



DOSSIER SECURITE DU PROJET BOBINE TESLA

Ce document détaille les moyens de sécurité lors des tests
de la bobine Tesla du Clubelek en extérieur

Louis DASSONVILLE

Alexandre SICCARDI

Année 2018-2019

Version 3.1



Contacts

Chefs de projets Bobine Tesla

Alexandre SICCARDI

0619162395

alexandre.siccardi@insa-lyon.fr

Louis DASSONVILLE

0767066300

Louis.dassonville@insa-lyon.fr

Président du Clubelek

Marc CHANET

0770624647

marc.chanet@insa-lyon.fr



Table des matières

Contacts.....	1
Présentation du projet	3
Présentation des membres	3
Présentation du système.....	4
Pupitre de commande	4
Bobine Tesla	5
Risques liés à la bobine Tesla DRSSTC	6
Risques généraux liés à la haute tension	6
Risques liés au champ électromagnétique de la bobine.....	6
Risques d’ozone.....	6
Risques de brulures	7
Risques liés au circuit électrique	7
Risque d’incendie	7
Risque sonore	7
Risques maîtrisés.....	7
Risques non maîtrisés mais atténués	7
But des Tests	8
Lieux des Tests.....	8
Procédure de mise sous tension et fonctionnement	10
Planification des tests.....	11
Gestion du public.....	12
Présence de personnes extérieures invitées.....	12
Présence de personnes extérieures circulant sur l’espace public.....	12
Pour conclure	14
Soutiens du projet	15
Annexes	16
Eléments du pupitre de commande	16



Présentation du projet

Le projet Bobine Tesla du Clubelek est un projet visant à construire une machine capable de produire des éclairs. Mené par deux étudiants du département Génie Electrique, Louis Dassonville et Alexandre Siccardi, il est soutenu par la fondation INSA Lyon le département GE et la société KEEP MOTION. Il a pour but principal de montrer les capacités acquises par les étudiants INSA au cours de leurs études et de leur engagement associatif, mais aussi de fournir une expérience magnifique et maîtrisée des phénomènes électriques fondamentaux. Cela ne peut que participer à susciter des vocations d'ingénieur chez les plus jeunes, et à augmenter l'attractivité du département Génie Electrique.

Après deux ans de tests et de dimensionnement, le projet quitte enfin sa phase de développement pour passer aux essais finaux en vue d'une inauguration officielle. Durant l'année à venir, nous prévoyons donc de faire de nombreux essais avec le dispositif. En effet en plus des tests techniques, nous souhaitons mettre en place des animations sons et lumières pour proposer un véritable spectacle autour de cette création.

Présentation des membres

L'équipe bobine Tesla est composée de 2 membres permanents et de 3 membres occasionnels qui nous prêtent main forte pour les tests et la construction. Tout ces membres sont au département Génie Electrique en 5^{ième} année et ont suivie une formation en IUT GEII où ils ont obtenu une habilitation électrique B1V. Bien qu'elle n'ait pas été renouvelé depuis 3ans, tous les membres du projet travaillent régulièrement sur des projets électriques et d'électronique de puissance impliquant du 220 et du 400V. Ils sont donc tous au courant des risques liés à la basse tension et connaissent les moyens de prévention et d'action contre les risques électriques.

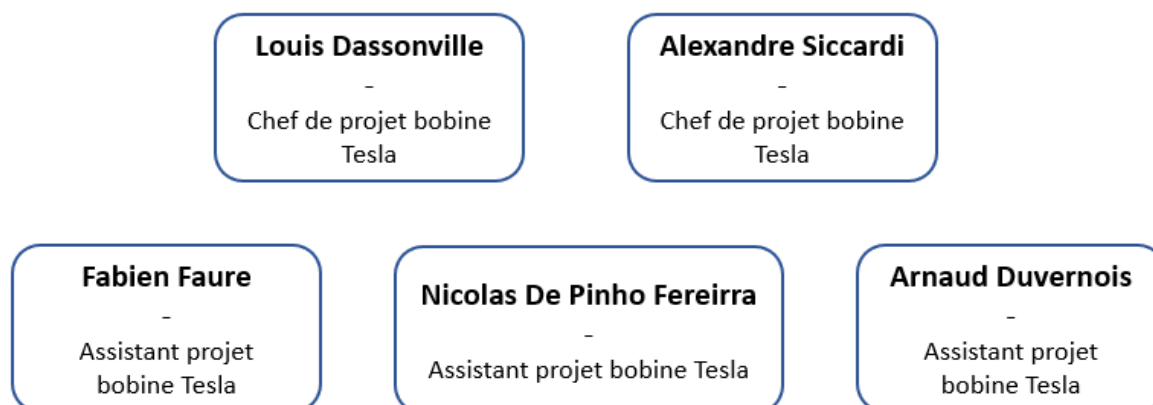


Figure 1 : Organisation de l'équipe bobine Tesla

Présentation du système

La bobine Tesla est un générateur haute tension qui permet produire des éclairs en sortie du système à partir de l'alimentation du réseau. En emmagasinant suffisamment d'énergie, la bobine Tesla peut produire pendant un très court instant (10 microsecondes) une tension de 1 000 000 V permettant ainsi la création d'un éclair.

Le système se compose en 3 parties : un pupitre de commande qui permet d'alimenter la bobine Tesla et de surveiller sa consommation électrique ; un boîtier de contrôle appelé interrupteur qui permet de régler la puissance de la bobine et la taille des arcs ; la bobine Tesla qui contient le circuit électrique pour augmenter la tension et produire les éclairs.

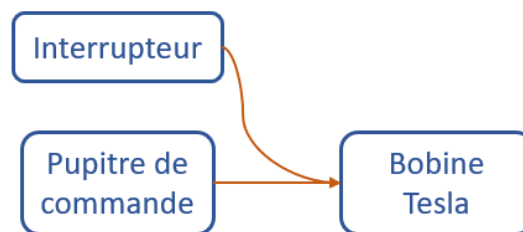


Figure 2 : Organigramme du système

La bobine Tesla est un système uniquement électrique, il n'y a aucune pièce mécanique en mouvement. Pour répondre aux normes électriques, les parties électriques avec une tension supérieure à 24V ne sont pas accessibles directement. La chaîne d'énergie du système ci-dessous présente les tensions atteintes dans le système. Afin de protéger les personnes des risques électriques, nous avons dimensionnés les boîtiers pour qu'ils répondent à la norme IP3x.

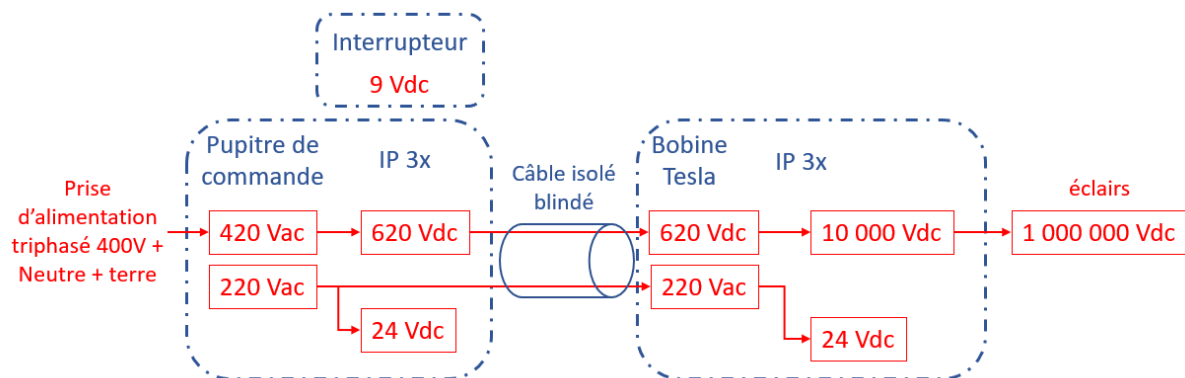


Figure 3 : Chaîne d'énergie de la bobine Tesla

La puissance consommée par la bobine Tesla est de 6kW en moyenne et la puissance consommée maximale est de 12kW.

Pupitre de commande

Le pupitre de commande a été construit pour assurer la mise sous tension sécurisée de la bobine Tesla. Il est équipé de voyants indiquant l'état du système électrique, de multimètres pour mesurer la consommation électrique, d'un disjoncteur triphasé 25A avec différentiel 30mA et d'un monophasé 20A pour protéger des risques électriques dans le pupitre de commande et dans la bobine Tesla, d'un interrupteur à clé pour verrouiller le boîtier et d'un bouton d'arrêt d'urgence normalement fermé.

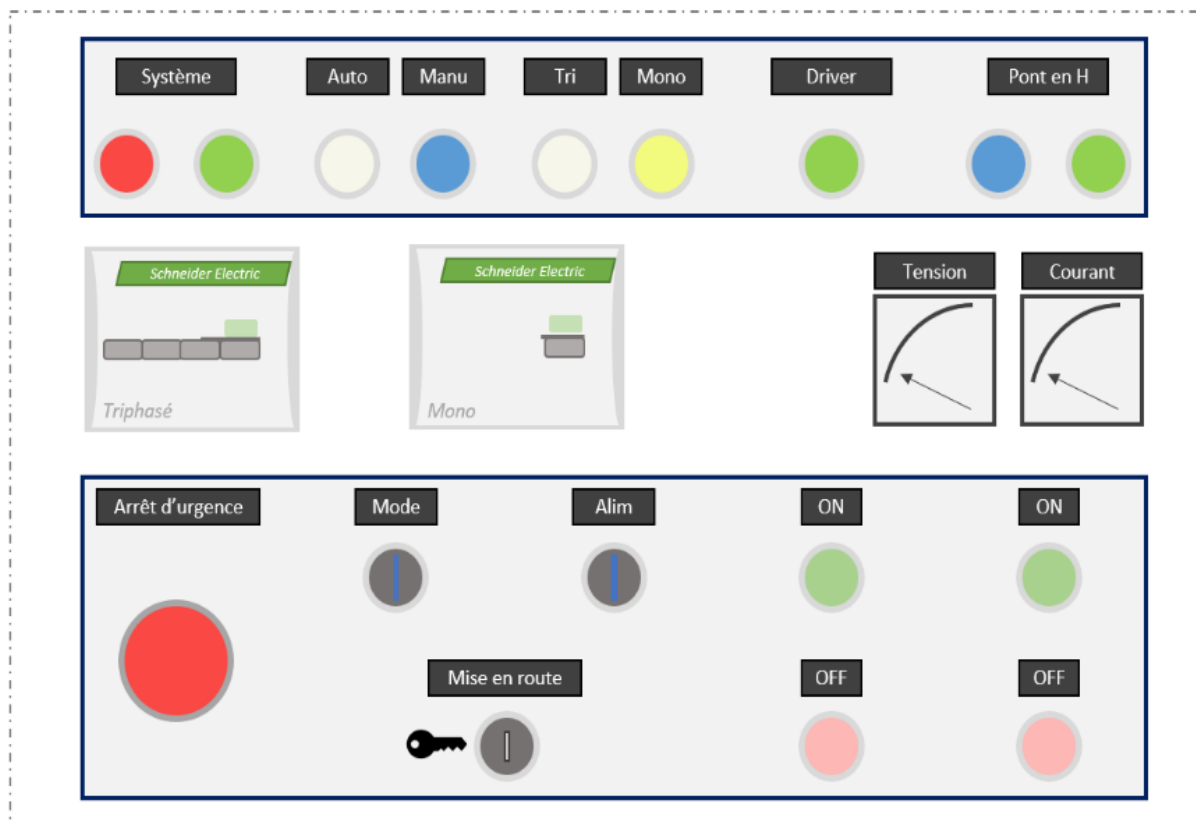


Figure 4 : Schéma du pupitre de commande (des photos des éléments sont disponibles en annexe)

Le bouton d'arrêt est câblé à deux contacteurs qui coupent l'alimentation du secteur et court-circuitent les condensateurs du bus continu 620Vdc. La bobine ne possède ainsi plus d'énergie pour fonctionner et s'arrête 30ms après l'enclenchement du bouton d'arrêt d'urgence (délais pour décharger les condensateurs à une tension inférieure à 24Vdc).

De même l'interrupteur à clé est nécessaire pour mettre sous tension le pupitre de commande. Il nous permet de garantir que personne ne puisse démarrer la bobine sans la clé (possédés uniquement par Louis Dassonville et Alexandre Siccardi).

Enfin nous avons mis des prises mâles sur l'entrée triphasé du pupitre et une prise femelle pour la sortie 620Vdc afin qu'on ne puisse pas accéder à la tension.

Bobine Tesla

Comme la bobine Tesla possède des condensateurs de grosse capacité chargés à 620Vdc, le câble utilisé entre la bobine Tesla et le pupitre de commande possède des prises mâle-mâle à visser. Ainsi on ne peut pas accéder à la tension à partir des prises du pupitre et de la commande sans le câble et la molette de sécurité empêche une personne de retirer le câble lorsque le système est sous tension.



Figure 5 : Prises utilisés pour la transmission électrique

Risques liés à la bobine Tesla DRSSTC

Il faut bien distinguer les différentes technologies de fonctionnement de bobine Tesla pour mieux comprendre les risques liés à celle-ci. L'ancienne version à éclateur (SGTC) utilisait un système de d'éclateur à arc. Les arcs de l'éclateur montaient à 6000°C produisant une intense chaleur ainsi qu'une grande quantité d'ozone. Afin de minimiser les risques incendies ce système a été remplacé par un système à transistor qui ne produit plus d'arcs électriques. Les seuls arcs produits dorénavant sont ceux de la bobine Tesla (au niveau de la pointe de sortie).

Risques généraux liés à la haute tension

La partie supérieure de la bobine Tesla (Tore) monte à une tension de 1 100 000V_{max} avant la création d'un arc électrique. Tout objet en contact direct avec le tore sera soumis à cette tension entraînant le passage d'un pic de courant. La tension atteint sa valeur maximale avant la création de l'arc puis s'écroule au fur et à mesure que l'arc grandit. A contrario, le courant atteint sa valeur maximale de 10A_{pic} si l'arc se fraie un chemin jusqu'à la Terre. La création de l'arc et sa disparition dure 10us.

Risques liés au champ électromagnétique de la bobine

Le secondaire de la bobine Tesla émet un champ électrique. C'est ce champ électrique qui éclaire les néons à distance. Il se trouve fortement atténué par le béton et les objets métalliques. De même pour le champ magnétique, il est fortement atténué par les murs et tout objets métalliques reliés à la terre.

Risques d'ozone

Les arcs électriques produits par la bobine cassent les molécules d'oxygène qui se recombinent en ozone. L'exposition prolongée à l'ozone entraîne un dessèchement des muqueuses et une brûlure des tissus pulmonaires. L'ozone est instable chimiquement à basse altitude. Les molécules se recombinent en oxygène naturellement. Ainsi la quantité d'ozone diminue naturellement. De plus l'ozone produit par l'arc électrique est plus dense que l'air et monte par effet de convection.



Risques de brulures

L'arc électrique provoque des brulures superficielles s'il touche la peau.

Risques liés au circuit électrique

La bobine Tesla possède des pièces conductrices non isolés à l'intérieur du support. Ces conducteurs sont confinés dans le support qui empêche l'accès direct. Il est impossible d'accéder à ces pièces sans démonter le support.

Risque d'incendie

Dans l'éventualité d'un dysfonctionnement de la partie électronique de puissance, l'énergie contenue dans les condensateurs se libère sous forme de chaleur. La bobine tesla ne contient pas de composants inflammables en dehors la structure en bois (qui sera remplacé prochainement par de l'aluminium). Les éclairs peuvent provoquer des flammes s'ils touchent en continu un objet inflammable pendant plusieurs secondes.

Risque sonore

Le claquement de l'air provoqué par les arcs électriques provoque un son puissant. Le niveau sonore peut être gênant lorsque l'on est à moins de 5m de la bobine Tesla. Le niveau de bruit maximal mesuré à l'aide d'un sonomètre est de 100dB au niveau de la barrière blanche (80dB en moyenne).

Risques maîtrisés

Concrètement, tous les risques électriques sont évitables avec l'enceinte de confinement et les barrières Vauban. Les ondes électromagnétiques en dehors de la zone de tests sont fortement atténués par le béton et le ferrailage. Tous les risques d'électrifications et de brulures sont inexistantes tant que personne ne se trouve dans le périmètre de sécurité pendant le fonctionnement. L'ozone ne présente pas de risques car la bobine Tesla fonctionne en extérieur. Enfin les risques incendies sont extrêmement faibles. Par mesures compensatoires nous prévoyons un extincteur à CO2 au niveau de la barrière de la zone de test.

Risques non maîtrisés mais atténués

Le fonctionnement de la bobine Tesla présente deux risques que l'on maîtrise peu ou pas du tout. Premièrement le niveau sonore. Le seul moyen de diminuer le niveau de bruit et de diminuer la puissance. Nous avons donc convenu de faire fonctionner la bobine Tesla à pleine puissance uniquement lorsque c'est nécessaire. Le reste du temps elle fonctionnera à puissance 70% de la puissance. Pour atténuer les risques pour les personnes invités à assister aux tests nous avons prévus des bouchons d'oreilles (atténuation de -26dB).

Deuxièmement bien que la bobine possède un disjoncteur différentiel pour couper le courant si une personne touche une partie sous tension, la bobine Tesla utilise un transformateur qui isole galvaniquement la partie primaire (partie 10 kV) et la partie secondaire (1 000 kV). **Le disjoncteur différentiel ne peut pas détecter un court-circuit entre le point chaud de la bobine (tore) et la terre de la bobine Tesla.** Si une personne est touchée directement par un arc électrique, seul l'opérateur sera en mesure de couper l'alimentation. Le périmètre de sécurité et la garantie que personne ne puisse pénétrer dedans est donc primordial.



But des Tests

Le but des tests est d'optimiser la consommation électrique du système, la longueur maximale et de diminuer les émissions électromagnétiques parasites (CEM). En plus des tests techniques, nous devons faire des tests acoustiques pour déterminer les musiques qui peuvent être jouées par la bobine Tesla et avec quelle puissance sonore.

Les tests doivent être fait dans un environnement extérieur pour que les arcs ne puissent toucher aucun objet de l'environnement et obtenir des conditions de tests proche des conditions théoriques utilisés dans nos simulations. Les tests en extérieur sont donc essentiels pour comparer les résultats théoriques et pratiques.

Lieux des Tests

Jusqu'à présent les tests étaient faits à l'intérieur du Clubelek à puissance fortement réduite. Le local du Clubelek n'est néanmoins pas adapté pour faire des essais plus poussés avec la machine : la pièce est trop exiguë à cause du matériel présent et pour des raisons de sécurité nous devons monopoliser toute une partie du Club lors des tests, gênant l'activité des autres nombreux projets de l'association.

Afin de faire fonctionner la bobine à pleine puissance tout en garantissant la sécurité des individus et du matériel, nous souhaitons la faire fonctionner en extérieur. Après plusieurs recherches nous avons pensé l'utiliser au niveau du sous-sol sous les fenêtres du Clubelek. Ce lieu possède plusieurs avantages :

- La proximité avec le Club nous permet d'utiliser la prise d'alimentation triphasée de notre local, évitant la mise en place de matériel supplémentaire.
- Le sol permet d'effectuer la mise à la terre de la bobine, indispensable pour son bon fonctionnement.
- Les appareils de mesures nécessaires aux tests sont sensibles au champ magnétique de la bobine Tesla. Ce lieu permet de les utiliser depuis le Clubelek, les câbles passent par la fenêtre du club et la structure du bâtiment les protège du champ magnétique qui pourrait les endommager et fausser nos mesures.
- Les fenêtres du Clubelek donnent directement sur la bobine Tesla. Ainsi la bobine Tesla peut être commandé depuis la fenêtre pour que l'opérateur puisse s'assurer que personne ne pénètre sur le lieu du test et couper l'alimentation grâce à l'arrêt d'urgence si besoin (se référer au document).
- Le sous-sol est situé deux mètres sous le niveau de la route et entouré d'un double niveau de barrières. Cette disposition permet d'empêcher les gens d'approcher. De plus la zone est suffisamment large pour s'assurer qu'aucun éclair ne puisse toucher un mur, même à plein régime.

Cet emplacement ne dispose que de deux accès directs depuis la route : un depuis le sous-sol (en direction des poubelles du bâtiment IF) et l'autre depuis la piste cyclable. Ces deux passages peuvent être fermés par des barrières Vauban et des membres du projets bobine Tesla placés devant les barrières peuvent assurer qu'aucune personne ne puisse s'approcher trop près ou pénétrer sur la zone de test. De plus Ces passages sont dans le champ de vision de l'opérateur, il sera en capacité de stopper les tests si une personne s'approche trop près.

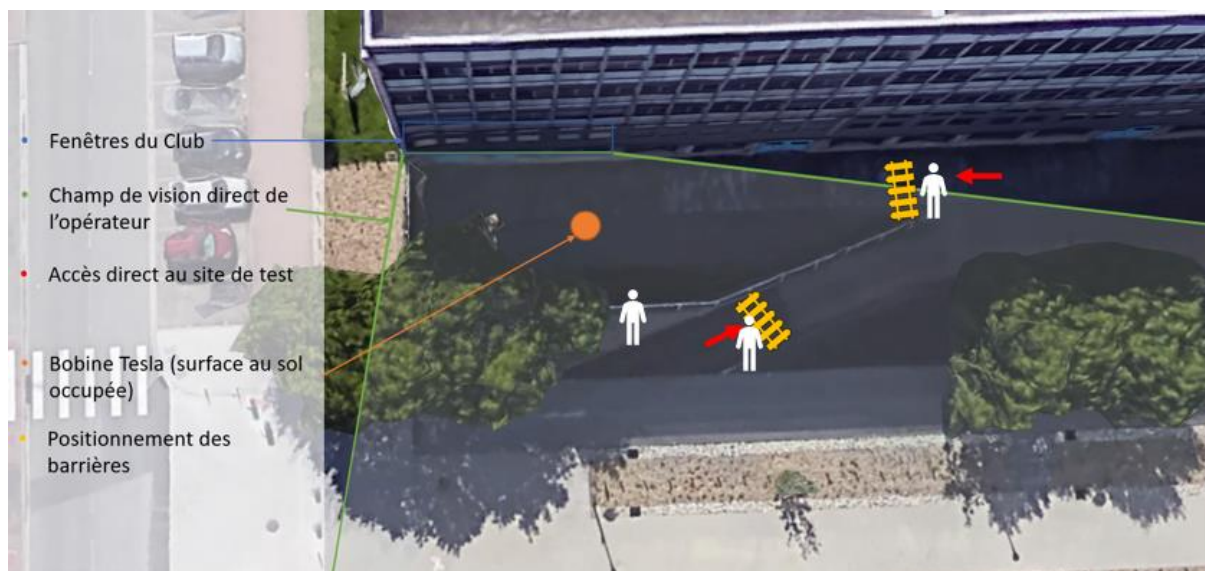


Figure 6: Lieu des tests de la bobine Tesla et disposition du terrain



Figure 7 : disposition de la bobine Tesla pour les tests

Procédure de mise sous tension et fonctionnement

Dans cette partie nous allons décrire comment se passent la mise sous tension et le fonctionnement de la bobine Tesla.

L'équipe bobine Tesla commencera par installer les barrières de sécurité et le matériel de la bobine environ 30min avant l'heure prévue. Durant l'installation aucune partie ne sera sous tension, le câble d'alimentation sera branché en dernier et le panneau de contrôle sera déverrouillé et mis sous tension uniquement au début de chaque test.

Une fois le matériel installé, l'opérateur se positionne aux commandes à l'intérieur du bâtiment, et une personne surveillante se place à l'extérieur en face de l'opérateur pour le test. Cette personne est là pour veiller à ce que personne ne pénètre le périmètre en ayant la possibilité de s'interposer physiquement et d'arrêter le fonctionnement de la bobine Tesla, permet d'augmenter le champ de vision de l'opérateur pendant le test, en observant la partie arrière de la bobine pendant son fonctionnement.

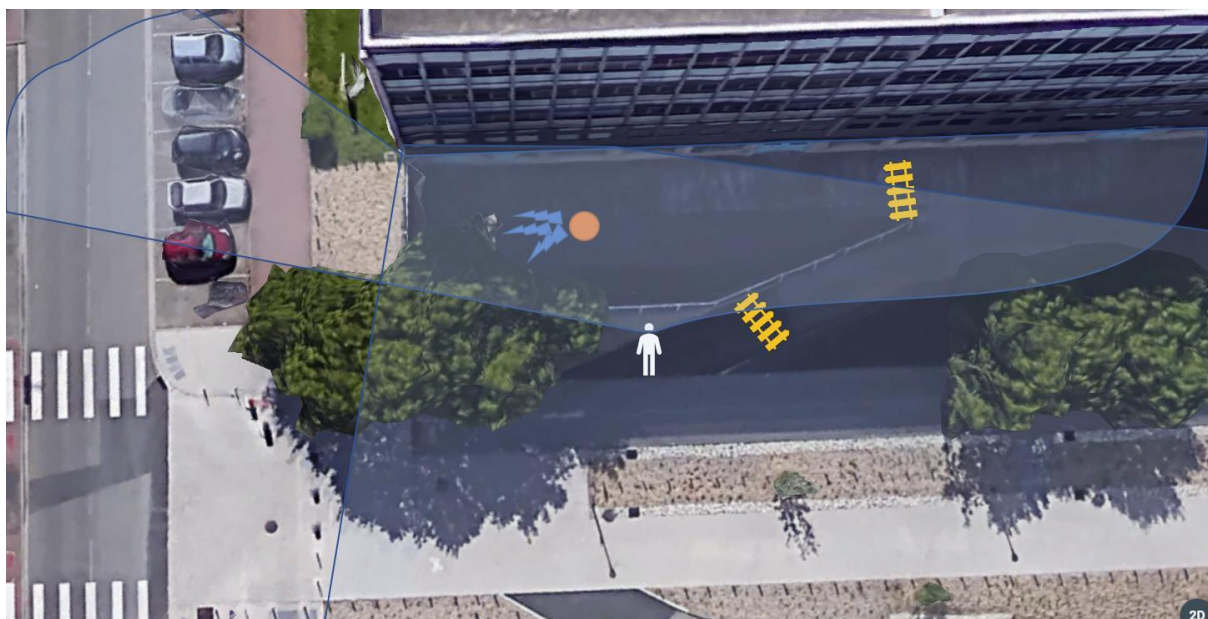


Figure 8 : Disposition du matériel et des personnes durant le test

Une fois que l'opérateur et l'observateur se sont assurés qu'il n'y a aucun danger l'opérateur met la bobine sous tension. Durant cette étape la bobine est sous tension mais ne produit pas d'arcs électriques. L'opérateur vérifie depuis son panneau de contrôle que la consigne de puissance est minimale et lance le test.

A puissance minimale, les éclairs mesurent 20-30 centimètres au bout de la pointe de sortie (la pointe de sortie permet de contrôler la direction par laquelle sortent les éclairs. Ils sortiront formellement, uniquement, par ce point). Ensuite, l'opérateur augmente petit à petit la puissance. A chaque fois que la puissance augmente la taille des éclairs augmente avec. L'observateur s'assure à tout moment que les éclairs ne touchent pas les murs de l'enceinte de test.

Lorsque la puissance maximale est atteinte, les éclairs mesurent environ 2m (220cm lorsqu'il retombe au sol devant la bobine). Les tests peuvent alors commencer. Lorsque les tests sont terminés, l'opérateur engage la procédure d'arrêt. Une fois la bobine éteinte et mise hors tension, l'observateur peut aller inspecter l'état de la bobine Tesla.

Si des modifications doivent être faites sur la bobine Tesla (changement de la fréquence de résonance, orientation de la pointe de sortie etc...), l'opérateur verrouille l'accès au panneau de commande avec l'interrupteur à clé afin d'éviter que quiconque puisse remettre sous tension la bobine Tesla pendant la maintenance. Une fois les modifications terminées, l'opérateur et l'observateur reprennent leurs places et redémarrer la bobine Tesla pour effectuer de nouveaux tests, en suivant la procédure.

En plus de l'opérateur et l'observateur, nous avons deux membres du projet Bobine Tesla qui sont postés devant les barrières pour bloquer l'accès au périmètre de la bobine Tesla.

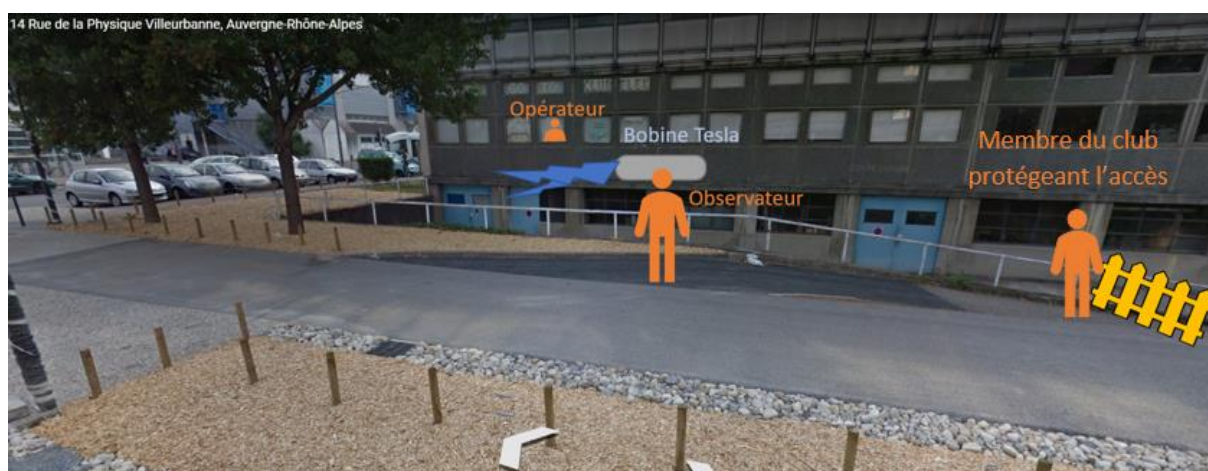


Figure 9 : Vue extérieure lors des tests avec positionnement des membres du projet bobine Tesla

Planification des tests

A cause des contraintes scolaires, des délais de livraison variable du matériel et de la météo, l'équipe bobine Tesla peut difficilement prévoir à l'avance quand la bobine aura besoin d'être testée et la durée des tests. De plus la plage horaire de fonctionnement de la bobine est très peu flexible. La bobine ne peut fonctionner ni avant le coucher du soleil car les arcs électriques ne sont pas visibles ni après 22h pour ne pas causer de tapage nocturne.

En plus de prévenir le service de sécurité, nous nous engageons à prévenir les gardiens du département IF et GE afin de ne pas gêner leur tranquillité.

Bien entendu la date et l'heure des tests sont flexibles et peuvent être décalés ou reportés en cas de besoin.

Gestion du public

Présence de personnes extérieures invitées

Compte tenu du soutien de l'INSA que reçoit le projet bobine Tesla, nous profitons des tests pour inviter des membres du personnel enseignants ou des élèves du département génie électrique à assister aux tests. Ces personnes sont averties sur le projet bobine Tesla et sont systématiquement mises au courant des règles à respecter durant la présentation.

Présence de personnes extérieures circulant sur l'espace public

Nous avons constaté lors des précédents tests et démonstrations que les personnes circulantes sur la voie publique se rapprochent de la zone de test pour assister au « spectacle ». Jusqu'ici les personnes se sont tenues à quelques mètres des barrières en bois (délimitant l'espace vert autour de la zone de test) pour simplement observer la bobine Tesla. La majorité des passants venant assister aux tests repartent après quelques minutes, les autres, plus curieux viennent discuter avec les membres encadrants du Clubelek.

Bien que nous n'ayons déploré aucun problème jusqu'ici, nous disposons des membres du Clubelek autour de la zone de test pour encadrer les passants et s'interposer physiquement s'ils tentent de pénétrer à l'intérieur du périmètre de sécurité. Nous prévoyons au minimum 3 membres pour encadrer le public mais d'autres membres sont disponibles à l'intérieur du Clubelek (l'équipe bobine Tesla compte 5 membres présent la majorité du temps). L'opérateur peut à tout moment envoyer ces membres en renfort lorsque la taille du public devient trop importante. Nous partons du principe qu'un membre du Clubelek peut gérer 5 personnes extérieures au maximum. Si un membre du Clubelek, l'opérateur ou l'observateur constate qu'il y a un attroupement trop important qui ne permet plus de contrôler le public, que des personnes sont turbulentes ou ont un comportement dangereux, l'équipe bobine Tesla interrompra les tests et mettra la bobine Tesla hors tension jusqu'au retour au calme.

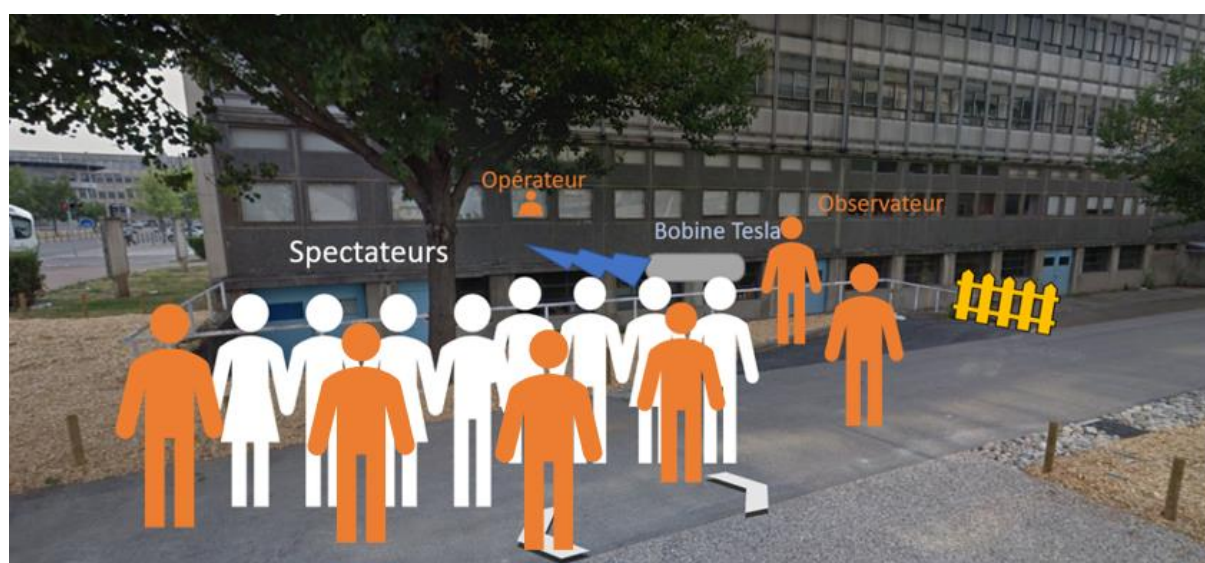


Figure 10 : Disposition des spectateurs lors de la présentation



Compte tenu de la proximité du passage piéton, de la piste cyclable et de la voie des pompiers (actuellement en travaux), les membres encadrants veilleront à ce que les personnes extérieures n'obstruent pas le passage piéton et la voie des pompiers.



Figure 11 : Disposition de l'observateur (en vert) et des membres encadrant le public (en rouge)

Pour conclure

La fosse devant le Clubelek nous semble l'endroit idéal pour effectuer nos tests sans risques. Les deux niveaux de barrière et le mur empêchent toute personne de s'introduire sur la zone de test. Il n'y a pas d'angle mort dans le champ de vision de l'opérateur de la bobine Tesla. A l'aide de seulement deux barrières Vauban nous pouvons physiquement fermer totalement l'accès à la bobine.

Malgré les nombreuses contraintes pour planifier les tests, l'équipe bobine Tesla peut les reporter ou les décaler pour éviter de perturber la vie sur le campus.

Soutiens du projet



Annexes

Eléments du pupitre de commande



Figure 12 : Arrêt d'urgence normalement fermé



Figure 13 : Disjoncteur différentiel 30mA Tri + Neutre 25A



Figure 14 : Interrupteur à clé permettant le verrouillage