

Modélisation de l'anneau de vitesse de Linas-Monthéry

■ Gilles COSTA - Arkane foncier, Monthéry

Au début des années 1920 la course automobile sur route atteint ses limites tant au niveau des vitesses, de la sécurité que du spectacle. L'heure est venue de créer des circuits offrant un spectacle régulier (plusieurs voitures passant chaque minute devant les spectateurs) tout en permettant aux véhicules d'atteindre en toute sécurité des vitesses élevées.

C'est à cette époque que sont construits les premiers autodromes, circuits des ingénieurs et des industriels. Si aux États-Unis deux modèles (le rectangulaire comme à Indianapolis et le tri-ovale comme à Daytona) se partagent l'essentiel des circuits, en Europe chaque circuit est différent et se démarque des autres par ses caractéristiques : du cercle parfait de quatre kilomètres de diamètre à Nardó en Italie jusqu'au virage Mercedes à Untertürkheim en Allemagne, unique virage relevé du circuit avec ses soixante mètres de rayon et son dévers à quatre-vingt-dix degrés.

La construction de ces circuits est aussi l'occasion pour les ingénieurs de mettre en œuvre les nouvelles techniques de construction : premier pont en béton armé à Brooklands (Grande-Bretagne), première piste en béton armé à Miramas et première utilisation de la préfabrication à Linas-Monthéry.

Le chantier de l'autodrome de Linas-Monthéry a débuté en mai 1924 et pendant cinq mois 1 500 ouvriers, répartis en une vingtaine de chantiers, ont assemblé 3 300 poteaux, 7 000 entretoises et 8 000 poutrelles pour asseoir la piste de 18 mètres de large et de 2,5 km de long. L'anneau sera complété ultérieurement d'un circuit routier permettant d'atteindre une dizaine de kilomètres.

L'ingénieur Raymond Jamin, concepteur de l'autodrome était par ailleurs un visionnaire imaginant à l'époque des routes de dix mètres de large permet-

tant aux voitures de circuler entre 120 et 150 km/h, dotées d'une signalisation appropriée. Il prévoyait aussi que le principal frein à ce développement viendrait des propriétaires terriens et avait réfléchi à une législation permettant l'équivalent de l'actuelle expropriation pour utilité publique.

À cette même époque les records sur route atteignent également leurs limites et, dès sa mise en service, l'autodrome attire les prétendants aux records les plus variés : record des 24 heures à 122 km/h en 1924... En 1933, sur les 217 records mondiaux, 204 ont été établis ou battus à Monthéry, en faisant ainsi le circuit le plus rapide du monde.

Après la seconde guerre mondiale, la compétition automobile évolue avec la production en série et la conversion du surplus d'aérodromes militaires en circuits de course. L'autodrome redevient le territoire des ingénieurs avec le développement des études en laboratoire. Tous les grands constructeurs s'équipent de circuits privés dotés en plus généralement d'un anneau de pistes d'essais en tous genres : tôle ondulée, gués, rampes, couloirs de vent... Ces pistes sont jalousement gardées afin de préserver le secret industriel.

Le circuit de Linas-Monthéry, en faillite, a été repris par l'État qui en a confié la gestion et l'exploitation à l'Union Technique de l'Automobile et du Cycle (UTAC), chargée de valider les spécifications des véhicules et leur conformité aux normes annoncées. Le circuit est donc utilisé essentiellement à des fins d'essais mais propose également des formations de conducteurs ainsi que quelques courses de véhicules anciens chaque année.

Implanté à Monthéry depuis plus de deux siècles et demi, notre cabinet a été missionné pour de nombreuses interventions sur le site de l'autodrome pour

des homologations (records, sécurité...) la réfection de la piste, le réaménagement du circuit routier, ainsi que des opérations foncières (bornages, divisions...). Nous allons détailler celles de ces interventions qui concernent l'anneau et ses spécificités ainsi que les techniques mises en œuvre à chaque époque pour répondre aux besoins de nos clients dans les conditions exigées et avec la précision nécessaire en fonction des technologies disponibles. Pour ces différentes interventions nous avons été amenés à établir des modèles mathématiques puis numériques de la piste afin de garantir la qualité de nos prestations.

Contraintes générales

Le site où est implanté le circuit de Linas-Monthéry est un plateau boisé. De par l'ampleur du circuit il reste encore plusieurs dizaines d'hectares de bois à l'intérieur de l'anneau rendant impossible de voir, d'où que ce soit, l'intégralité de la piste.

La moitié supérieure de la piste n'est pas praticable à pied, ce qui rend très compliqué l'accès en toute sécurité à cette partie du circuit.

À tout moment il faut concilier la précision exigée, la faisabilité technique du projet tout en maîtrisant les coûts d'intervention et de réalisation.

Il est donc impératif de trouver, pour chaque intervention, le meilleur compro-



Figure 1. Vue depuis la clothoïde nord-ouest

mis entre les besoins exprimés et ces contraintes.

Modélisation conceptuelle

Tout l'intérêt de la piste de l'anneau de vitesse est qu'elle permet d'atteindre des vitesses élevées et de parcourir l'ensemble du circuit sans action sur le volant.

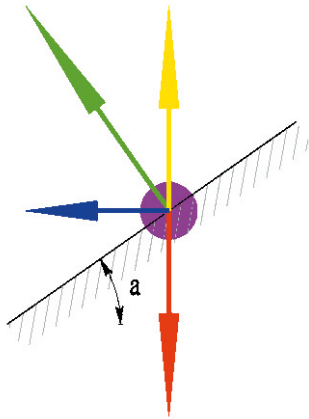


Figure 2. Les forces qui s'appliquent à un véhicule

Un véhicule en mouvement se met à tourner s'il subit une force perpendiculaire à sa trajectoire.

Habituellement c'est une action sur le volant qui provoque une telle force. Sur l'autodrome, c'est la piste elle-même qui provoque cette force en réaction au poids de la voiture : le poids de la voiture provoque, en compensation une réaction perpendiculaire à la piste.

Cette réaction se décompose en une force verticale inverse au poids et une force horizontale qui fait tourner le véhicule vers l'intérieur du virage.

Le rayon du virage est déterminé par la formule :

$$r = \frac{v^2}{g \cdot \text{tg}(a)}$$

Compte tenu du profil en travers de la piste, l'inclinaison de celle-ci augmente lorsque l'on se déplace vers l'extérieur :

- si le rayon est égal au rayon de la piste, la voiture suit seule sa trajectoire,
- si la vitesse est trop élevée, le rayon augmente et le véhicule monte sur la piste pour se stabiliser,
- si la vitesse est trop faible, le rayon diminue et le véhicule descend sur la piste pour se stabiliser,
- en résolvant l'équation de manière

inverse, on peut déterminer la vitesse d'équilibre en tout point de la piste,

- avec une inclinaison de 47° et un rayon de 268 m on obtient une vitesse d'équilibre au sommet de l'anneau de 191 km/h !
- avec action sur le volant Jean-Pierre Beltoise détient le record de 265 km/h.

1933 : ruban d'acier

La plus ancienne mission retrouvée dans nos archives consiste en un mesurage pour un record effectué en 1933. Malgré la courte distance (à peine plus de 140 mètres) en ligne droite, la précision est de rigueur puisque les réglementations imposent un mesurage à ±1/10 000 de la longueur. À cette époque, pas de distance-mètre électronique, le seul moyen de mesurer précisément une distance est le ruban d'acier, étalonné par le bureau international des poids et mesures. La dilatation de 17 millimètres, calculée au jour de la mesure, représentée 1,2/10 000 de la distance mesurée, sa prise en compte est donc indispensable pour assurer la précision requise.

1980 : Di3, HP 97, ruban d'acier, niveau direct

Dans le cadre de leurs essais les conducteurs se sont plaints du mauvais état de la piste et vers la fin des années 1970, l'UTAC a lancé une campagne de

rénovation de l'anneau. La première étape a consisté en la reprise de la charpente en béton armé qui supporte le virage est (le virage ouest étant pour sa plus grande partie construit en déblai). Les campagnes suivantes ont visé à la remise en état de la piste elle-même, dans sa partie supérieure. Compte tenu de la pente transversale supérieure à 45 degrés, le moindre écart en position d'une mesure est intégralement reporté en altimétrie. Il est donc impératif de disposer d'un modèle mathématique de la piste afin de pouvoir implanter précisément les points à relever.

Les seules informations disponibles sur le site sont sous la forme d'un feuillet A4 donnant les largeurs et hauteurs de la piste en ses bords ainsi qu'à 1/3 et 2/3 de la largeur. Les longueurs de différents éléments : lignes droites, virages et raccords ainsi que le rayon des parties circulaires des virages y figurent également. Une phrase nous permet de déterminer la forme des raccords : *on se servira des données calculées dans les cercles en les réduisant proportionnellement à la distance parcourue.* C'est LA caractéristique d'une clothoïde. Nous disposons donc de tous les éléments pour calculer un modèle des bords de la piste mais il faut encore le placer correctement sur le site.

Il n'existe sur place aucun endroit permettant de voir l'intégralité de la piste. D'autre part les appareils dispo-

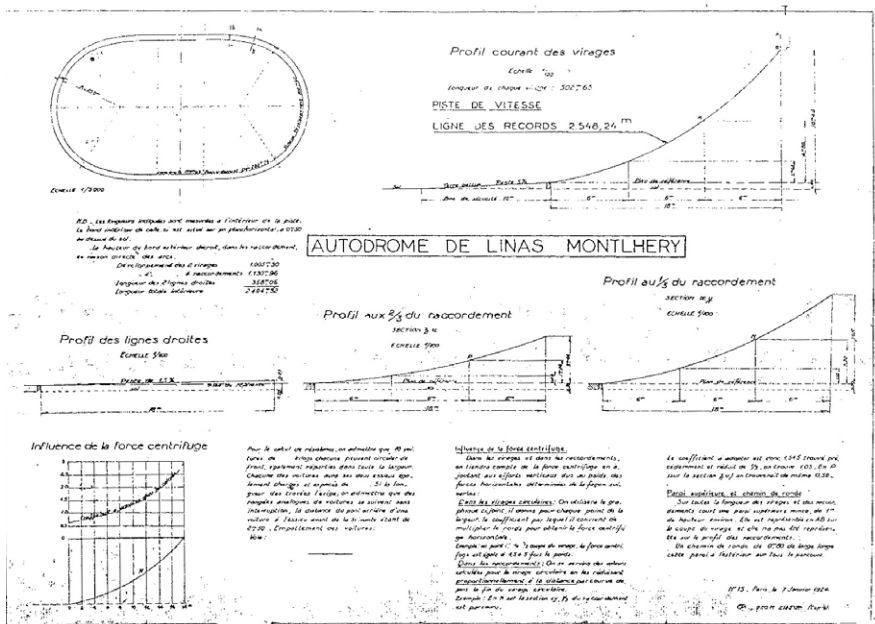


Figure 3. Les informations disponibles sur l'anneau



nibles à l'époque ne disposent pas d'une portée suffisante pour mesurer en une seule fois un objet de plus d'un kilomètre de long sur 500 mètres de large. Il a donc été nécessaire d'établir une polygonale précise malgré les contraintes (accès impossible à la piste en journée, zone boisée dense couvrant la majeure partie de l'intérieur de l'anneau...). De cette polygonale c'est le bord extérieur, malgré les difficultés d'accès (impossibilité de se déplacer à pied, vide de 10 à 12 mètres de l'autre côté des glissières...) qui a été relevé car le bord intérieur est très mal défini (confondu avec d'autres espaces bétonnés, mangé par l'herbe, cassé...).

À partir de ces relevés nous avons été en mesure de définir un nouveau modèle s'adaptant au mieux aux données théoriques, même si nous avons dû réduire l'un des rayons de 25 cm et que les clothoïdes des deux virages n'ont pas la même longueur. De plus ce modèle est lié au terrain et permet donc les calculs nécessaires et leur mise en œuvre sur le site.

La piste est divisée en travées de 35 mètres de long environ. Et c'est une à deux travées maximum qui seront renouvelées chaque année, tant pour des questions financières que pour la durée de fermeture de la piste que ces travaux entraînent. Pour des raisons pratiques, seul le profil en long est rectifié et ce sont quatre profils en long qui sont implantés dans la moitié supérieure de la piste (un point tous les mètres) puis relevés au niveau direct. Ce choix permet de garantir une précision maximale sur les altitudes des points au détriment du rattachement des profils entre eux.

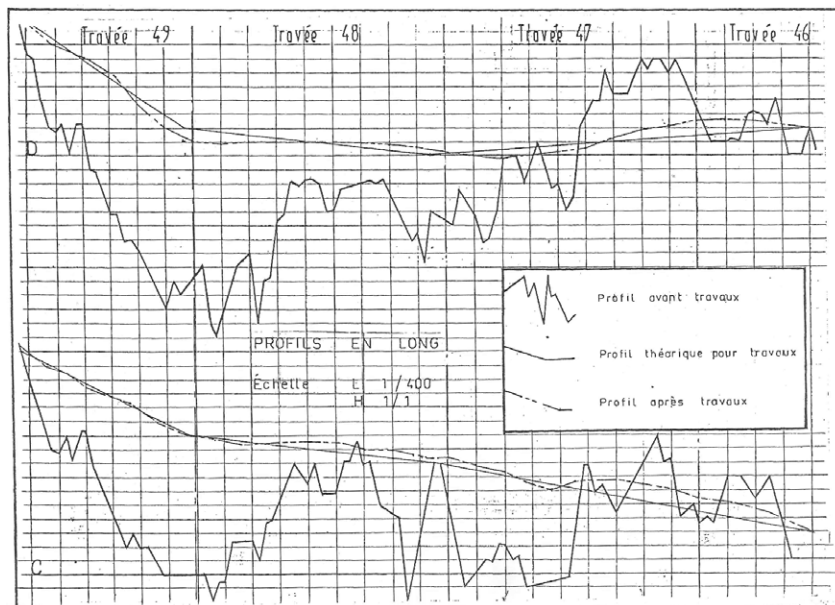


Figure 5. Récolement des travaux réalisés

Pour leur matérialisation, des points sont calculés puis implantés à 25 cm du bord intérieur de la piste et au milieu de la piste. Ces deux séries de points servent ensuite de base pour implanter au ruban d'acier les profils en long à relever.

Chaque profil en long, relevé de manière indépendante, est édité à l'échelle 1/200 en longueur et 1/1 en hauteur. Cette déformation énorme permet de mieux visualiser les écarts qui restent faibles d'un point à l'autre, mais rend aussi très facile la lecture par les maçons qui n'ont qu'à mesurer les corrections à apporter grandeur nature.

Le profil projet est étudié de façon à prendre en compte les raccords sur la chaussée existante aux extrémités du chantier mais également en limitant les corrections de façon à ne pas réduire ni

charger trop la dalle afin de ne pas l'affaiblir ni affaiblir la charpente.

Les parties les plus endommagées de la piste se situaient dans la partie circulaire du virage est, simplifiant ainsi les calculs effectués à l'époque sur une calculatrice HP97 avec imprimante, mais sans possibilité d'enregistrer les résultats. À chaque calcul les coordonnées des points et des stations doivent être saisies manuellement et vérifiées. Chaque calcul nécessitant la lecture du programme approprié à partir d'une carte magnétique. Après reprise de ces travées en arc de cercle est arrivé le moment d'intervenir sur le raccord avec la clothoïde. Après quelques heures de calcul et plusieurs mètres de papier imprimé, il est apparu que le programme d'implantation de clothoïde était bogué et il a fallu réécrire un nouveau programme moins universel

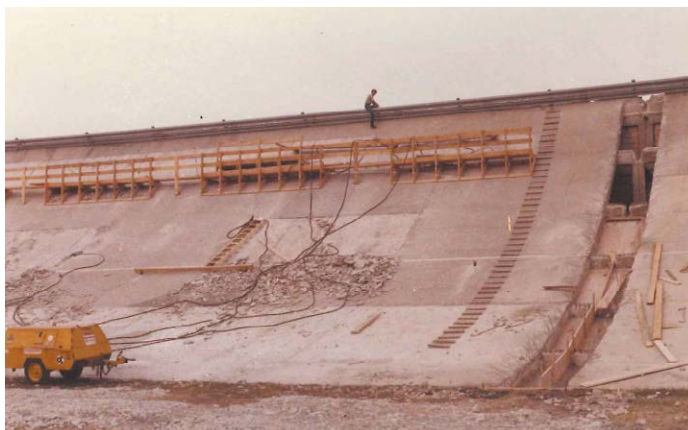


Figure 4. Travaux de réfection de la piste



Figure 6. Nivellement direct d'un profil en long

$$X = S - \frac{S^5}{40 A^4} + \frac{S^9}{3456 A^8} - \frac{S^{13}}{599\ 040 A^{12}} + \frac{S^{17}}{1\ 754\ 472\ 640 A^{16}}$$

$$Y = \frac{S^3}{6 A^2} - \frac{S^7}{336 A^6} + \frac{S^{11}}{42\ 240 A^{10}} - \frac{S^{15}}{9\ 676\ 800 A^{14}} + \dots$$

L'équation paramétrique d'une clothoïde en fonction de la distance parcourue



mais permettant d'obtenir les bonnes coordonnées des points à implanter, la difficulté essentielle étant d'arriver à la précision recherchée sans calculs superflus afin de ne pas allonger inconsiderablement leur durée.

1983 : Di3, HP85, ruban d'acier

L'UTAC nous a également missionnés, à la même époque, pour matérialiser des lignes correspondant aux trajectoires des voitures à diverses vitesses (90, 120, 150 et 180 km/h). Pour cela il a fallu compléter la modélisation 2D précédente par une étude 3D des profils en travers. Contacté, le CNETGEF a réussi à déterminer, toujours à partir du même document A4, que l'équation du profil en travers des virages correspondait à une parabole cubique d'équation $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$. Il a donc été nécessaire de programmer le calcul par moindres carrés de l'équation de chaque profil minimisant les écarts sur les

20 points relevés sur chaque profil en travers.

À partir de cette équation, il devient possible de déterminer la pente transversale en chaque point (correspondant à un rayon défini) du profil et de là en déduire la vitesse d'équilibre à cet endroit (la pente transversale est égale à la dérivée du profil au point considéré) $v = \sqrt{g \cdot tg(\alpha)}$.

Afin de ne pas dessiner des lignes sinueuses le long de la piste, la moyenne des déterminations de chaque virage a été utilisée (des écarts entre + 4 cm et - 8 cm ont été constatés, ce qui correspond à un écart de vitesse de 0,28 km/h). Malgré la différence de structure nous n'avons pas déterminé de différences significatives entre les deux virages, par contre les opérations de réfection ont effectivement perturbé le profil en travers.

Les valeurs de chaque profil ont été conservées telles quelles jusqu'au 1/3 des clothoïdes, puis reliées directe-

ment d'une clothoïde à l'autre, la ligne correspondant à une vitesse donnée se dilatant au fur et à mesure que la pente transversale diminue pour occuper toute la largeur de la piste dans les lignes droites où le dévers est uniforme.

2010 : station totale, ordinateur type PC, GNSS

Lors de divers mesurages pour des records comme les records d'accélération de la Peugeot électrique EX1 en 2010 (6 records battus ou établis) par exemple, il nous a fallu implanter des distances allant d'1/8 (201,17 m) à 1 mile (1 609,34 m), avec une précision inférieure à 1/1000 de la longueur imposée, le long du bord intérieur de la ligne des 90 km/h dans la partie inférieure de l'anneau et ce dans les deux sens de parcours de la piste afin d'éliminer tout effet favorable dû à la géométrie du circuit ou aux conditions météo. On notera que le simple fait de passer du bord intérieur au bord extérieur d'une ligne de 15 cm de large allonge le trajet de 90 cm !

Tous les éléments de la polygonale précédente ayant disparu à l'exception d'une seule station, il a fallu établir une nouvelle polygonale et comparer notre modèle mathématique aux nouveaux relevés géoréférencés par GNSS. Heureusement un certain nombre des marques de peintures implantées vingt ans auparavant restait visible sur la piste malgré le passage quotidien de véhicules. Nous avons utilisé l'appli PIC de TopStation (JSInfo), initialement conçu pour les plans d'intérieurs, afin de déterminer des contraintes supplémentaires imposant la distance de ces points aux centres. Le recalage du modèle sur les nouveaux relevés s'est fait avec des résidus inférieurs à 15 millimètres sur plus de 80 % des points relevés et un écart maximal de 8 mm sur le rattachement GNSS.

Afin d'assurer la précision des implantations, les distances les plus courtes (précision de 2 cm pour 200 m) l'ont été par visées directes. Au final, notre modèle initial, recalé, nous a permis de nous engager sur les distances implantées, leur précision, leur détermination,



Lignes de vitesse constante à Montlhéry.
← Ancienne ligne des 120 km/h effacée.

Figure 7

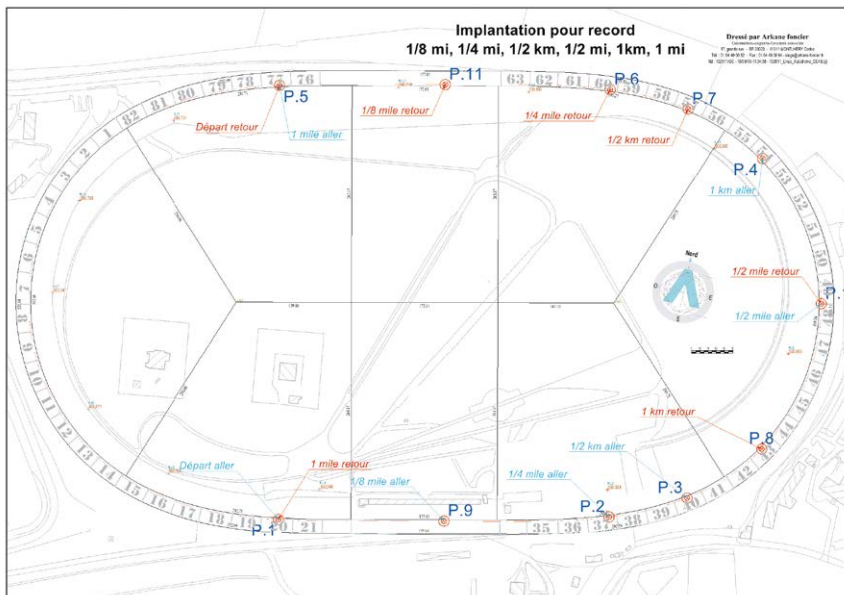


Figure 8. Les implantations pour le record de la Peugeot EX1

leur matérialisation, la déclivité maximale sur le parcours.

2014 : scanner 3D

Afin de pouvoir offrir certaines prestations au public (tours de circuits comme on en trouve sous forme de coffret cadeau), la piste doit être homologuée. Pour cela il faut fournir aux instances un plan figurant les divers équipements de sécurité ainsi que la longueur du parcours prévu.

Les conditions d'accès à la partie supérieure de la piste ayant évolué (nécessité de plaquer une échelle sur la piste, appuyée sur la roue arrière d'une voiture arrêtée au milieu de la piste) les relevés qui nous ont été demandés en 2014 ont été l'occasion d'utiliser la technologie du scanner 3D pour effectuer un relevé dense de l'ensemble des deux virages. Le relevé de chaque virage a pris environ une journée, en cheminant au moyen de 12 sphères réparties au mieux autour de chaque station sur la partie accessible de la piste.

Le recalage des stations (50 stations sur le kilomètre de chaque virage, le scanner utilisé ayant une portée d'une trentaine de mètres) sur la polygonale de 2010 a donné des écarts globaux de l'ordre de 5 cm soit une correction relative de l'ordre du millimètre sur chacune des stations.

140 millions de points ont été relevés

(avec une résolution de 1 mm à 10 m) en deux jours et demi, à comparer aux 30 profils de 20 points chacun relevés en deux semaines en 1983. Nous disposons désormais d'un modèle fin, calé sur le modèle mathématique, réutilisable sans nouvelle intervention sur le terrain malgré une manipulation encore lourde dans les logiciels de DAO classiques.

Le nuage de points assemblé dans RealWorks (Trimble) a été échantillonné à 20 cm et une ortho-image avec une résolution de 2 cm a été générée à partir de notre relevé.

Le nuage n'a pas été nettoyé car, compte tenu de la forme concave de la piste, il n'est pas possible d'appliquer une segmentation classique, aucun



Figure 9. Nuage de points échantillonné à 2 cm

point de vue ne permet d'isoler les points à supprimer du fond de la piste. L'échantillonnage topographique n'a pas encore été testé dans cette configuration du fait des délais de livraison à respecter.

Une fois importé dans TopStation le nuage de points permet de créer un modèle numérique de terrain. Dès lors les coordonnées du curseur affichent également l'altitude interpolée sur ce modèle de surface ce qui permet de monter le plan en DAO en 3D.

En conclusion

En plus de trente ans de mesures sur le site exceptionnel qu'est l'anneau de Linas-Monthléry en utilisant systématiquement les techniques les plus modernes du moment nous avons réussi à satisfaire notre client en lui fournissant des mesures répondant à ses attentes en termes de précision et de qualification de cette précision.

À aucun moment les modèles établis à l'origine, même s'ils ont été complétés et affinés, n'ont eu à être remis en cause. ●

Quelques liens :

UTAC : <http://www.utac.com>

Peugeot EX1 : https://www.youtube.com/watch?v=wgNCJQ_dm9s

Gymkana : http://www.dailymotion.com/video/xetyxu_ken-block-gymkhana-auto-drome-monthl_auto