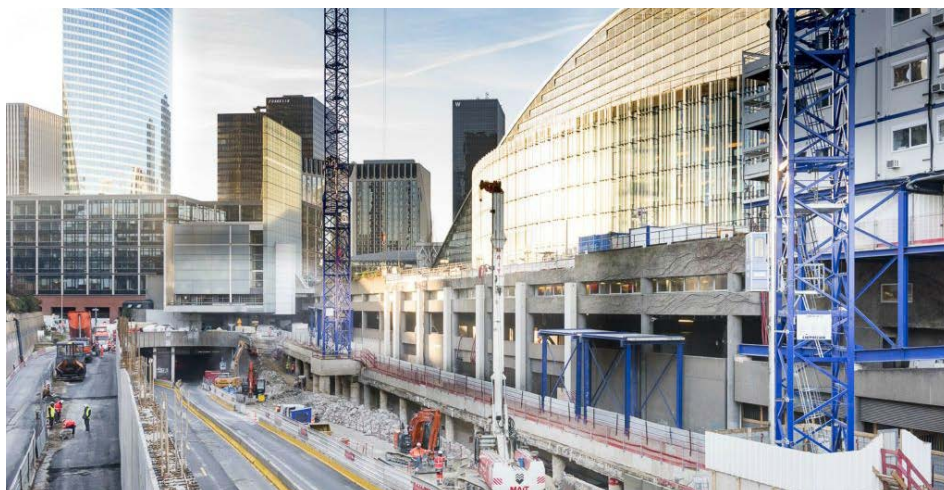


## La tour Trinity à la Défense



Soletanche Bachy - @ Cédric Hetsly

Dans le cadre du projet de la tour Trinity, TERRASOL a assuré la conception du système de fondations pour le compte d'UNIBAIL-RODAMCO (SCI Trinity Défense), puis la mission G4 de suivi des travaux au sein d'un groupement de maîtrise d'œuvre SETEC/CROCHON CBA/ARTELIA BÂTIMENTS ET INDUSTRIES.



© SCI TRINITY DEFENSE (UNIBAIL RODAMCO) / Crochon Brüllmann + Associés / L'autre Image Production

Les fondations de cet IGH R+33 doivent satisfaire plusieurs critères propres au site de La Défense (Paris) : emprise au sol restreinte, emprise du sous-sol occupée et préchargée par les parkings et fondations du CNIT et de la Coupole, maîtrise des déformations induites sur les avoisinants. De plus, leur mise en œuvre doit se faire sans interruption du trafic de la RN192 située sous l'ouvrage. Les fondations sont ancrées dans les Marnes et Caillasses du Lutétien, juste au-dessus de la dalle de Calcaire Grossier et des sols argileux de l'Yprésien, dont le comportement impacte les tassements à long terme de la tour. Ces contraintes ont motivé la conception de fondations sur quatre files de micropieux (notées A à D) ainsi qu'une file de pieux de contreforts (à côté de la file A) pour reprendre l'essentiel des efforts horizontaux. Le nombre de micropieux

total est de 994 et leur longueur varie de 9 à 27 m selon les files.

La conception des fondations (2012-2014) s'est basée sur la méthode des essais de pieux, qui préconise la réalisation d'essais de conformité avant la phase de production. Les études ont pris en compte l'interaction sol-structure via l'élaboration d'une matrice de souplesse liant le déplacement en tête de chaque zone d'appuis à la descente de charge dans toutes les zones. Ces résultats sont issus d'une modélisation PLAXIS 3D dans laquelle le comportement des fondations a pu être finement calé grâce à des calculs préalables avec le logiciel FOXTA. Couplée avec le modèle structure de SETEC TPI, la matrice de souplesse permet d'aboutir en une itération aux réactions définitives des appuis.

TERRASOL s'est consacrée à la mission de VISA des documents de l'entreprise BATEG (groupe VINCI) dès la fin 2015, et les travaux ont commencé début 2016. Les micropieux ont été exécutés par le sous-traitant VIPP entre mars 2016 et juin 2017, avec plusieurs interruptions nécessaires pour l'échelonnement des travaux afin de maintenir le trafic routier. Les 12 essais de conformité effectués ont attesté de la bonne qualité des Marnes et Caillasses et du Calcaire Grossier, conformément à nos études. Les 18 essais de contrôle ont validé la bonne réalisation des micropieux et confirmé la conception des fondations par micropieux proposée par TERRASOL. Seuls 6 micropieux (sur les 994 exécutés) ont fait l'objet d'une fiche de non-conformité (implantation ou qualité/quantité du coulis de gaine).

A l'aplomb de l'ouvrage sensible du CNIT, la file A est la plus profonde : sur 130 m de

## Édito

Terrasol s'est mobilisée sur tous les fronts en 2017 : Grand Paris Express et projets de transports urbains au sens large, tours et bâtiments exceptionnels, aménagements portuaires et aéroportuaires, installations industrielles... : ces ouvrages demandent des études géotechniques approfondies, dans un souci à la fois de sécurisation et d'optimisation des projets. Un grand merci à nos équipes qui ont su répondre présent et relever ces nombreux défis !

Et l'année 2018 s'annonce à son tour pleine de nouveaux challenges : au moment de l'impression de ces lignes, notre carnet de commandes nous amène à renforcer encore nos équipes, afin de pouvoir répondre à l'ensemble de nos clients : réalisation de synthèses géotechniques, missions de conception (avec notamment des modélisations 3D complexes), ou encore suivis de chantiers (missions G3 et G4) ; autant de domaines dans lesquels Terrasol dispose d'une forte expertise.

Ce numéro de la Lettre Terrasol illustre quelques-uns de nos projets en cours ici et ailleurs, ainsi que certains des développements scientifiques auxquels nous nous consacrons actuellement.

Toute l'équipe de Terrasol se joint à moi pour vous souhaiter une très belle année 2018 !

V. Bernhardt

longueur a été creusée une fouille de 10 m de profondeur dans les Marnes et Caillasses, soutenue par une paroi parisienne toute hauteur, tirantée sur deux lits. Les terrassements et les travaux de soutènements et fondations dans cette zone se sont déroulés de juillet 2016 à février 2017.

A ce jour, les piédroits sont terminés et la dalle de couverture est en cours de construction. L'auscultation des déplacements sur les différents soutènements se poursuit et les mesures n'excèdent pas les seuils fixés conjointement par TERRASOL et BATEG : seuil de vigilance égal à la moitié de la valeur donnée par le calcul, seuil d'alerte à 80% de la valeur de calcul et seuil d'arrêt à 100% de la valeur de calcul. Des cibles ont été installées récemment sous le noyau de la tour pour réaliser un état zéro des tassements.

La livraison de la tour est prévue au premier trimestre 2019.

A. Bergère, KV. Nguyen et E. Cazes



# Un nouveau terminal pour l'aéroport de Malé

Maldives



Crédit photo : Thinkstock

Dans le cadre d'un contrat de conception-réalisation pour la construction d'un nouveau terminal de l'aéroport des Maldives, le groupe SETEC accompagne la société SAUDI BEN LADEN GROUP, attributaire du marché, dans le cadre des deux principales phases d'études : les études préliminaires et les études d'exécution.

TERRASOL est intervenue dans le projet au sein des équipes du groupe SETEC : dès la première phase, nous avons établi le programme et le cahier de charge des reconnaissances de sol en les adaptant au mieux au contexte du site, à la nature du sous-sol, et aux moyens disponibles dans la région.

Suite à l'analyse de ces reconnaissances, TERRASOL a proposé et étudié diverses solutions de fondations (superficielles, profondes, par amélioration ou renforcement de sol), et orienté la conception vers une solution de massifs sur fondations profondes, bien adaptée à la stratigraphie de dépôts sableux sur un substratum de roches sédimentaires de coraux. Terrasol assure au stade des études d'exécution

une mission de second regard sur la solution de pieux battus en béton armé précontraint en cours d'exécution, avec analyse de la méthodologie de réalisation, des notes de calcul et des rapports sur les essais de chargement dynamiques.

A. Abboud

# Barrages Aisne - Meuse

France

Le projet de modernisation des barrages sur l'Aisne et la Meuse prévoit le remplacement des barrages à aiguilles, datant de la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, par des barrages automatiques équipés de bouchures gonflables à l'eau, permettant d'améliorer la navigabilité, de sécuriser les agents, ainsi que de fiabiliser et d'optimiser la gestion actuelle des fleuves.

Le groupement concepteur-constructeur COREBAM (plusieurs filiales de VINCI CONSTRUCTION FRANCE) a sollicité TERRASOL pour l'étude d'exécution des soutènements provisoires et définitifs en palplanches de 9 de ces nouveaux barrages, situés entre Revin (08) et Verdun (55), ainsi que sur la commune de Soissons (02).

Les barrages étudiés par TERRASOL sont constitués :

- d'une passe à poissons permettant d'assurer la continuité piscicole,
- de deux à trois passes de barrages du système de bouchure gonflable à l'eau,
- d'une à 2 piles en rivière et d'une culée de raccordement sur chacune des rives,
- ainsi que d'un local technique accueillant les organes de commande des équipements relatifs au fonctionnement de la bouchure gonflable à l'eau.



Crédit photo : Corebam

Les études effectuées ont permis de proposer diverses solutions de construction des soutènements ainsi que des optimisations techniques, tout en prenant en compte l'hétérogénéité des terrains et les contraintes d'exécution (espace limité, présence des ouvrages existants, refus de battage, ...).

KV. Nguyen et A. Preotu

# Variabilité spatiale : application aux barrages en terre

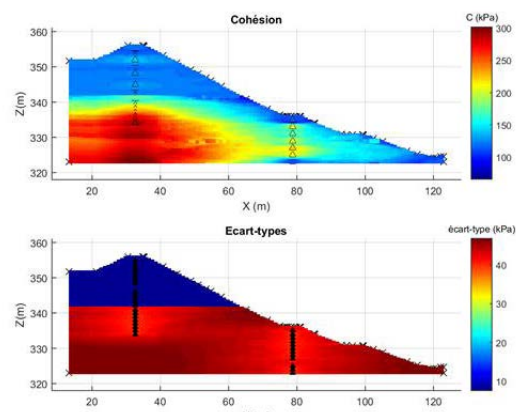
Nouveaux développements

Les justifications des ouvrages géotechniques suivent généralement des approches déterministes avec prise en compte de coefficients de sécurité partiels ou globaux. Ces coefficients sont évalués pour que dans les cas courants, le niveau de sécurité de l'ouvrage respecte les probabilités de défaillance (ou les indices de fiabilité) imposées dans les documents normatifs. Ils considèrent une incertitude type sur la donnée d'entrée au sein du calcul.

Nous développons à TERRASOL, en collaboration avec EDF / CIH, une approche pour apprécier la dispersion spatiale des paramètres de dimensionnement sur l'indice de défaillance. Utilisant la position de la donnée d'entrée géotechnique afin d'optimiser le calcul, elle ne considère plus la dispersion naturelle comme une véritable incertitude de mesure mais comme une information supplémentaire à intégrer au calcul.

La méthode consiste à définir des distances et modèles de corrélation spatiale des paramètres géotechniques. Le modèle est alors divisé en macro-éléments indépendants, de dimensions comparables aux distances de corrélation. C'est ici le krigeage qui est adopté. C'est une méthode d'interpolation intégrant la corrélation spatiale, capable d'évaluer l'espérance et l'écart-type de l'erreur pour chaque macro-élément en fonction de la position de la donnée. L'écart-type est alors le plus faible au niveau de la position de la donnée. Le krigeage est associé à la méthode probabiliste des surfaces de réponse, ou RSM. Rapide et fiable, cette méthode permet, à partir d'un nombre limité de calculs déterministes, de calculer avec précision un indice de fiabilité  $\beta$  pour l'ouvrage.

La méthode mise au point est testée sur un cas réel d'ouvrage en terre et montre des résultats encourageants. Le niveau de sécurité est augmenté pour cet ouvrage par rapport à l'utilisation de méthodes déterministes ou probabilistes classiques, notamment grâce à la précision apportée sur la localisation des zones critiques du sol.



A. Bergère, H. Pillard et F. Cuiru

# Résidence l'Hévana à Méribel les Allues

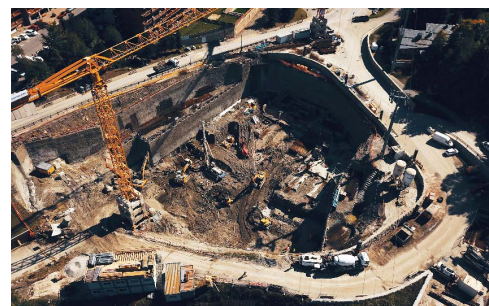
France

Au cœur de la Station de Méribel les Allues, le groupe PIERRE & VACANCES se dote d'une résidence de prestige de 95 appartements.

La réalisation des fondations et soutènements de cet ensemble architectural construit sur quatre niveaux de parking souterrain a été attribuée à FRANKI FONDATION sur la base d'une solution variée substituant aux pieux, prévus dans la conception du projet, des fondations superficielles (semelles et radiers) supportées par des inclusions rigides.

Dans le cadre de la mission d'assistance à l'Entreprise qui lui a été confiée, TERRASOL a apporté son expertise géotechnique sur la conception et la justification des fondations de cette solution variée :

- Définition des modèles géotechniques de calcul dans un contexte hétérogène : localisé dans l'axe du Doron, torrent canalisé et remblayé dans les années 1980, le site est composé de remblais relativement compacts d'épaisseur fluctuante surmontant des moraines de puissance variable.
- Définition des maillages d'inclusions et adaptation des géométries des radiers et semelles de fondation permettant de contrôler les déformations dans un contexte géotechnique et de charges hétérogène ; étape ayant nécessité la réalisation d'itérations avec le bureau de structure.
- Justifications géotechniques du système de fondations.



Crédit photo : Franki Fondation

A. Beaussier

## Analyse du risque de liquéfaction

Nouveaux développements

TERRASOL est fréquemment sollicitée pour des analyses d'aléa liquéfaction (par SNCF, EDF, CEA, ...). Celles-ci sont aujourd'hui quasi systématiquement conduites par recours à la procédure semi-empirique dite « NCEER », formalisée par Youd et Idriss (2001), à la suite des séminaires NCEER/NSF de 1996/1998. Elle repose sur l'introduction de facteurs de sécurité basés sur la comparaison entre la contrainte de cisaillement induite par le séisme de projet (CSR) et la résistance au cisaillement cyclique des matériaux du site (CRR), déterminée à partir de l'exploitation d'essais in situ.

Ces études sont l'occasion de relever les ambiguïtés, voire les insuffisances, des guides de recommandations spécifiques et de l'arsenal normatif existant.

TERRASOL mène à ce sujet une réflexion sur les principaux points d'achoppement de l'implémentation de la procédure NCEER dans le cadre normatif applicable aux différentes catégories d'ouvrages et en lien avec les hypothèses initiales du domaine de validité définies par ses auteurs, réflexion qui se traduit dans la pratique par le développement en cours d'un logiciel dédié.

Cet outil incorporera des indicateurs complémentaires existant dans la littérature (disposition spatiale des épaisseurs liquéfiables cumulées, indice de potentiel liquéfaction, indice de gravité vis-à-vis de la liquéfaction), qui, associés à l'évaluation des tassements sismo-induits, permettront d'apporter un éclairage spatial à l'analyse restreinte aux facteurs de sécurité, ouvrant la perspective à des cartographies multicritères de l'aléa.



M. Hocdé et F. Cuir

Crédit photo : 松岡明芳

## Train Express Régional de Dakar

Sénégal

La réalisation du Train Express Régional (TER) à Dakar fait partie du plan de développement économique du Sénégal. Ses deux fonctions principales sont d'assurer une desserte de la banlieue de Dakar, en substitution du Petit Train de Banlieue (PTB) existant, et de fournir une liaison avec le nouvel Aéroport International Blaise Diagne (AIBD).

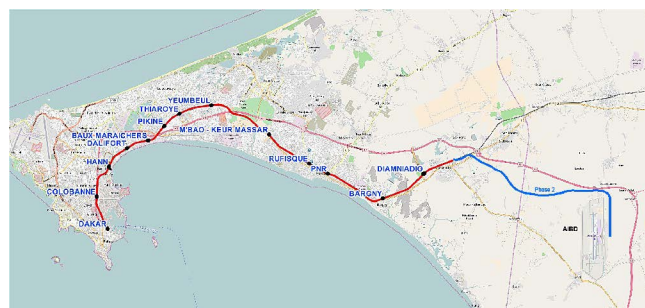
Le projet du TER de Dakar est divisé en deux phases : la phase 1 correspond à l'aménagement et l'élargissement de l'infrastructure existante entre les gares de Dakar et de Diamniadio (36 km) ; et la phase 2 porte sur la construction d'une ligne nouvelle entre la Gare de Diamniadio et l'aéroport AIBD (19 km).

EIFFAGE a confié au groupe SETEC les études APD du projet et l'assistance technique pendant la durée des travaux. Au sein des équipes SETEC, TERRASOL est responsable de l'analyse géotechnique des fondations des ouvrages d'art de tout le tracé. Une centaine d'ouvrages est concernée : ponts-routes, ponts-rails et passerelles piétonnes.

La nature des sols le long du tracé est très variée. De manière générale, le projet peut être divisé en trois secteurs géologiques distincts :

- Secteur 1 : 21 km côté Dakar, constitués de sables dunaires d'épaisseur variant entre 15 et 40 m ;
- Secteur 2 : environ 20 km dans la partie centrale, avec des formations marseuses et marno-calcaires, surmontées d'une couche argileuse ;
- Secteur 3 : les 14 derniers km côté aéroport, avec des grès, des argiles et des dépôts latéritiques.

L'un des grands défis du projet est son planning, puisque la mise en service de la ligne est prévue le 14 janvier 2019. A ce jour, les études de la phase 1 sont terminées et celles de la phase 2 sont en cours.



S. Delattre et KV. Nguyen



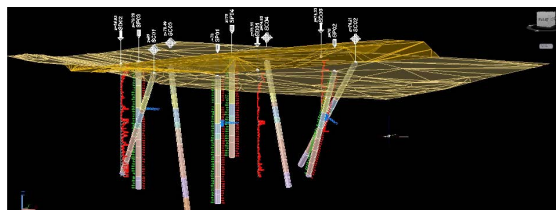
# Rubrique logiciels



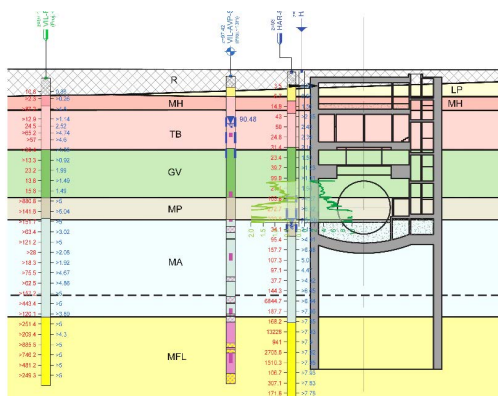
## Stratcad v2.0

Depuis quelques années, TERRASOL développe et commercialise Stratcad, un module spécialement conçu pour le dessin de données géotechniques au sein de votre logiciel de D.A.O. Il inclut des outils d'implantation et des outils de création de log de sondages, tous largement paramétrables.

La nouvelle version v2.0 constitue une évolution majeure. En plus des fonctionnalités de base, elle permet de construire et d'implanter les logs de sondages en 3D. Les objets volumiques sont parfaitement gérés.



Les données des sondages peuvent être représentées dans le modèle 3D sous forme d'objets volumiques en prenant en compte leur inclinaison éventuelle. Les données sont projetées sur un ou plusieurs plans de coupes qui permettront d'élaborer un profil géotechnique.



M. Anic-Antic

## Congrès

Terrasol a participé récemment aux conférences suivantes :

- Congrès International de Mécanique des Sols et de Géotechnique (ICSMGE), Séoul (Corée du Sud), septembre 2017
- 8<sup>ème</sup> édition des Journées Africaines de Géotechnique, Lomé (Togo), novembre 2017
- Congrès International AFTES, Paris, novembre 2017
- Symposium International Géorail, Marne-La-Vallée, novembre 2017
- Conférence IGC 2017 (Indian Geotechnical Conference), Guwahati (Inde), décembre 2017

Geogrup, notre distributeur en Turquie, nous a également représentés lors de 2 événements en Turquie :

- 3<sup>rd</sup> International Soil-Structure Interaction Symposium
- 7<sup>th</sup> Geotechnical Symposium with International Participation

## Formations

Terrasol est désormais référencée sur la plateforme Datadock, ce qui permet le financement de nos formations par des organismes externes. Nos formations sont l'occasion d'aborder et d'échanger sur des sujets géotechniques variés, bien au-delà de nos logiciels.

Les formations inter-entreprises d'ores et déjà programmées pour l'année 2018 sont les suivantes :

- Talren v5 à Paris le 27 mars 2018
- K-Réa v4 à Paris le 28 mars 2018
- Foxta v3 à Paris le 29 et 30 mars 2018



Formation pour la Direction des Routes au Maroc (Oct 2017)

M. Huerta

## Publications et interventions récentes

- Bases de l'interaction sol-structure sous séisme : principes généraux et effets inertiels (S. Brulé et **F. Cuira**) – Fascicule C251 des Techniques de l'Ingénieur, juillet 2017
- Pratique de l'interaction sol-structure sous séisme (**F. Cuira** et S. Brulé) - AFNOR Éditions, décembre 2017

### Congrès International de Mécanique des Sols et de Géotechnique (ICSMGE), septembre 2017

- Deep foundation systems of ultra-rise buildings : the Entisar tower in Dubai (G. Pereira, H. Poulos et **A. Bergère**)
- Etat de l'art sur les méthodes de calcul d'un pieu et d'un groupe de pieux sous chargement sismique (**J. Perez Herreros, F. Cuira, P. Kotronis** et S. Escoffier)
- Approche simplifiée par calcul semi-analytique pour le dimensionnement d'inclusions rigides sous semelle (**N. Frattini, F. Cuira** et B. Hor)
- Apport des éléments finis dans le dimensionnement d'écrans de soutènement par rapport aux méthodes classiques : étude de cas Gare Fort D'Issy Vanves Clamart (**K. Nejjar, D. Dias, G. Chapron, F. Cuira, H. Le Bissonnais** et V. Fluteaux)
- Glissements sous-marins fréquents au niveau de Cap Lopez au Gabon en Afrique de l'Ouest (E. Green, **B. Simon, C. Babin, KV. Nguyen**)

### Congrès International de l'AFTES, Paris, novembre 2017

- Méthode 3D simplifiée pour la prévision des tassements générés par le creusement d'un tunnel au tunnelier pressurisé (**JP. Janin, P. Renier** et **H. Le Bissonnais**)
- La ligne 15 Sud-Ouest du Réseau de Transport du Grand Paris : conception et enjeux géotechniques du tronçon T3C (**H. Le Bissonnais, G. Chapron, PL. Veyron, G. Pons** et V. Fluteaux)
- Apports de la modélisation aux éléments finis des excavations profondes dans l'Argile Plastique dans le contexte particulier du projet Grand Paris (**K. Nejjar, F. Cuira, G. Chapron, H. Le Bissonnais** et D. Dias)
- Conception technique de la gare RER sous le CNIT à Paris-La Défense : maîtrise des risques constructifs dans un environnement complexe (L. Canolles, **J. Marlinge, L. Berend, F. Lanquette, M. Pré**)
- Méthodologie de détection des zones déstructurées et des cavités dans les terrains gypseux parisiens le long de la ligne 16 du Grand Paris Express (E. Egal, C. Kreziak, A. Saitta, **J. Marlinge** et G. Priol)



Scannez ce QR Code avec votre Smartphone

### Siège social

Immeuble Central Seine  
42-52 quai de la Râpée  
75583 Paris Cedex 12  
France

Tel : +33 (0)1 82 51 52 00  
Fax : +33 (0)1 82 51 52 99  
Email : [info@terrasol.com](mailto:info@terrasol.com)

### Agence Rhône-Alpes

Immeuble le Crystallin  
191/193 cours Lafayette  
69458 Lyon Cedex 06  
France

Tel : +33 (0)4 27 85 49 35  
Fax : +33 (0)4 27 85 49 36  
Email : [lyon@terrasol.com](mailto:lyon@terrasol.com)

### Représentation au Maroc

Setec Maroc  
3, rue Abou Hanifa  
Agdal  
Rabat-Maroc

Tel : +212 (661) 25 53 89  
Fax : +212 (529) 03 64 00  
Email : [t.elmalki@terrasol.com](mailto:t.elmalki@terrasol.com)

### Terrasol Tunisie

2, rue Mustapha Abdesslem  
El Menzeh  
2037 Tunis  
Tunisie

Tel : +276 71 23 63 14  
Fax : +256 71 75 32 88  
Email : [info@terrasol.com.tn](mailto:info@terrasol.com.tn)

Conception, mise en page :  
Shaima Mirenda