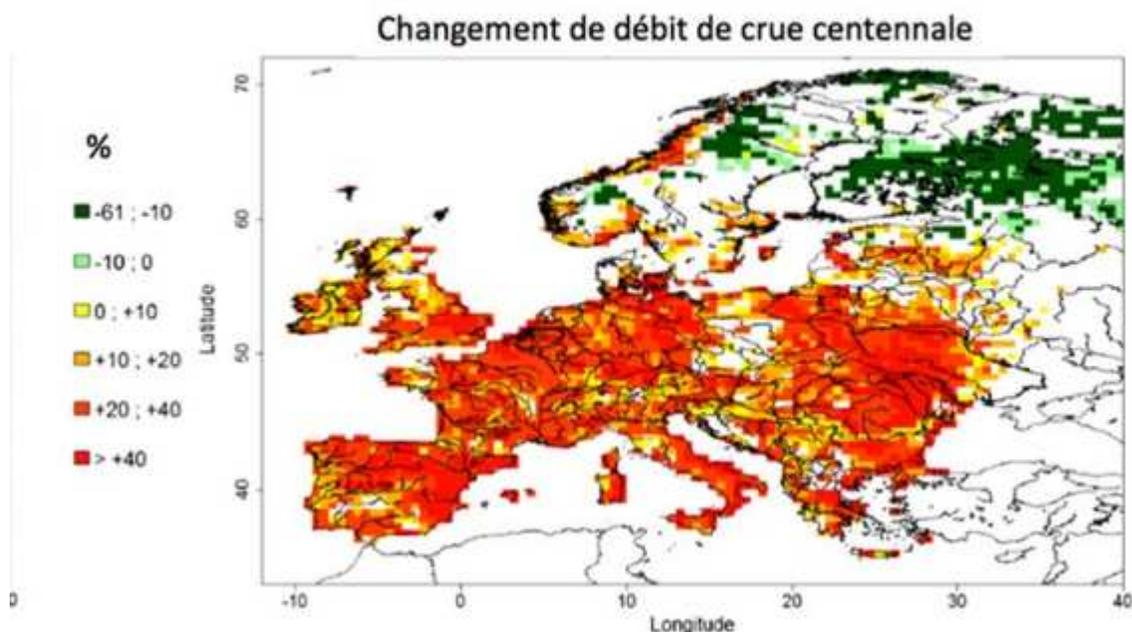
D'après un rapport du centre national de recherches météorologiques de Toulouse intitulé *Impact du réchauffement climatique sur le cycle hydrologique* [7], l'effet du réchauffement climatique sur les précipitations est encore une fois double. D'une

part le réchauffement de l'atmosphère a tendance à limiter la formation des nuages donc à limiter les précipitations. D'autre part, le réchauffement de la surface a tendance à créer des masses d'air en surface plus chaudes que l'atmosphère et vouées à s'élever en formant des nuages. Les différents modèles tendent à montrer que les précipitations augmenteront mais relativement peu à l'échelle planétaire. De plus, ces modèles montrent aussi que le réchauffement climatique va accentuer les disparités régionales de précipitations : les régions pluvieuses le seront encore plus et les régions sèches s'assècheront. Cette tendance est aussi à nuancer en fonction des saisons ; par exemple en Europe, le nord devrait voir plus de précipitations en hiver mais les étés devraient être plus secs.

D'autre part, il existe aussi un lien entre le changement climatique et les précipitations record que l'on observe de plus en plus souvent ces dernières années. Les scientifiques se sont intéressés au lien entre intensité et ou fréquence de ces événements extrêmes et réchauffement climatique. En 2013, le 5ème rapport du Groupe I du GIEC rendait publique une série de conclusions. Tout d'abord, la fréquence ou l'intensité des épisodes de fortes précipitations a possiblement augmenté (particulièrement en Amérique du Nord et en Europe). Et il est probable que les influences anthropiques affectent le cycle mondial de l'eau depuis 1960 et notamment l'intensification des épisodes de fortes précipitations ( surtout sur les régions continentales ). De plus les épisodes de précipitations extrêmes deviendront très probablement plus intenses et fréquents sur les continents des moyennes latitudes et dans les régions tropicales humides d'ici la fin de ce siècle, en lien avec l'augmentation de la température moyenne en surface.

En 2015 des chercheuses suisses ont postulé qu'avec 0,85 C de réchauffement par rapport au XIXe siècle, ce réchauffement a déjà affecté 18 % des événements de précipitations intenses sur les continents (et 75 % des vagues de chaleur). Pour 2 C de réchauffement, cette proportion passerait à 40 % des événements de précipitations intenses. L'impact du réchauffement climatique sur ces événements extrêmes n'est pas linéaire et il affecte bien davantage les événements les plus intenses que les moyennes. Pour ce qui est de la France, plusieurs études se sont intéressées aux records de précipitations. Une première analyse pilotée par Robert Vautard a porté sur les records de pluies dans les Cévennes. Elle montre une nette augmentation des records d'automne dans cette région, depuis les années 1950 (+4 % par décennie) et une forte relation avec le réchauffement local. Une étude de Philippe Drobinski montre que l'augmentation de l'intensité des précipitations extrêmes de tout le pourtour méditerranéen devrait suivre la relation de Clausius-Clapeyron (soit 7 % de plus par degré de réchauffement local), avec un rôle tout particulier du réchauffement de surface de la mer Méditerranée. Une autre étude, portant sur les précipitations les plus intenses dans le sud de la France et pilotée par Juliette Blanchet, conclut à une tendance à l'augmentation sur la moitié de la région étudiée, en particulier sur les reliefs (Cévennes-Vivarais et Alès) et dans la vallée du Rhône, tout en soulignant les limites liées à la durée et la densité des observations. Enfin, une étude sur les risques futurs relatifs

aux précipitations intenses et inondations, pilotée par Philippe Roudier, combine modélisation régionale du climat et modélisation hydrologique en Europe pour un scénario modeste de réchauffement global (+2 C). Elle conclut à une forte augmentation de l'intensité des crues décennales ou centennales (voir la figure ci-dessous). Le signal s'avère très robuste : il est commun aux 11 modèles de climat et 3 modèles hydrologiques étudiés.



---

*Simulation d'évolution du débit des crues centennales en Europe*

Les précipitations jouent donc un rôle central aussi bien dans la compréhension des phénomènes entrant en jeu dans le réchauffement climatique que dans les conséquences de celui-ci. La pluie est un objet tangible et sensoriel qui risque, à l'échelle de l'individu, d'évoluer fortement avec les changements climatiques. Le projet climax a entre autres pour but de donner une idée émotionnelle et sensorielle de ces changements plus que de les expliquer, en choisissant de représenter les précipitations de villes qui seront particulièrement touchées par les évolutions climatiques.

## 4.4 Contextualisation artistique

Avant toute chose, la pluie est constituée d'eau. La symbolique de l'eau est assez forte : élément essentiel à notre vie sur terre, elle a continuellement inspiré les artistes. Indispensable à la vie, l'eau est un symbole de fertilité et de fécondité.

L'aspect météorologique s'est intensifié après le 17ème siècle. En effet, à partir des œuvres de Montesquieu, les auteurs commencent à relier la pluie aux humeurs d'une société. Par opposition au soleil qui réchauffe, la pluie devient le symbole d'un moral dégradé, d'une tristesse qui tombe en filet sur le monde.

La pluie est de même un phénomène présent en littérature. Depuis les mythologies où elle représentait la colère des dieux avec l'orage et les éclairs, son rôle n'a cessé d'évoluer.

Déjà dans la Bible, la pluie prend une symbolique tout autre. La pluie, tombe sur le monde, comme la parole de dieu. Elle est celle qui libère, qui annonce, qui fait évoluer malgré une certaine violence comme dans le déluge.

Chez Proust, la pluie a une importance considérable. Dans La Recherche du temps perdu la pluie absorbe beaucoup de choses. Elle gonfle en symphonies, elle se charge, elle représente presque physiquement toutes les métaphores induites par sa symbolique. De même, le flux de la pluie peut représenter le temps qui passe. La goutte devient l'unité élémentaire du temps, tel le grain de sable, qui mesure le temps grâce au sablier.

La pluie est aussi une métaphore des sentiments: " Il pleure dans mon cœur/ Comme il pleut sur la ville" (Beaudelaire). Tant par sa forme que par sa dynamique, la pluie s'assimile facilement aux larmes, et emporte ainsi les émotions humaines telles que la tristesse, la joie ou la peur. Cette symbolique est approfondie au 20e siècle. Dans la poésie moderne de Francis Ponge, la pluie revêt une symbolique plus profonde: elle est une projection d'état d'âme.

Toute cette négativité fait que l'on oublie parfois l'aspect bénéfique de la pluie. Elle est aussi celle qui nous fait voyager, qui nous protège, qui nous repose. Thoreau, dans son livre Walden, fait ainsi de la pluie le moment parfait pour contempler le globe ; et enfin, ce n'est pas la moindre de ses vertus, la pluie n'est pas sans bénéfice politique : dès lors, au moins, que les chefs y font face comme ils feraient face à cette adversité qui nous touche tous démocratiquement. La pluie symbolise la démocratie dans son équité, mais aussi l'aspect aléatoire que réserve le monde.

De même, la pluie est un phénomène musical. Le bruit des gouttes qui tombent, de manière régulière (ou non), bercent ses spectateurs. Elle a donc naturellement été une source d'inspiration pour les musiciens de toutes les époques.

La première œuvre qui nous vient à l'esprit est les quatre saisons de Vivaldi. Dans l'hiver, la pluie coule à torrent, ou tombe en petites gouttes dans une forêt. Dans une seule et même oeuvre la pluie fait sentir des variations de rythme, de taille.

Chez Debussy, dans Jardin sous la pluie, la chute des gouttes d'eau est de

même représentée de manière cadencée, faussement régulière. La pluie tombe en cascade, accélère et rythme la vie du jardin. Elle agit comme un métronome, elle régule et rythme la vie.

Chez Schubert, la pluie est associée à la tristesse, aux larmes. Cette comparaison, naturellement dressée par la similarité géométrique d'une goutte et d'une larme, revêt la pluie d'une importance symbolique quant à la gestion des sentiments humains, elle laisse l'impression de se faire déborder par un déluge ou un torrent de larmes. On cherche alors à se mettre à l'abri, à se protéger de cette catastrophe: "Vois, la pluie qui vient ! / Je rentre à l'abri."

Etudions à présent tout l'aspect plastique de la pluie: son impact lors de son utilisation dans une œuvre d'art. Repartons de même sur la symbolique de l'eau. L'eau est un matériel protéiforme : on peut le travailler sous forme de brume, de glace ou plus simplement sous sa forme liquide. C'est de même un matériau assez malléable, transparente et fluide. Elle permet dans un modèle dynamique, d'exprimer, ou de refléter une situation (vagues, remous, pluie).

Passons désormais à l'utilisation de la pluie dans les arts plastiques. En 2015, une installation artistique géante a été créée aux Etats-Unis : une énorme salle où la pluie était mimée, sans pour autant mouiller les spectateurs. une pièce où règne une semi-obscureté, seulement percée d'un sobre jeu de lumière. Autour d'eux, résonne doucement le bruit d'une cascade tandis qu'au centre de l'espace, une simulation d'averse leur donne le sentiment d'évoluer sous une ondée en pleine période automnale. Dès que le public s'avance, des détecteurs captent la présence d'un individu : l'eau s'arrête alors immédiatement au-dessus du spectateur, mais continue de l'entourer. Cependant, il faut avancer lentement, précautionneusement, pour que l'installation puisse déceler nos mouvements. On a donc ici la pluie employée pour le mouvement, la détection, avec une œuvre qui interagit avec le spectateur. La pluie est un objet dynamique, naturel mais ici modifié, qui est réduite à un simple jeu de visualisation (la pièce étant entièrement plongée dans le noir). C'est un focus complet, comme un zoom, sur l'essence même de la pluie.

De même, l'aspect temporaire de la pluie est aussi parfois un atout plastique. Certains street-artists utilisent des matériaux hydrophobes pour créer des œuvres qui ne se relèvent qu'après passage de la pluie. On a donc un matériau qui apporte un aspect technique, mais aussi mystérieux au phénomène physique qu'est la pluie.

## 5 À propos des données pluviométriques utilisées

### 5.1 Le modèle climatique LMDZ

Les données pluviométriques récupérées auprès du LMD (Laboratoire de Météorologie Dynamique) à Jussieu sont des prévisions générées par le modèle LMDz pour une petite région de  $50km^2$  dans le sud est de la France. Il s'agit d'un modèle de circulation générale du LMD (Laboratoire de Météorologie Dynamique). Ce modèle, aussi appelé LMDZ, est un modèle de circulation générale atmosphérique développé par le LMD depuis les années 1970. Le Z fait référence à la capacité de raffinement régionale, ou Zoom. C'est un code numérique en différences et volumes finis s'appuyant sur les équations de la physique et de la dynamique des fluides.

Il existe plusieurs versions du modèle, en fonction de la planète – de même cœur hydrodynamique que la Terre – étudié. La version terrestre est la composante atmosphérique du modèle intégré de climat de l'Institut Pierre Simon Laplace (IPSL). LMDZ calcule à la fois l'évolution des variables météorologiques et le transport de constituants (aérosols, composés chimiques, radioéléments, isotopes stables de l'eau). Ce dernier est utilisé aussi bien pour des questions de couplage entre composition et dynamique atmosphérique que de surveillance de l'environnement. LMDZ est un outil de recherche sur les phénomènes atmosphériques et climatiques et leur modélisation qui se veut rester relativement souple et dont la performance en termes de prévisions climatiques est très souvent interrogée.

Ce modèle est utilisé à la fois pour comprendre les variations passées du climat, notamment pour la reconstruction du climat des dernières décennies et aussi pour essayer d'anticiper ses variations futures. Les simulations réalisées sur la base de différents scénarios d'émission de gaz à effet de serre contribuent notamment à la préparation des différents rapports du Giec. Pour toutes ces études, LMDZ est couplé à d'autres modèles (un modèle de surface continentale (Orchidee), d'océan-glace (Nemo-Lim) ainsi qu'aux modèles de chimie-aérosol Inca et Reprobus). Cela implique de fortes contraintes sur le développement du modèle, aussi bien en termes de phasage et compatibilité des développements qu'en ce qui concerne la qualité du climat simulé. Similairement, ceci nécessite de prendre en compte de nombreux diagnostics dans les modèles, afin d'alimenter les études de plus en plus nombreuses qui utilisent ces simulations.

Dans le cadre de l'anticipation du changement climatique, on demande également aux modèles atmosphériques de fournir des résultats de simulations qui soient plus robustes, plus pertinents, et ce non seulement pour la température mais aussi pour des grandeurs plus critiques telles que la pluie, les événements rares ou extrêmes, etc. Cela nous est très utile pour nous assurer d'une certaine fiabilité des données que nous utilisons, en particulier puisque ce sont exactement ces données (pluies et événements rares) qui nous intéressent. Ce qui nous est d'autant plus utile c'est

la version zoomée du modèle qui a permis de se focaliser de manière précise et fiable sur une région de la France. En effet, une attention particulière est apportée au réalisme des données régionales et l'amélioration de la représentation de ces climats régionaux relève là aussi pour une bonne part de l'amélioration du contenu physique des modèles. Pour des études focalisées sur une région particulière, on dispose en effet de configurations zoomées du modèle, avec une grille raffinée sur une région particulière.

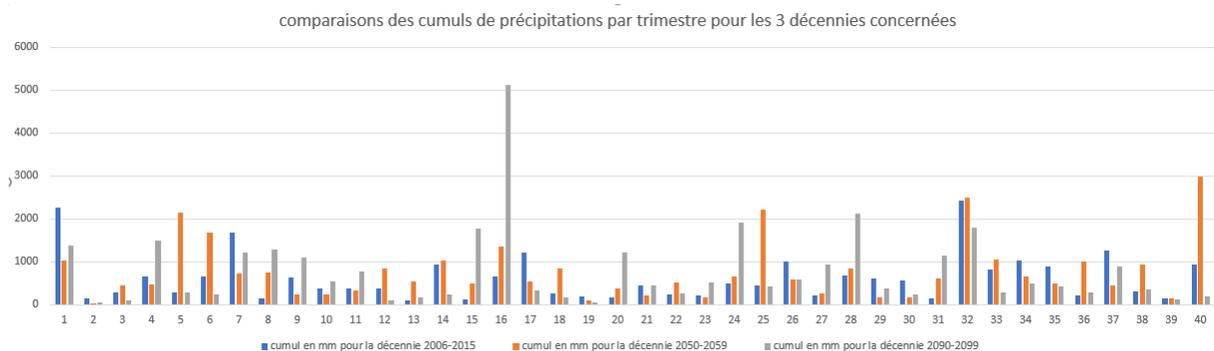
Le modèle permet aussi d'étudier les mécanismes en jeu lors des changements climatiques. On sait que la représentation des processus atmosphériques (e.g. convection, couche limite, nuages, etc) est essentielle dans la dispersion des simulations de changements climatiques (changements paléoclimatiques, changements de précipitations, sensibilité climatique, etc). Cependant, la question de l'identification des mécanismes climatiques qui sont responsables de cette dispersion et l'identification des processus est à améliorer en priorité dans le modèle pour accroître la fiabilité des projections futures reste ouverte.

Pour répondre à cette problématique, on peut suivre deux approches. Soit analyser les expériences de changement climatique au moyen d'une hiérarchie de modèles, soit – ce que font les chercheurs qui travaillent sur LMDZ – évaluer des simulations des variations lentes du climat (aux échelles décennales et plus) via des données intermédiaires générées par le code et mesurables en réalité : par exemple, la composition isotopique de l'eau. Pour cette deuxième approche, il faut disposer d'une calibration robuste du lien entre les isotopes de l'eau et les variables climatiques, ou alors modéliser directement la composition de l'eau. Ainsi, LMDZ a été doté récemment d'une représentation des isotopes de l'eau (oxygène 18, deutérium, et bientôt oxygène 17). Il est donc à présent possible de comparer ces simulations aux données isotopiques disponibles dans la précipitation, l'atmosphère, les fleuves, la canopée, les glaciers tropicaux ou les calottes polaires. Cela permet de tester la capacité du modèle à simuler des changements paléoclimatiques ou séculaires. Parallèlement, LMDZ aide à comprendre les données mesurés, et la dynamique des variations climatiques à toutes les échelles de temps.

## 5.2 Le changement climatique en Méditerranée

Les données pluviométriques récupérées auprès du LMD s'étalent de 2006 à 2099 et sont donc des prévisions générées par le code LMDz. Ces prévisions sont faites pour un point du sud est de la France proche de la côte méditerranéenne. Ces données prévoient une augmentation de la quantité moyenne de précipitations pour cette région en passant de  $612mm$  de précipitations en moyenne par trimestre pour la décennie 2006-2015 à  $769mm$  en moyenne par trimestre pour la décennie 2050-2059 puis à  $784mm$  en moyenne par trimestre pour la décennie 2090-2099. Cette augmentation de la quantité de précipitations moyenne par trimestre en  $mm$  s'accompagne d'une augmentation de l'écart-type qui est de  $549mm$  pour la première décennie,  $682mm$  pour la deuxième décennie et  $911mm$  pour la troisième

décennie où l'écart-type devient même supérieur à la moyenne.



*histogramme des cumuls de précipitations en mm par trimestre pour les trois décennies évoquées précédemment*

En analysant plus profondément les données, on se rend compte que ce n'est pas tant le nombre d'événement de fortes précipitations qui augmentent mais plus la violence de ces événements. Ainsi, si on compte pour chacune des trois décennies traitées précédemment le nombre de trimestres où le cumul de précipitation dépasse la moyenne d'au moins l'écart-type, on ne remarque pas de différences (on compte même exactement 5 trimestres de fortes précipitations pour chaque décennie). En revanche, pour la décennie 2006-2015, un tel trimestre de fortes précipitations est caractérisé par un cumul de pluie d'au moins  $1161mm$  alors que pour la décennie 2090-2099 il faut un cumul d'au moins  $1695mm$  de pluie soit une différence d'environ  $530mm$  à comparer à un trimestre de pluie moyen contemporain de  $612mm$ . Le modèle LMDz suggère donc une intensification des phénomènes de fortes précipitations.

D'après les climatologues, le bassin Méditerranéen est une région particulièrement touchée par le changement climatique notamment à cause de l'interaction entre la mer et les terres. Une augmentation de température de 2 à 4 degrés d'ici la fin du siècle [3]. En 2008, un rapport intitulé *Changement climatique et énergie en Méditerranée* [9] publié dans le cadre du plan bleu, centre d'activités régionale du Plan D'action pour la Méditerranée (PAM), résume les différents scénarios climatiques et pluviométriques futurs en Méditerranée. Ces scénarios prévoient en général une diminution futur des jours de précipitation dans le bassin Méditerranéen accompagnée d'une intensification des extrêmes. Cela est cohérent avec l'augmentation de l'écart-type dans les prévisions du LMDz. Toutefois, les scénarios régionaux sont très variables. Par exemple, pour la péninsule Ibérique c'est une augmentation des jours de pluie qui est prévue contrairement à la Grèce où la seule évolution attendue est une diminution des jours de pluie sans changement de quantité de pluie journalière. Les variabilités annuelles sont aussi intéressantes à regarder. Par exemple, en hiver, les jours de pluie devraient augmenter en Grèce ce qui indique une compensation avec des étés bien plus secs.

## 6 Étude de la chute de gouttes dans le prototype

Dans cette section, nous allons expliquer les phénomènes physiques entrant en jeu lors de la chute de gouttes d'eau dans le prototype. Dans l'ordre, nous verrons comment se forme la goutte d'eau et comment elle est éjectée par le distributeur, puis nous étudierons l'impact de cette goutte sur la surface d'eau dans le bassin et enfin nous verrons comment l'écran au dessus du bassin nous permet d'observer les ondes formées par cet impact qui se propagent à la surface de l'eau.

### 6.1 Phénomène de mouillage dans le distributeur de gouttes

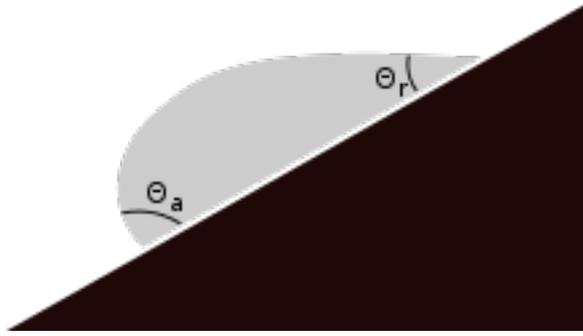
Dans le dispositif, une pompe permet de récupérer l'eau stockée dans le bassin à mi-hauteur pour l'acheminer en haut de l'écran où se trouve le distributeur de gouttes dont l'embout est cylindrique. La pompe donne alors une courte impulsion (de durée réglable) qui va forcer l'eau à passer à travers ce bec formant ainsi une goutte d'eau qui est éjectée. La durée de l'impulsion règle la quantité d'eau apportée pour fournir la goutte et donc la taille de la goutte.



*Photo de la pompe (le moteur) au dessus de l'écran blanc*

Au moment d'être éjectée, la goutte subit deux forces principales: le mouillage avec la surface solide du bec qui a tendance à accrocher la goutte et la pesanteur qui a tendance à la faire chuter. La goutte doit donc être assez grosse pour glisser le long de la surface solide par gravité et tombée dans le dispositif. On en déduit qu'il existe une durée minimal de l'impulsion à donner pour faire effectivement tomber une goutte.

Le phénomène de mouillage est à relier au phénomène de tension superficielle dont on a déjà parlé précédemment mais aussi au caractère hydrophobe ou hydrophyle du matériau du bec. Le mouillage entre l'eau et le bec permet de décrire la forme que va prendre la goutte d'eau en contact avec le bec et comment elle glisse le long du bec.



*exemple de phénomène de mouillage d'un liquide (en gris) sur un solide (en noir)*

Par exemple sur ce schéma, le solide est hydrophile (si le liquide est de l'eau) et s'oppose donc au glissement du l'eau.  $\theta_a$  est l'angle d'avancé entre la tangente au point de contact le plus bas de la goutte et la surface solide et  $\theta_r$  est l'angle de recul défini au niveau du point le plus haut de la goutte. Ces angles dépendent directement des forces de tensions superficielles selon la formule

$$\cos(\theta) = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}}$$

où  $\gamma$  désigne une tension interfaciale entre deux surfaces solide (S), liquide (L) ou gazeuse (V).

Comme nous l'avons fait remarquer, ce phénomène implique une taille minimale de la goutte pour que celle-ci puisse glisser dans le bec et plonger dans le bassin. Il y a donc une durée minimale que la pompe doit fournir pour former une goutte éjectable via le bec ce qui implique également une fréquence maximale de chute de gouttes dans le dispositif. Expérimentalement, nous avons trouver que cette fréquence maximale était de de 5 gouttes par secondes. Cette donnée nous sera utile pour l'élaboration de scénario de chute de gouttes.

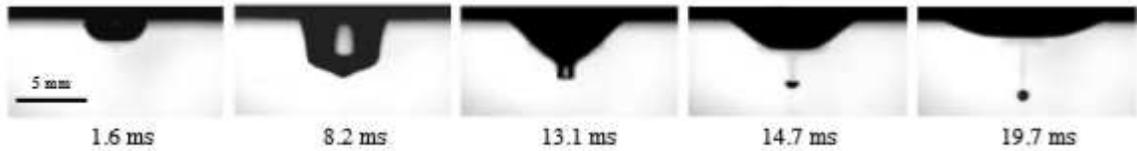
## 6.2 Impact de la goutte

Une fois que la goutte tombe dans le prototype, elle va entrer en contact avec la surface de l'eau dans le bassin. Cet impact perturbe la surface de l'eau et cette perturbation s'observe bien sur l'écran où une forme d'étoile apparait. Ce phénomène est aussi à l'origine du bruit de la pluie. Dans ce paragraphe nous analysons ce phénomène de manière qualitative.

Lorsqu'il pleut, les échelles mises en jeu ne sont pas les mêmes que dans le prototype: la vitesse des gouttes est moins élevée dans le prototype car elles tombent de moins haut, la hauteur d'eau du bassin est aussi à prendre en compte (elle est bien plus élevée que le film d'eau qui se forme sur le sol quand il pleut). Ainsi, l'étude faite ici ne s'applique que à notre prototype.

On considère donc une goutte d'eau, vu comme un fluide Newtonien, qui impacte une surface d'eau dont la hauteur  $l$  est grande devant le diamètre  $d$  de la

goutte. Cette goutte tombe depuis une hauteur  $H$  et impacte donc la surface avec une vitesse  $V_0 = \sqrt{2gH}$  où  $g$  est l'accélération de la pesanteur. En tombant dans le bassin d'eau la goutte va engendrer à la surface la formation d'un cratère que l'on approxime à une demie-sphère de diamètre  $D_c$ . Si la vitesse de la goutte est suffisante pour creuser le cratère et le faire s'effondrer sur lui-même en émettant un jet d'eau, on parle de *splash*. À la transition entre ces deux régimes, une bulle d'air arrive à se détacher du fond du cratère et c'est ce phénomène qui est à l'origine du bruit de l'impact [6].



*Impact d'une goutte d'huile dans de l'huile: formation de cratère puis détachement d'une bulle d'air*

Pour prédire dans quel régime on se trouve, on a recourt à deux nombres sans dimension: le nombre Froude

$$F_r = \frac{V_0^2}{gd}$$

et le nombre de Weber

$$W_e = \frac{\rho V_0^2 d}{\gamma}$$

où  $\rho$  est la masse volumique de l'eau et  $\gamma$  est la tension superficielle. Dans notre cas, avec  $H$  de l'ordre du mètre,  $V_0^2$  est de l'ordre de  $20m^2.s^{-2}$ , le nombre de Froude de la goutte est donc de l'ordre de 1000 en prenant  $2mm$  pour le diamètre de la goutte, et le nombre de Weber est de l'ordre de 600 pour une goutte d'eau à température ambiante dont la tension superficielle est de l'ordre de  $72mN.m^{-1}$ . On peut donc se placer dans un régime à fort nombre de Weber et fort nombre de Froude où le cratère formé lors de l'impact s'effondre en émettant un jet. D'où les formes particulières observées sur l'écran.

Comme le nombre de Weber est grand, on en déduit que l'énergie capillaire est négligeable devant l'énergie cinétique de la goutte. Autrement dit, on peut négliger la grandeur  $\gamma$  pour étudier le phénomène. Ainsi, en négligeant la perte d'énergie due à l'émission d'une onde à la surface de l'eau lors de l'impact, on peut égaliser l'énergie cinétique de la goutte d'eau  $\frac{2}{3}\rho\pi(\frac{d}{2})^3V_0^2$  et l'énergie de formation du cratère demi sphérique  $\frac{2}{3}\rho\pi(\frac{D_c}{2})^3g\frac{D_c}{2}$ . On obtient alors

$$d^3V_0^2 = \frac{1}{2}D_c^4g$$

On en déduit que modulo la perte d'énergie évoquée précédemment, le diamètre du cratère varie comme  $d * F_r^{\frac{1}{4}}$ . Ici le cratère est donc à peine plus grand que la goutte.

### 6.3 Onde mécanique à la surface de l'eau et jeu de lumière

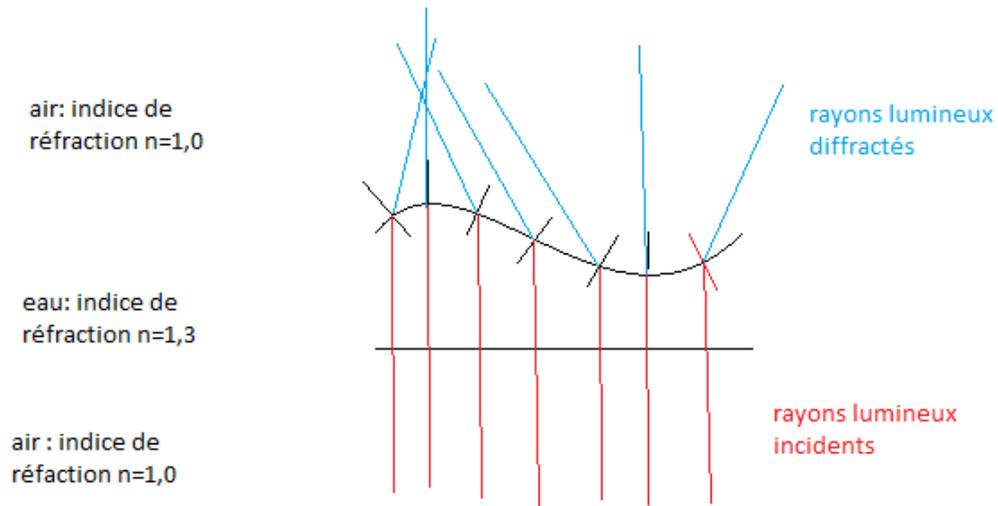
Comme nous l'avons vu précédemment, l'impact de la goutte d'eau sur la surface d'eau du bassin va engendrer la propagation d'une onde. Cette déformation transversale va se propager radialement en s'atténuant avec le temps de sorte que seulement quelque maxima de l'onde traverseront le bassin entier. En éclairant par le bas le bassin et en observant l'image obtenue sur un écran en haut du bassin, il est possible de visualiser cette onde. En effet, l'indice de réfraction de l'eau étant différent de celui de l'air ( $n_{eau} = 1,3$  et  $n_{air} = 1,0$ ), les rayons lumineux sont déviés en passant de la surface d'eau déformée à l'air. La loi de Snell Descartes

$$n_{eau} * \sin(i_{eau}) = n_{air} * \sin(i_{air})$$

nous permet de prévoir la déviation de ces rayons lumineux aux différents point de la surface d'eau déformée:

$$\sin(i_{air}) = \frac{n_{eau}}{n_{air}} * \sin(i_{eau}) \geq \sin(i_{eau})$$

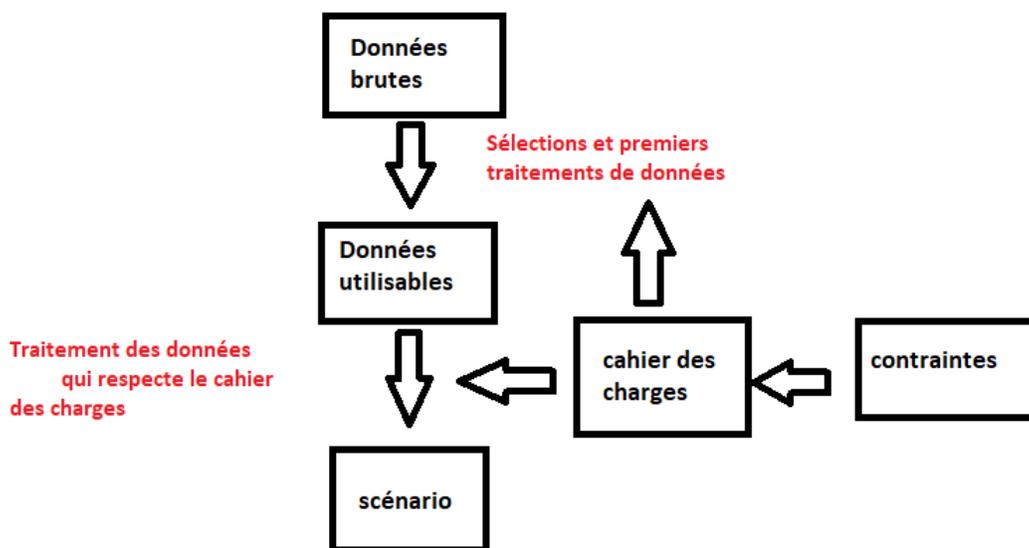
Un schéma qualitatif montre que nous observons bien sur l'écran l'image de la propagation d'onde: l'intensité lumineuse au niveau des maxima de l'onde est accentuée par rapport à celle des creux.



*schéma de la diffraction des rayons lumineux à la surface déformée de l'eau*

## 7 Construction d'un scénario

Nous appelons ici scénario, une succession de chute de gouttes dans le dispositif décrite par une suite de nombre de gouttes et de fréquence de chute. Par exemple, voici un exemple de scénario de 2 minutes: *60 gouttes à 1 goutte par seconde, 120 gouttes à 2 gouttes par seconde*. Avant de construire des scénarios à partir des données pluviométriques récoltées, il a fallu établir un cahier des charges établissant un certains nombres de contraintes pour maximiser aussi bien l'esthétisme de l'oeuvre que la fiabilité scientifique. Voici le schéma résumé que nous avons suivi pour élaborer le scénario.



*organigramme de la construction du scénario*

### 7.1 Durée d'un scénario

Tout d'abord, il nous a semblé important de réfléchir à la durée des scénarios. Un scénario devant rendre compte de l'évolution des précipitations d'une région dans le futur, il faut qu'il dure assez de temps pour le spectateur comprenne que l'on avance dans le temps au fur et à mesure du scénario. Toutefois, compte tenu de la durée d'attention de l'être humain, il serait dommage qu'un scénario dure trop longtemps et que le spectateur se lasse. Il faut donc choisir une durée raisonnable pour laquelle un spectateur peut rester devant l'oeuvre sans se lasser. D'après un article de l'Université de West Florida [8], les premiers signes d'ennui lors d'une tâche monotone se font sentir après 10 minutes. Aussi, dans le cadre du test *Mackworth clock*, qui consiste à observer un pointeur qui se déplace le long d'une horloge (tel la petite aiguille) et à signaler en appuyant sur un bouton

quand le pointeur fait deux bonds d'un coup (correspondant à deux secondes au lieu d'une), les erreurs augmentent de 10% à 15% après 30 minutes. Ici, il ne s'agit pas vraiment de retenir l'attention de quelqu'un qui réalise une tâche mais ces deux limites nous paraissent tout de même pertinentes. Nous avons donc fixé la durée limite d'un scénario à 15 minutes en se basant sur la durée pour laquelle l'ennui face à une tâche monotone se fait ressentir dans la majorité des cas.

## 7.2 Quelles données sélectionner?

Nous avons plusieurs choix à faire concernant les données pluviométriques à utiliser. Tout d'abord, quelle échelle géographique et quelle lieu choisir. En ce qui concerne l'échelle, nous nous en sommes tenue à la résolution fixée par les climatologues qui réalisent les relevés pluviométriques, soit un maillage carré de 50km de côté pour les données récupérées auprès du LMD (Laboratoire de Météorologie Dynamique) de l'École Polytechnique.

Enfin, il a fallu choisir la plage de temps à utiliser pour les données récoltées. Le LMD nous a transmis des données s'étalant de 2006 à 2100. Pour rendre compte d'une évolution temporelle, nous avons voulu utiliser un maximum de cette plage de temps tout en respectant les deux contraintes suivantes: un scénario ne peut pas dépasser 15 minutes et il faut restituer les données de la manière la plus fiable possible.

Pour rentrer dans la contrainte des 15 minutes, il fallait convertir les données journalières en moyenne sur une autre échelle de temps. Pour utiliser la totalité de la plage temporelle (preque 100 ans), cette autre échelle de temps aurait dû être de l'ordre d'au moins 1 an et nous risquions ainsi de ne pas rendre compte de la forte variabilité des précipitations en fonction des saisons. Nous avons donc décidé de ne pas dépasser l'échelle de la saison, soit 3 mois. Puis, pour tenir la contrainte des 15 minutes, nous avons décidé de faire au sein du scénario des ellipses temporelles. Ainsi, au lieu de restituer les données de 2006 à 2100, nous restituons les données de 3 décennies: une présente (2006-2015), une dans un futur relativement proche (2050-2059) et une dans un futur plus lointain (2090-2099).

## 7.3 Fréquence maximale de chute de gouttes

Nous discutons ici de contraintes esthétique et mécanique. Comme nous l'avons vu précédemment, le fonctionnement de la pompe et du distributeur de gouttes implique une fréquence maximale de chute de gouttes de 5 gouttes par secondes. Mais il reste à vérifier que cette fréquence élevée ne nuit pas à l'esthétisme de l'oeuvre. En effet, le principe esthétique de l'oeuvre repose sur le fait que lorsqu'une goutte tombe dans le bassin d'eau éclairé par en dessous, la diffraction de la lumière à travers la surface d'eau perturbée crée un motif hypnotique sur l'écran du dessus. Cette perturbation se fait en deux temps. Tout d'abord, l'impact de la goutte sur l'eau crée un motif particulier un peu en forme d'étoile; ce motif vient du

phénomène dit de splash: la goutte lors de l'impact crée un cratère à la surface de l'eau avant d'être absorbée. Dans un deuxième temps, cette perturbation initiale engendre la propagation d'une onde matérielle à la surface de l'eau qui se propage de manière radiale (en cercle). Dans les faits, on observe même plusieurs ondes car la goutte n'est pas absorbée d'un coup mais rebondit en parti.

Pour définir une fréquence maximale admissible, le plus simple est de la déterminer expérimentalement. En pratique, ce qui limite la fréquence de chute des gouttes et soit la fréquence maximale admissible par la pompe du distributeur de gouttes, soit la limite esthétique décrite précédemment. Expérimentalement, on voit bien la différence sur l'écran entre une fréquence de 1 goutte par seconde où on a le temps d'observer le phénomène de splash et une fréquence de 5 par secondes qui donne plus une impression de désordre. Toutefois, nous avons choisi de garder cette fréquence maximale pour représenter les trimestres de précipitations les plus intenses car nous avons jugé que cet effet de désordre servirait justement à montrer un événement inhabituel.

## 7.4 Traitement des données pluviométriques

Toutes ces contraintes définies dans le cahier des charges nous ont permis de développer une méthode de traitement des données pour les convertir en un scénario. Tout d'abord, comme dit dans la section *quelles données sélectionner?*, il a fallu convertir les cumuls de précipitations en mm/jour sur 3h en des cumuls en mm de pluie sur 3 mois pour les 3 décennies concernées. Ensuite, nous avons cherché à déterminer un facteur de conversion  $K$  en nombre de gouttes par mm pour passer de ces cumuls  $C$  en mm à des fréquences  $f$  de chute de gouttes dans le dispositif. Pour cela nous avons pris en compte deux données: la fréquence  $f_{max}$  maximale admissible déterminée dans la section *Fréquence maximale de chute de goutte*, et la durée  $T$  du scénario consacrée à une période de 3 mois sachant que l'on consacre 5 minutes par décennies selon la section *Durée d'un scénario*. On obtient  $T = 7,5s$ . Il suffit alors de prendre le cumul maximal trouvé noté  $C_{max}$  et on en déduit le facteur de conversion grâce à la contrainte

$$K = \frac{T * f_{max}}{C_{max}}$$

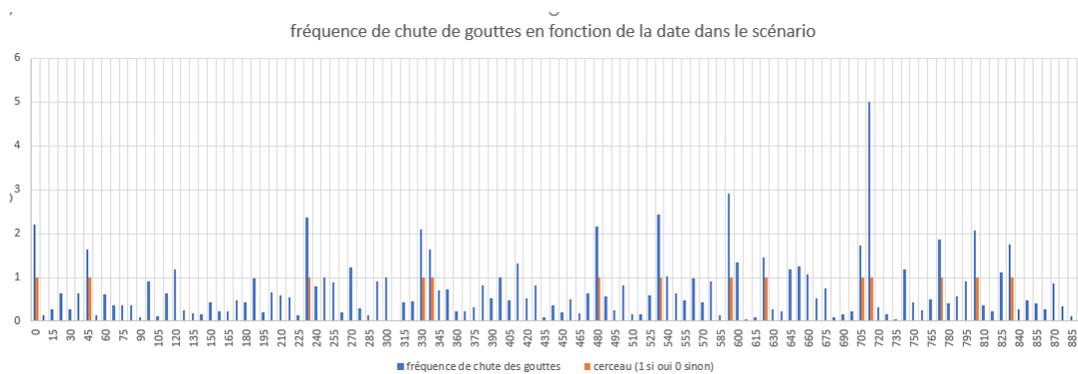
On obtient alors les fréquences de chute de gouttes pour une durée  $T$

$$f = \frac{K * C}{T} = \frac{f_{max} * C}{C_{max}}$$

Ensuite, nous avons décidé d'utiliser le cerceau pour symboliser des événements inhabituels. Lorsqu'on réalise une étude statistique des données pluviométriques sélectionnées, on se rend compte qu'il y a une forte variabilité de la précipitation. Si l'on regarde les cumuls en mm de pluie tombée tous les trois mois sur les trente

années sélectionnées (de 2006 à 2015, de 2050 à 2059 et de 2090 à 2099), l'écart-type est de 728mm de pluie en trois mois soit un peu plus que la moyenne qui est de 722mm en trois mois. Cela montre que les événements hors-normes dans la région concernée sont plus des fortes précipitations que des sécheresses. Nous avons donc décidé que le cerceau donnerait un accoup dans le scénario à la date  $t$  lorsque le cumul entre la date  $t$  et  $t + 1$  dépasse la moyenne d'au moins l'écart-type, ici si le cumul dépasse 1450mm de pluie, comme pour prévenir le spectateur qu'un événement rare arrive.

Voici le graphe représentatif du scénario élaboré selon les critères du cahier des charges. L'histogramme bleu représente la fréquence de chute des gouttes entre deux dates  $t$  et  $t + 7.5s$  et l'histogramme rouge représente les accoups de cerceaux.



*scénario proposé à partir des données pluviométriques*

Le scénario montre bien la forte variabilité des précipitations mais aussi l'augmentation des événements de fortes pluies dans le temps avec une accélération des accoups de cerceau. Le scénario sera alors répété en boucle avec entre chaque boucle la lampe qui s'éteint puis qui se rallume pour montrer que l'on reprend du début.

## 8 Du scénario à l'oeuvre

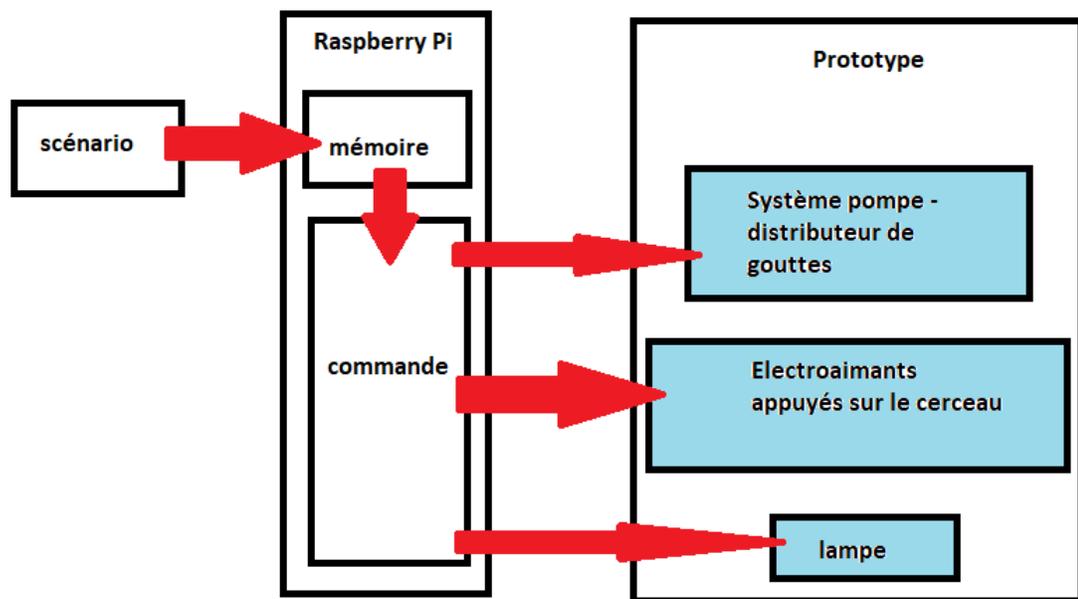
### 8.1 Commande du prototype

Le prototype est commandé via un *raspberry pi*: un petit ordinateur qui permet de programmer facilement tout type d'objet. Dans notre cas, le raspberry est relié à la lampe, au moteur de la pompe du distributeur de gouttes et aux électroaimants qui permettent de contrôler le cerceau.



*Photo d'un Raspberry*

Le raspberry contient aussi une petite mémoire ce qui nous a permis d'enregistrer le scénario créé pour que celui se fasse de manière automatique. L'objectif est que l'utilisateur du prototype ait juste à allumer le raspberry et à appuyer sur un bouton *play* par exemple.

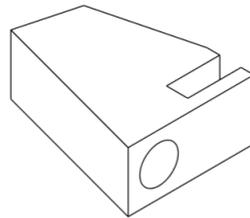


*Schéma fonctionnel de la commande du prototype via le Raspberry*

Après avoir créer un scénario à partir de l'analyse des données pluviométriques brutes, il a donc fallu le traduire dans un format lisible par cet ordinateur et qui permette une programmation simple. La programmation du prototype a été réalisées par Didier Bouchon. Nous lui avons fourni pour cela un fichier CSV contenant pour chaque date dans le scénario la fréquence de chute de gouttes et la présence ou non d'un accoup de cerceau.

## 8.2 Montage du prototype

Jusqu'à la rédaction de ce rapport, nous avons consacré une journée pour le montage du prototype. Toute la partie basse était alors montée. L'écran en médium noir est déjà découpé et les pièces qui permettent de soutenir l'écran en s'emmenchant sur les tuyaux ont été imprimées au fablab.



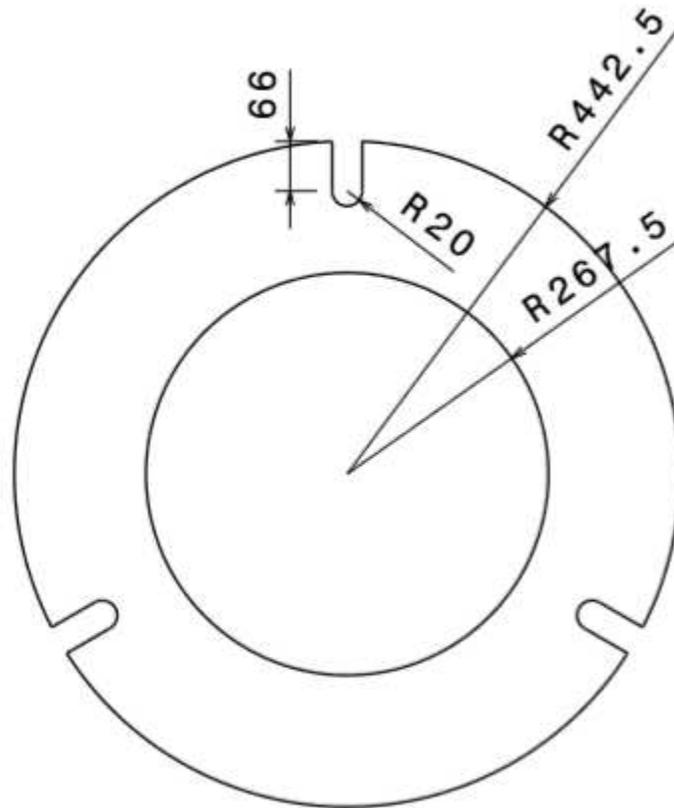
*dessin des pièces imprimées pour soutenir l'écran*

Il reste à monter le haut du prototype et à brancher le distributeur de gouttes et les électroaimants au raspberry.



*Avancée du prototype au moment de la rédaction du rapport*

Lors du montage du prototype nous avons dû porter une attention particulière au parallélisme des pieds de la structure, à l'équidistance entre les trois pieds, à la hauteur des différents éléments et à l'horizontalité du bassin (et plus tard de l'écran). Nous avons aussi essayer de tout fixer aux pieds (via des vis), en particulier le bassin, pour éviter tout ballotement de la structure. Bien que ce ne soit encore qu'un prototype, nous faisons aussi attention à l'esthétisme de l'oeuvre. Par exemple, nous avons décidé de cacher les électroaimants et le cerceau dans le bassin avec un cache que nous disposerons sur le bassin.



Front view  
Scale: 1:10

*dessin du cache pour le bassin*

## 9 Conclusion

En tant que premier groupe d'élèves à choisir un sujet de la chaire Art et sciences comme PSC, nous tenons à témoigner dans cette conclusion de l'intérêt d'un tel projet. La principale difficulté a été de ne négliger ni la partie scientifique ni la partie artistique et nous pensons avoir réussi ce compromis. Pour trouver un sens à cette oeuvre nous avons effectué un important travail de bibliographie scientifique et artistique qui nous a permis de placer le projet au centre du changement climatique et de l'impact sur les précipitations. La rigueur et la méthodologie scientifique nous ont été utiles pour élaborer un scénario de chute de gouttes fiables au modèle pluviométrique développé par le Laboratoire de Météorologie Dynamique. Le cahier des charges que nous nous sommes alors imposé avait pour but de respecter cette honnêteté intellectuelle tout en apportant une touche personnelle et artistique. En plus de nous apporter de nombreuses connaissances nouvelles et diverses d'un point de vue scientifique, ce projet nous a permis de sortir de l'univers académique en nous faisant travailler avec des personnes de tout métier artistique, manuel, scientifique...

Nous en avons aussi beaucoup appris sur le travail de groupe et sur l'intérêt de la communication au sein du groupe et avec des coordinateurs intérieurs ou extérieurs au projet. Chacun a su mettre en avant ses compétences techniques et humaines pour faire avancer le travail de groupe. Luiz a collaboré avec M. Didier Bouchon pour améliorer la commande du prototype via le raspberry. Chloé a pris contact avec le LMD pour leur demander des données pluviométriques et s'est renseignée sur les modèles climatiques utilisés par le laboratoire. Camille s'est chargée de contacter le fablab pour que l'on puisse réaliser certaines pièces du prototypes sur mesures et a rédigé la bibliographie artistique du projet et l'étude du climat Méditerranéen. Enfin, Claire a géré la communication avec le tuteur et le coordinateur, a réalisé les demandes financements et la bibliographie scientifique du projet. Enfin, pour le coeur du projet, cest-à-dire l'élaboration d'un scénario et le montage du prototype, tout le groupe, y compris notre tuteur M. Laurent Karst, a travaillé ensemble et a participé activement.

Au moment où nous rédigeons ce rapport, le projet n'est pas encore abouti mais nous avons en main tous les plans pour le terminer. Les enjeux de l'oeuvre ont tous été extraits et expliqués. Le scénario est prêt et il ne demande qu'à être automatisé et joué dans le prototype. Le prototype est monté à moitié et toutes les pièces sont prêtes pour finir le montage en une journée. D'ici à la soutenance, nous espérons donc que le montage sera terminé et que le scénario sera joué dans notre prototype. Le labofactory pourra ensuite reproduire et améliorer le prototype en vue d'une exposition.

## References

- [1] Olivier Boucher. Le double jeu des aérosols. *La Recherche*, 2007.
- [2] Olivier Boucher. *Les aérosols atmosphériques, Propriétés et impact climatiques*. Springer Paris, 2012.
- [3] CNRS. Changement climatique: scénarios d'évolution pour la méditerranée. *Futura Planète*, 2015.
- [4] Larousse Encyclopédie. <https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/climat>.
- [5] Météo france. <http://www.meteofrance.fr/prevoir-le-temps/phenomenes-meteo/les-nuages>.
- [6] Li-Hua Luu. *Impact de gouttes de fluides à seuil: rhéologie, splash et cratères*. PhD thesis, 16 février 2011.
- [7] Hervé Douville Bruno Spagnoli Serge Planton, Michel Déqué. *Impact du réchauffement climatique sur le cycle hydrologique*. PhD thesis, 2004.
- [8] Claudia J. Stanny Tiffany M. Taylor Steven J. Kass, Stephen J. Vodanovich. *Watching the Clock: Boredom and Vigilance Performance*. PhD thesis, 2001.
- [9] Habib ELANDALOUSSI Thomas NIESOR et Jean-Loup ROUYER de l'OME ; Frédéric BLANC de l'Institut de la Méditerranée/FEMISE ; Stéphane POUFFARY et Charlotte COLLEU de l'ADEME Cellule Expertise Internationale pour la Maitrise de l'Energie ; Rafik MISSAOUÏ Consultant Tunisie ; Nejib OSMAN de l'ANME Tunisie ; Rafik Y. GEORGY et Adel T. SOLIMAN consultants Egypte ; Henri BOYE Elisabeth COUDERT Céline GIMET Silvia LARIA Patrice MIRAN Jean de MONTGOLFIER Roméo PRENGERE Stéphane QUEFELEC et Gaëlle THIVET du Plan Bleu Yves TOURRE, Patrick VAN GRUNDERBEECK de Médias France ; Houda ALLAL. Changement climatique et énergie en méditerranée. *Plan Bleu*, 2008.