

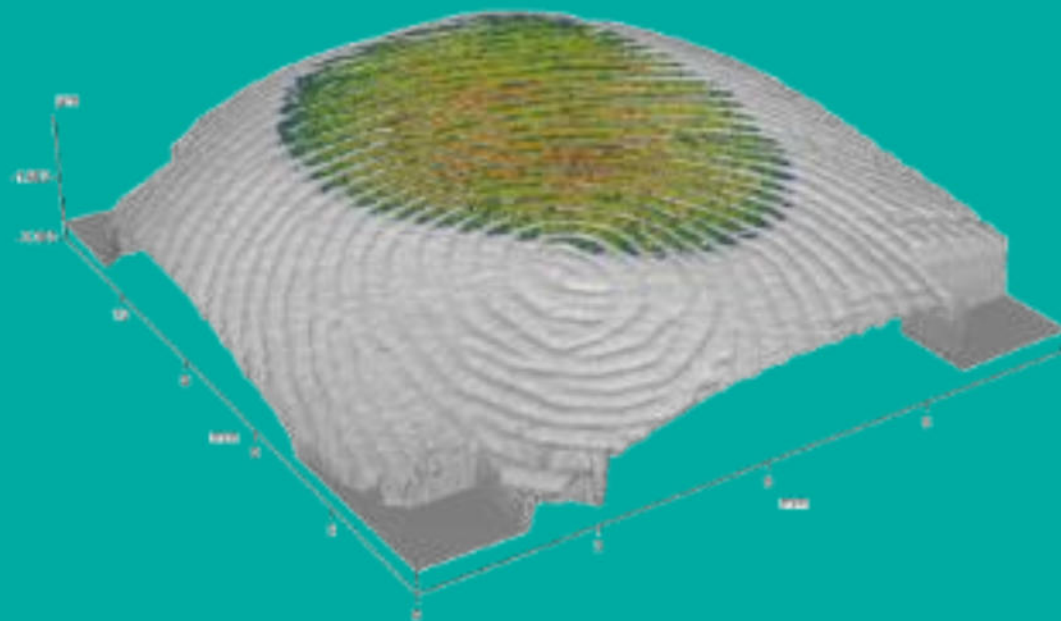


PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DU DOIGT LORS DU CONTACT



GDR TACT 24 novembre 2023

ISIR à Sorbonne Université site de Jussieu



Luc Carpentier , PH Cornuault, ...

Contact : luc.carpentier@univ-fcomte.fr

*Département Mécanique Appliquée, Institut
Femto-st*



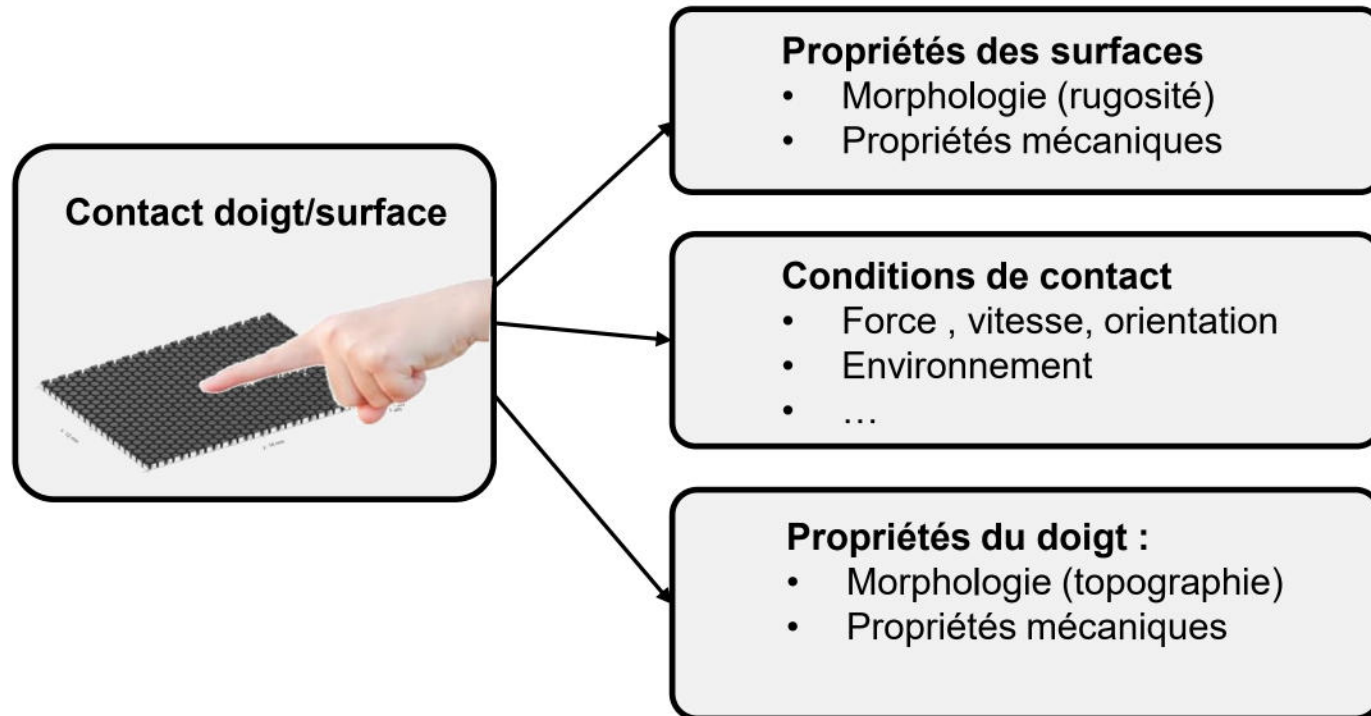
OBJECTIFS

- Etudier le comportement mécanique in vivo d'un doigt en contact avec une surface : forces, aires de contact, déformations, pressions locales ...
- Etablir des liens avec le comportement tribologique et la perception tactile.



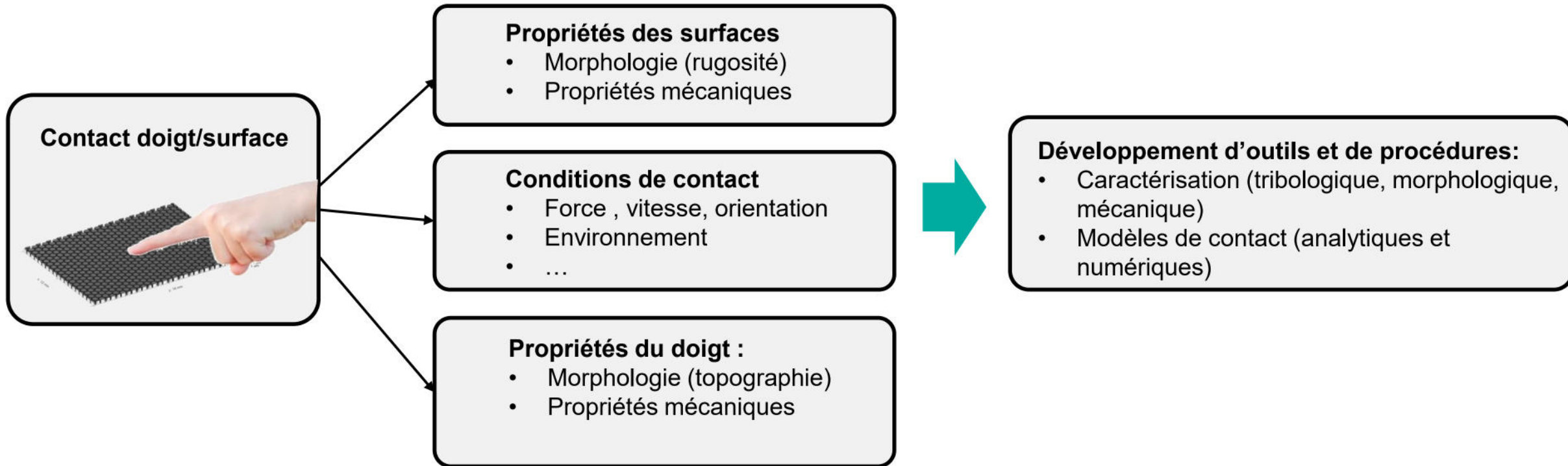
OBJECTIFS

- Etudier le comportement mécanique in vivo d'un doigt en contact avec une surface : forces, aires de contact, déformations, pressions locales ...
- Etablir des liens avec le comportement tribologique et la perception tactile.



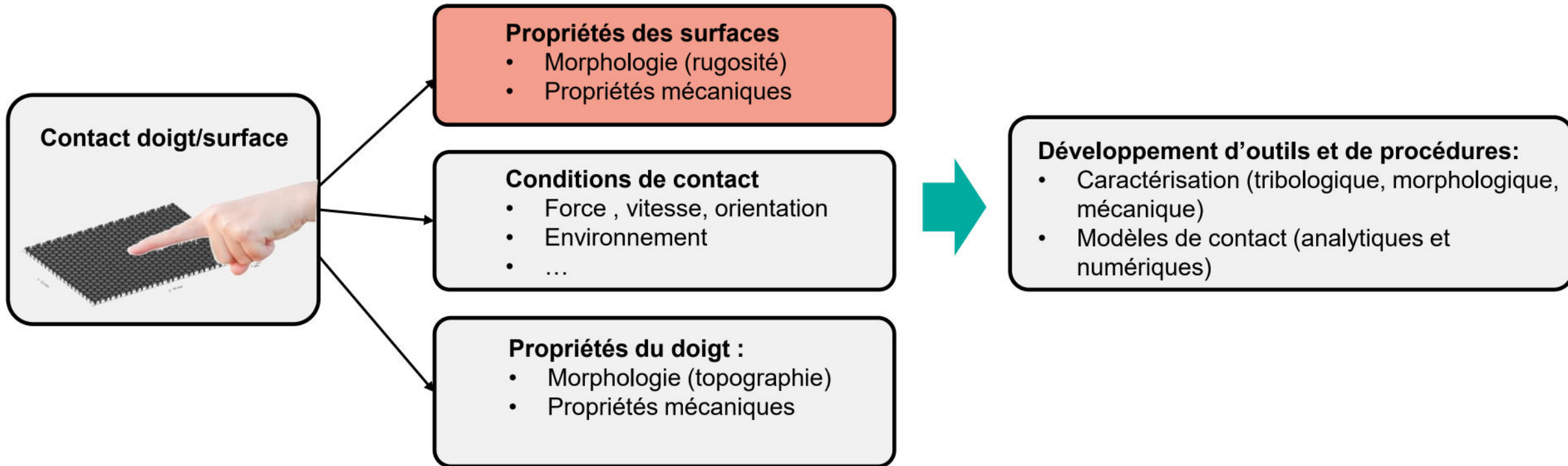
OBJECTIFS

- Etudier le comportement mécanique in vivo d'un doigt en contact avec une surface : forces, aires de contact, déformations, pressions locales ...
- Etablir des liens avec le comportement tribologique et la perception tactile.



OBJECTIFS

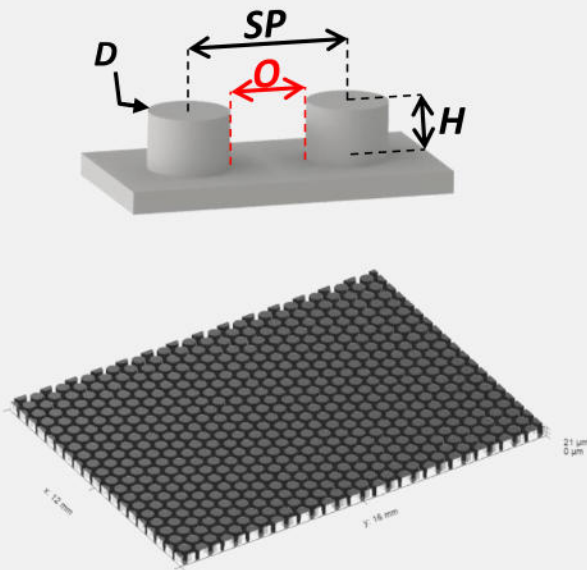
- Etudier le comportement mécanique in vivo d'un doigt en contact avec une surface : forces, aires de contact, déformations, pressions locales ...
- Etablir des liens avec le comportement tribologique et la perception tactile.



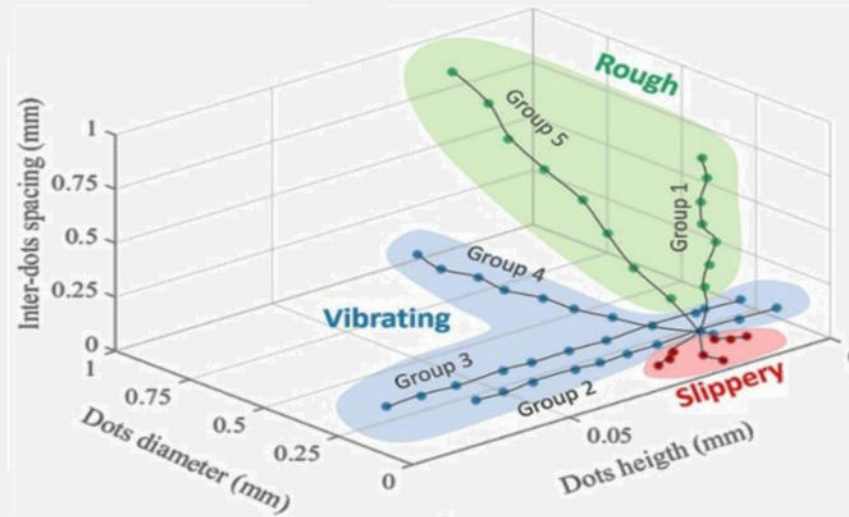
SURFACES TEXTUREES

- Gravure plasma, photolithographie et réplcation (polymère rigide (PU))
- Plots cylindriques, maillage hexagonal

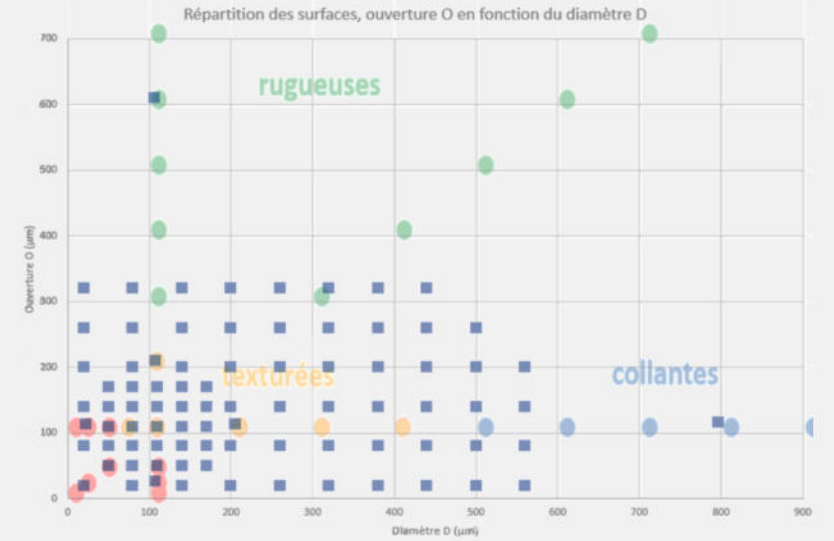
Caractéristiques



perception tactile



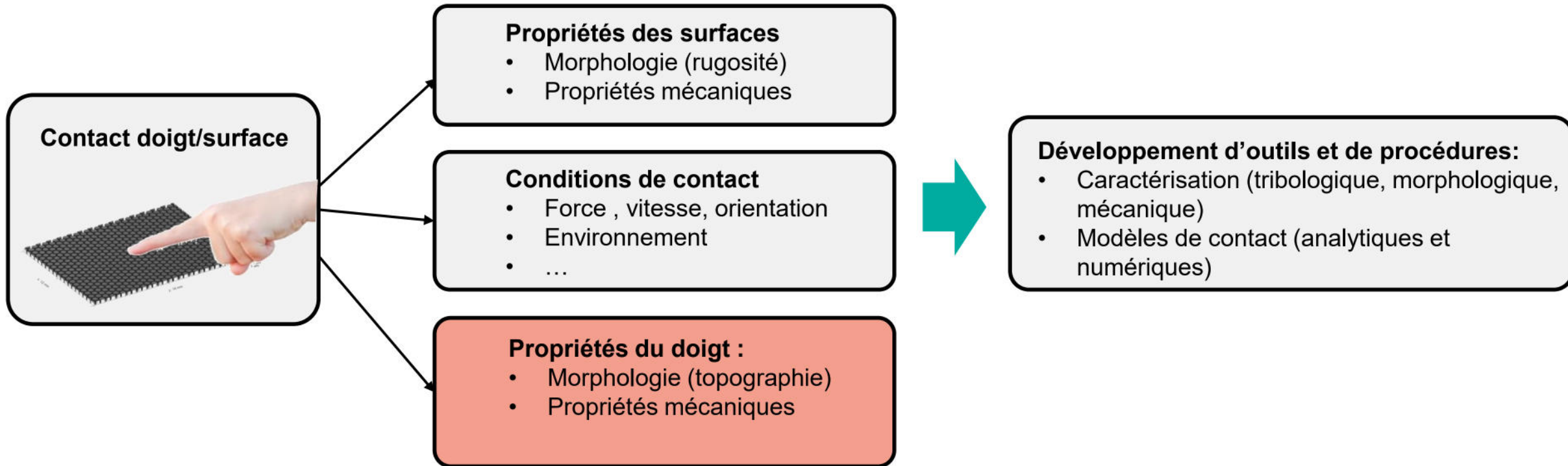
Benjamin Weiland, 3 parametres (54)



Etienne Louyot, 2 paramètres (+ 64)

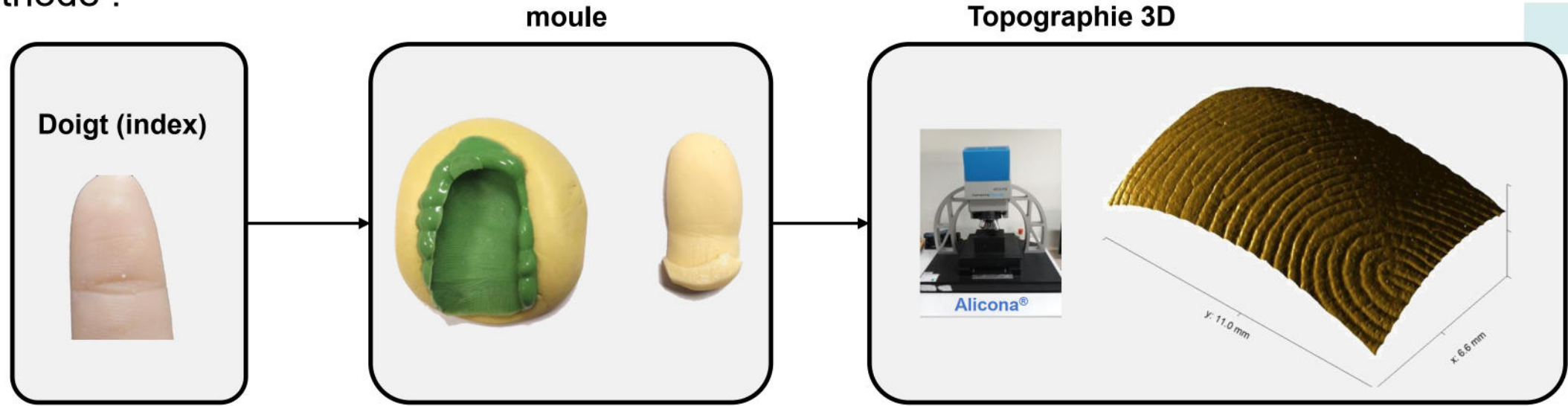
OBJECTIFS

- Etudier le comportement mécanique in vivo d'un doigt en contact avec une surface : forces, aires de contact, déformations, pressions locales ...
- Etablir des liens avec le comportement tribologique et la perception tactile.



MORPHOLOGIE DU DOIGT

- Méthode :

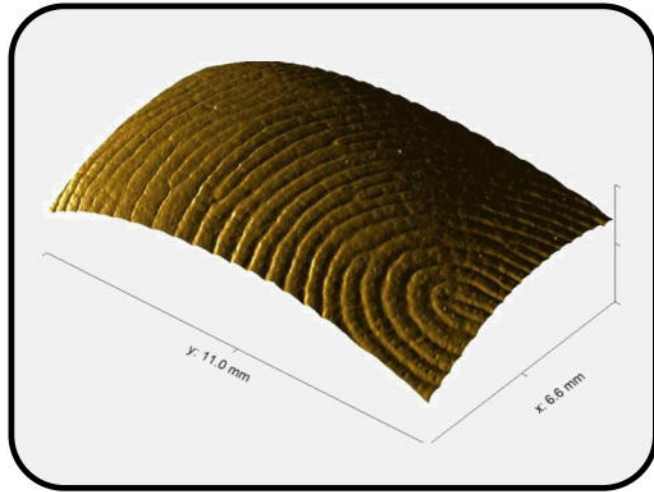


- Utilisation du modèle 3D
- Modélisation du doigt

MODÉLISATION (MORPHOLOGIE) DU DOIGT



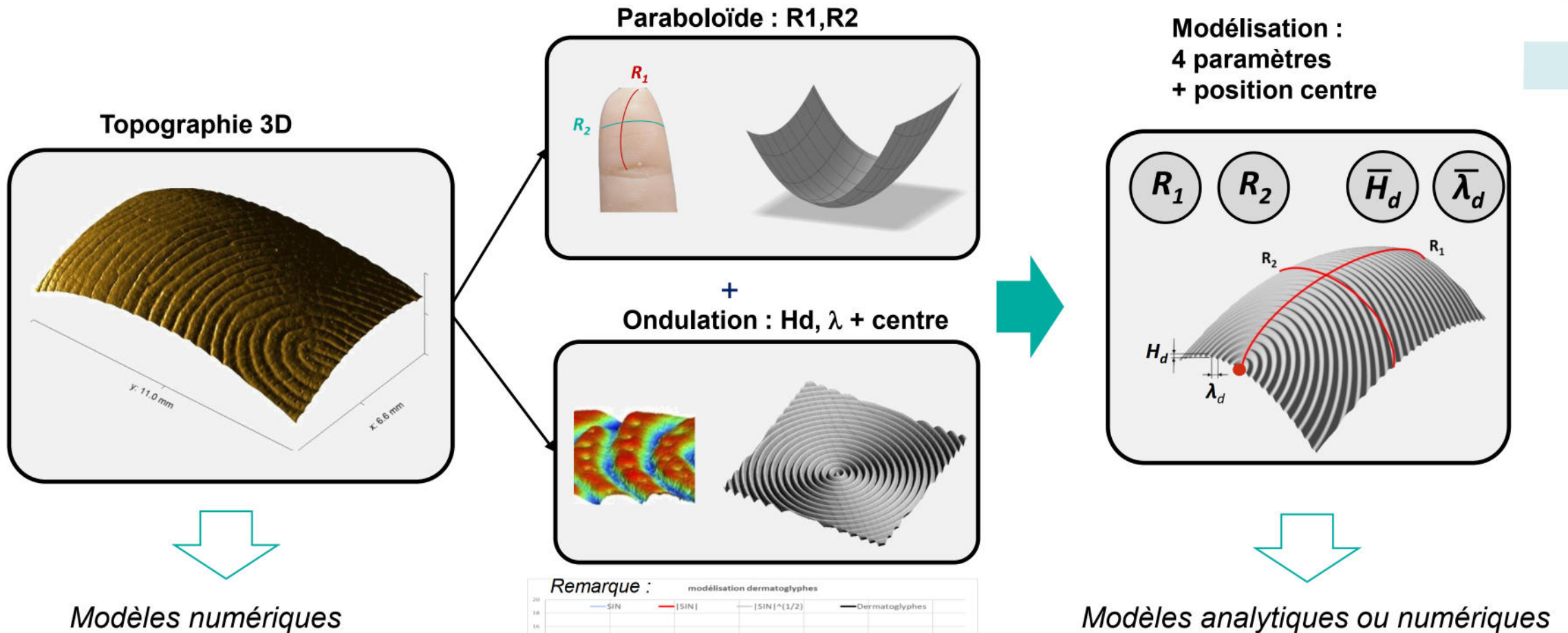
Topographie 3D



Modèles numériques

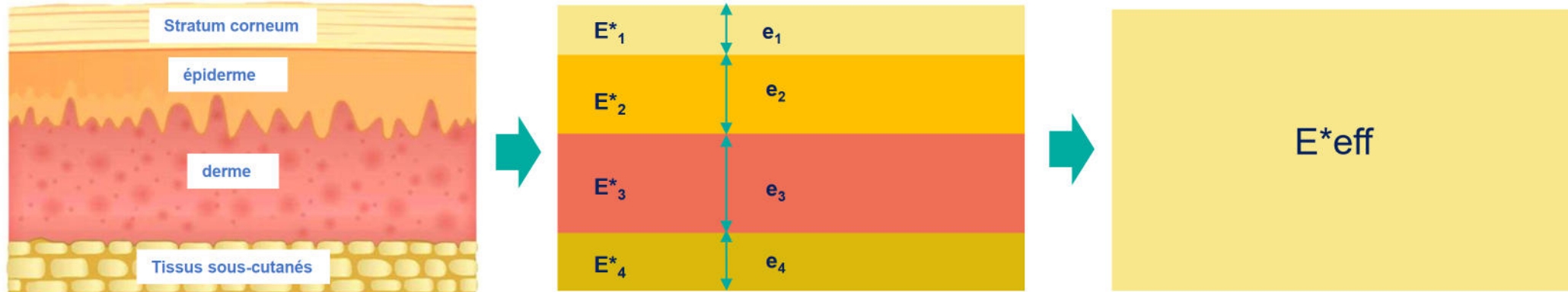


MODÉLISATION (MORPHOLOGIE) DU DOIGT



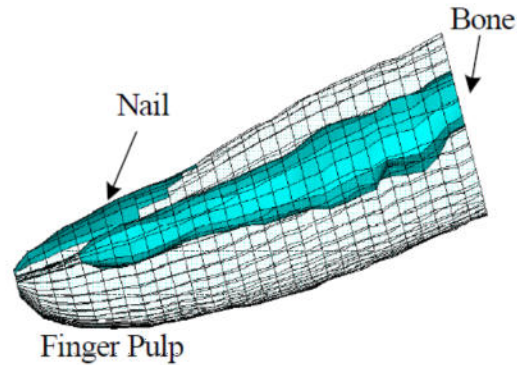
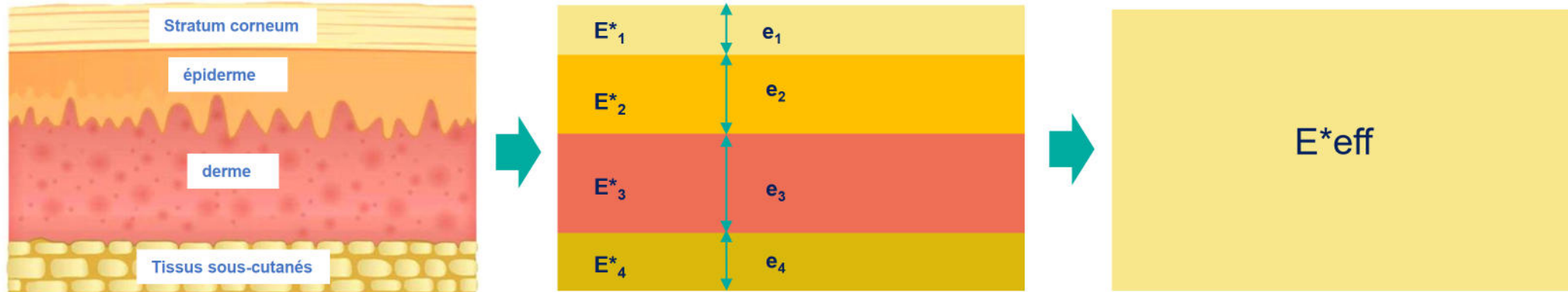
PROPRIÉTÉS MÉCANIQUE DU DOIGT

- La peau est complexe : multicouches, non homogène, non isotrope etc..



PROPRIÉTÉS MÉCANIQUE DU DOIGT

- La peau est complexe : multicouches, non homogène, non isotrope etc..

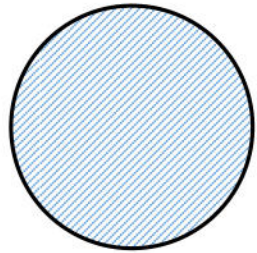
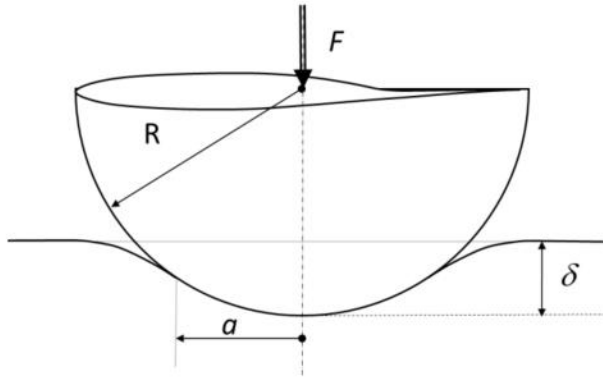


- On cherche à mesurer directement un **module d'élasticité effectif** du doigt (index)

MÉCANIQUE DU CONTACT

- Théorie de HERTZ (bille/plan)

Hypothèses : homogène, isotrope, semi-infini, élasticité, $a \ll R$



Aire de contact

$$a^3 = \frac{3FR}{4E^*} \quad \delta = \frac{a^2}{R}$$

Géométrie : R

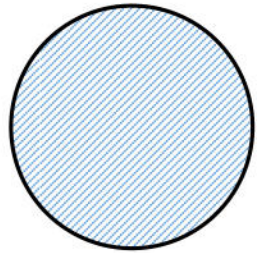
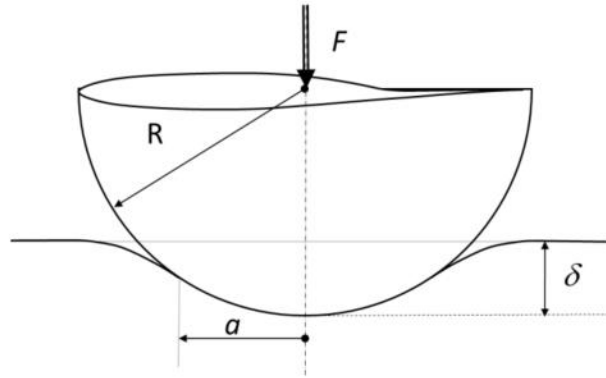
Déformation : δ et a

Contrainte : F

MÉCANIQUE DU CONTACT

- Théorie de HERTZ (bille/plan)

Hypothèses : homogène, isotrope, semi-infini, élasticité, $a \ll R$



Aire de contact

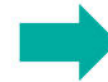
$$a^3 = \frac{3FR}{4E^*} \quad \delta = \frac{a^2}{R}$$

$$E^* = \frac{3F}{4R^{1/2} \delta^{3/2}} = \frac{3FR}{4a^3}$$

Géométrie : R

Déformation : δ et a

Contrainte : F

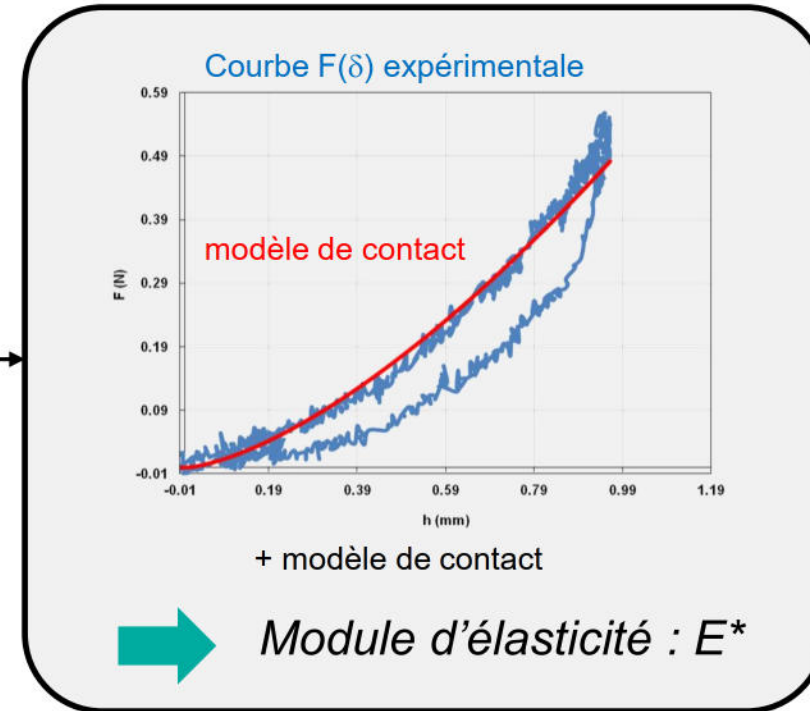
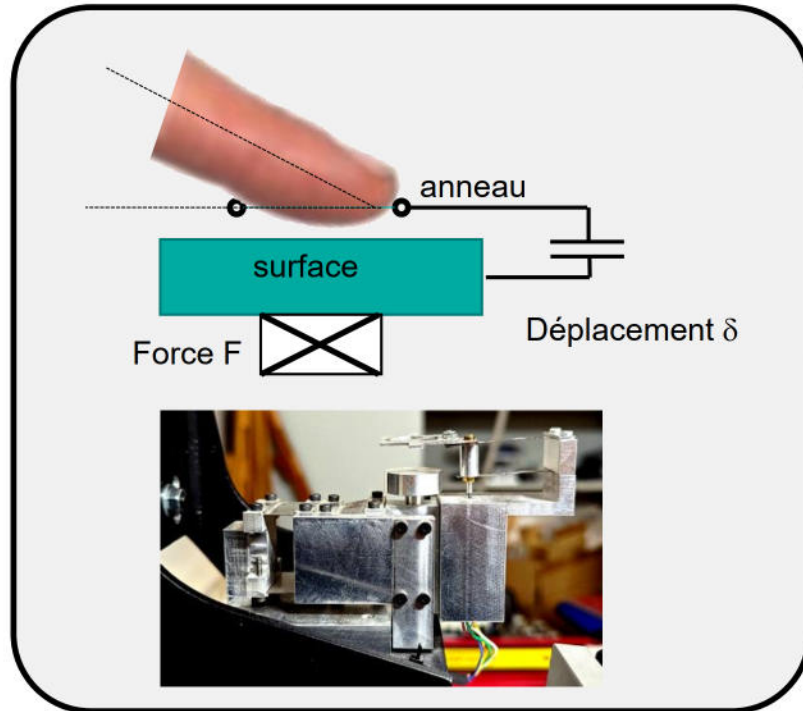


Module d'élasticité : E^*

- Connaissant la géométrie (R), la mesure couplée d'une contrainte (F) et d'une déformation (δ ou a) permet de remonter aux caractéristiques élastiques (E^*).

MÉTHODES DE MESURE

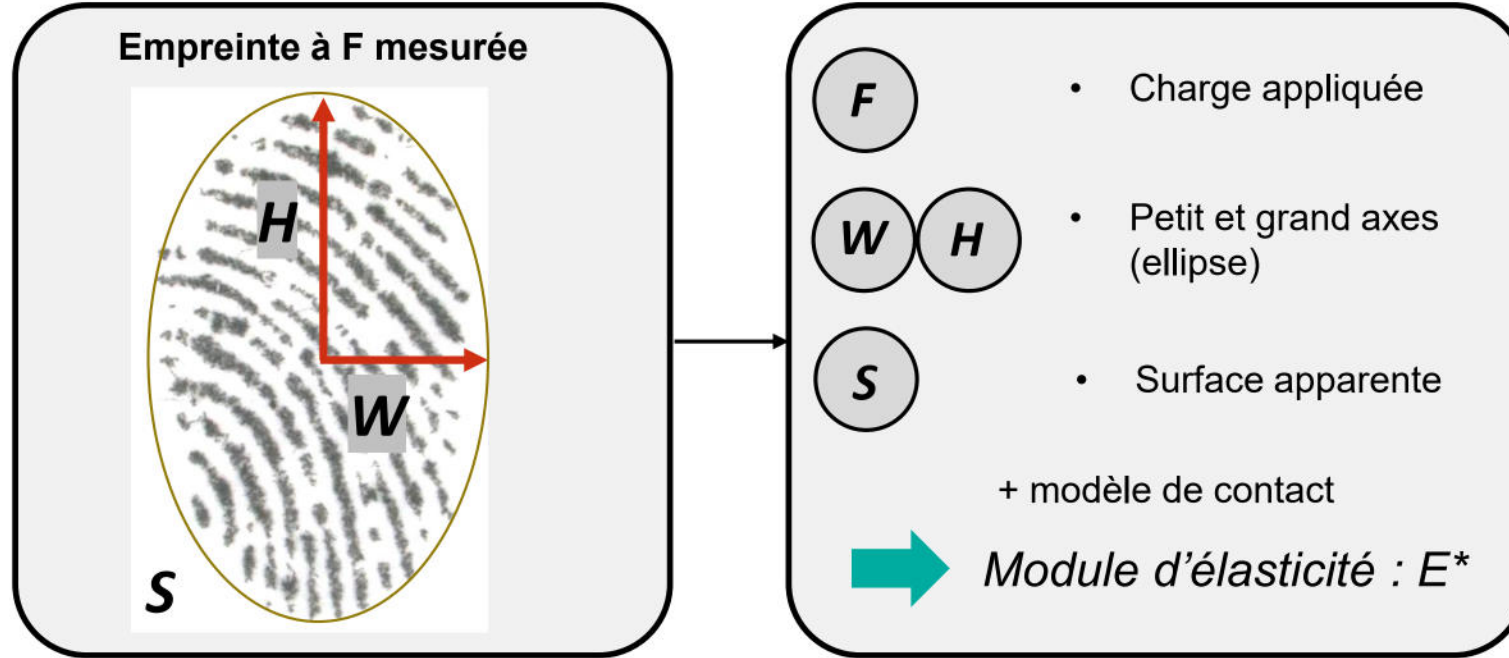
- 1. Indentation : mesure F et δ



- **Avantages** : méthode rapide, variation E^* en fonction de δ .
- **Inconvénients** : pas de visualisation du contact. Problèmes expérimentaux : bruit, contact doigt anneau !
- En cours de modification.

MÉTHODES DE MESURE

- **2. Empreintes** : mesure F et Aire de contact / W et H



- **Avantages** : ne nécessite pas d'appareillage spécifique, visualisation du contact (centre)
- **Inconvénients** : 1 empreinte = 1 E^* , charge appliquée, mesures W, H et/ou S

MODÈLE DE CONTACT ANALYTIQUE

- Assimile le doigt à une parabololoïde : $z(x,y) = \frac{x^2}{2.R_1} + \frac{y^2}{2.R_2}$

Il existe un modèle du contact elliptique (Hertz) difficile à manipuler.

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_{doigt}^2}{E_{doigt}} + \frac{1-\nu_{surf}^2}{E_{surf}}$$
$$E^* = \frac{E_{doigt}}{1-\nu_{doigt}^2}$$

MODÈLE DE CONTACT ANALYTIQUE

- Assimile le doigt à une parabololoïde : $z(x,y) = \frac{x^2}{2.R_1} + \frac{y^2}{2.R_2}$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_{doigt}^2}{E_{doigt}} + \frac{1-\nu_{surf}^2}{E_{surf}}$$

$$E^* = \frac{E_{doigt}}{1-\nu_{doigt}^2}$$

Il existe un modèle du contact elliptique (Hertz) difficile à manipuler.

Modèle Analytique approché du contact elliptique Hertzien [1]

$$a^3 = \frac{3FR_{eq}}{4E^*} \quad \left\{ \begin{array}{l} R_{eq} = \sqrt{R_1.R_2} \quad [3] \\ R_{eq} = \left[\frac{1}{R_1 R_2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \right]^{-1/3} \quad [2] \\ a_{eq} = \sqrt{\frac{S}{\pi}} \quad \text{ou} \quad a_{eq} = \sqrt{w.h} \end{array} \right.$$

$$\text{et} \quad \frac{w}{h} = \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{2/3} = \varepsilon \quad R_{eq} = R_2 \varepsilon \left(\frac{2}{1+\varepsilon^{3/2}} \right)^{1/3}$$

MODÈLE DE CONTACT ANALYTIQUE

- Assimile le doigt à une parabololoïde : $z(x,y) = \frac{x^2}{2.R_1} + \frac{y^2}{2.R_2}$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_{doigt}^2}{E_{doigt}} + \frac{1-\nu_{surf}^2}{E_{surf}}$$

$$E^* = \frac{E_{doigt}}{1-\nu_{doigt}^2}$$

Il existe un modèle du contact elliptique (Hertz) difficile à manipuler.

Modèle Analytique approché du contact elliptique Hertzien [1]

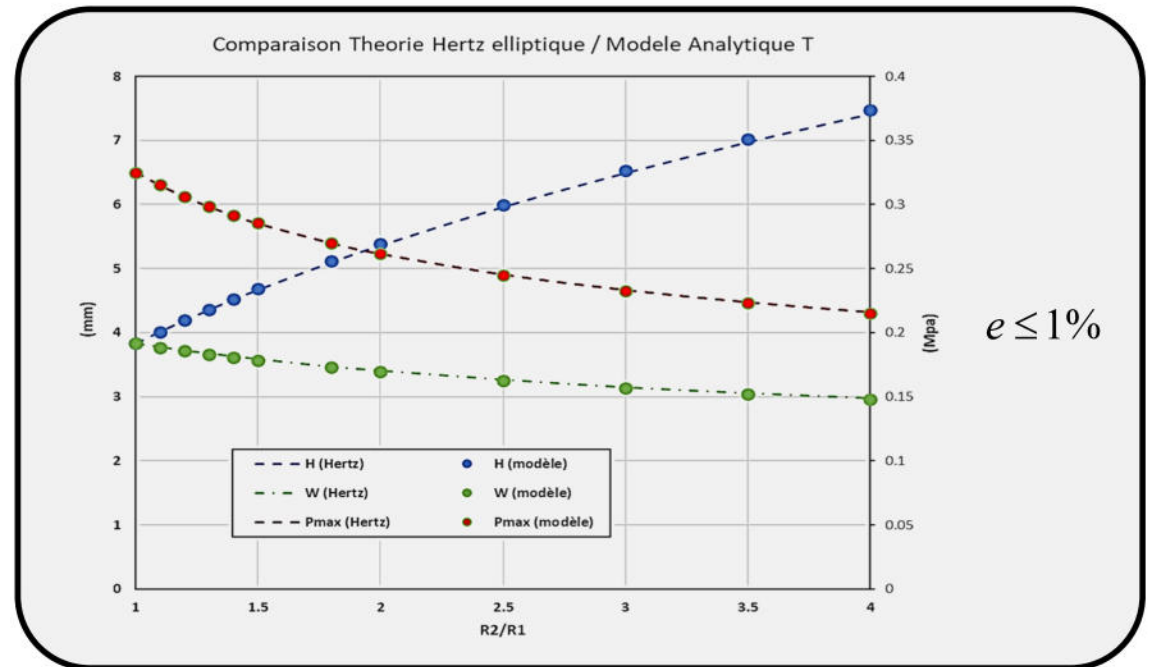
$$a^3 = \frac{3FR_{eq}}{4E^*}$$

$$R_{eq} = \sqrt{R_1.R_2} \quad [3]$$

$$R_{eq} = \left[\frac{1}{R_1 R_2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \right]^{-1/3} \quad [2]$$

$$a_{eq} = \sqrt{\frac{S}{\pi}} \quad \text{ou} \quad a_{eq} = \sqrt{w.h}$$

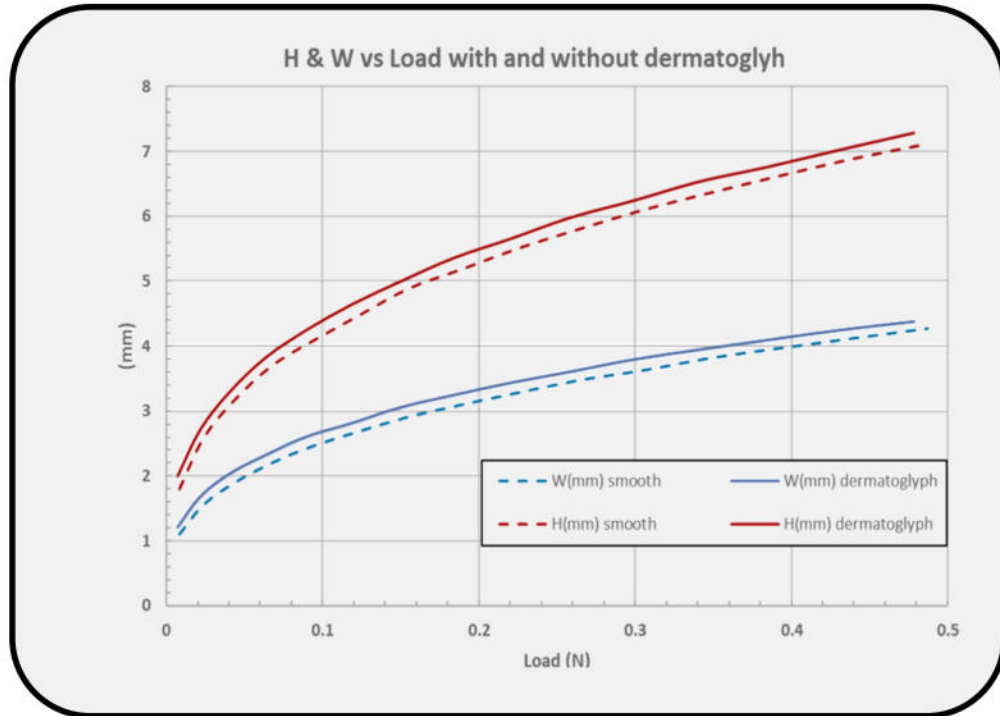
$$\text{et} \quad \frac{w}{h} = \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{2/3} = \varepsilon \quad R_{eq} = R_2 \varepsilon \left(\frac{2}{1+\varepsilon^{3/2}} \right)^{1/3}$$



Ne prend pas en compte la géométrie réelle du doigt ni des dermatoglyphes

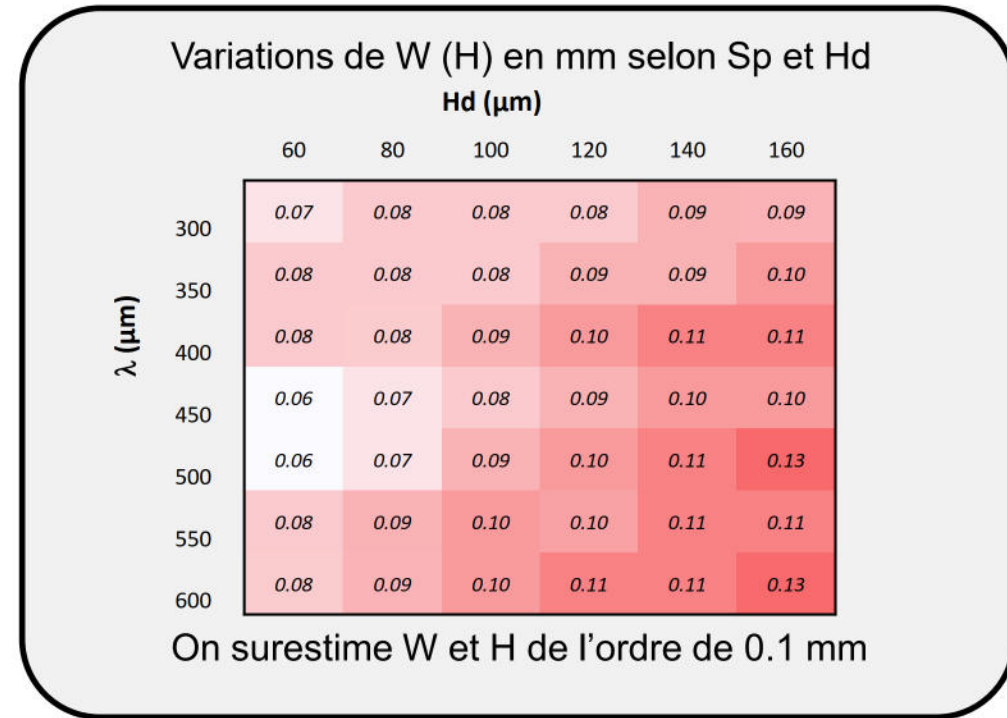
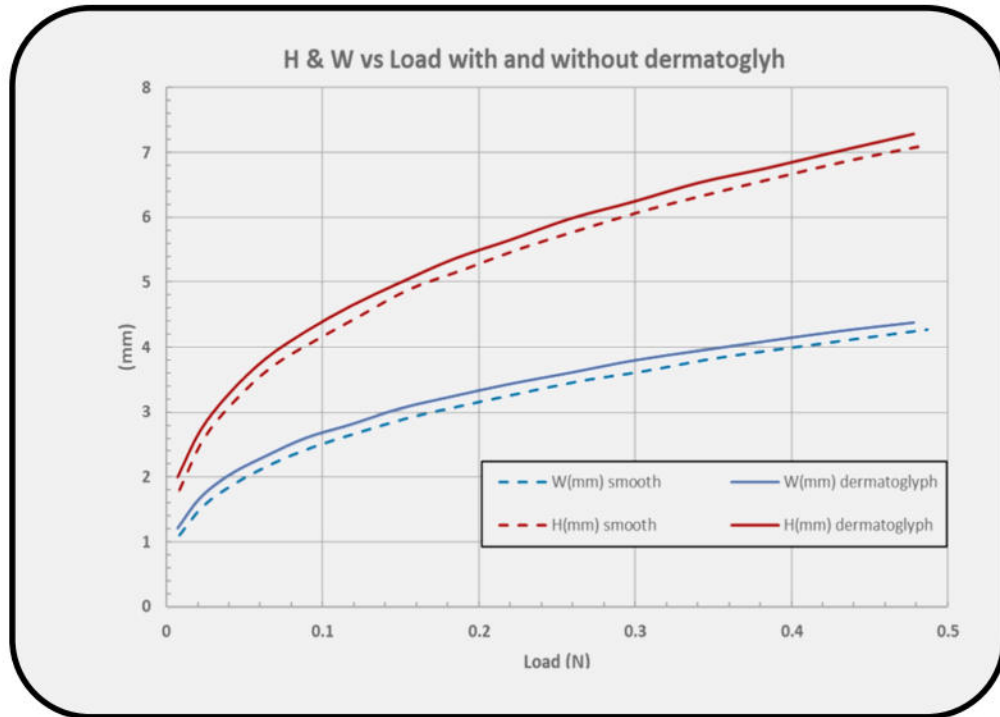
MODÈLE DE CONTACT ANALYTIQUE

- Prise en compte des dermatoglyphes (augmente la surface apparente)



MODÈLE DE CONTACT ANALYTIQUE

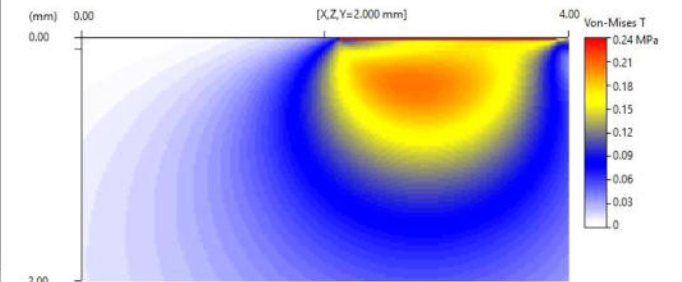
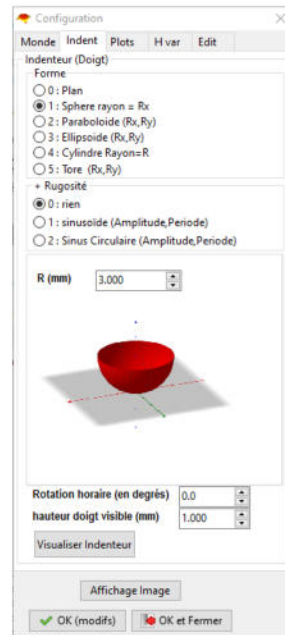
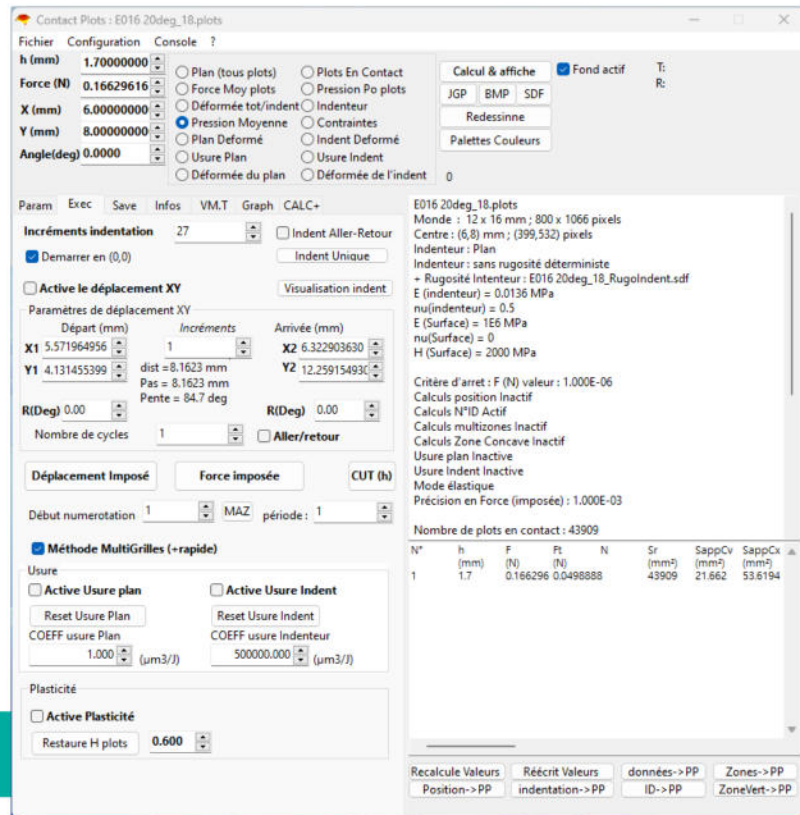
- Prise en compte des dermatoglyphes (augmente la surface apparente)



Conclusion :
$$E^* = \frac{3FR_{eq}}{4(w_d h_d)^{3/2}}$$

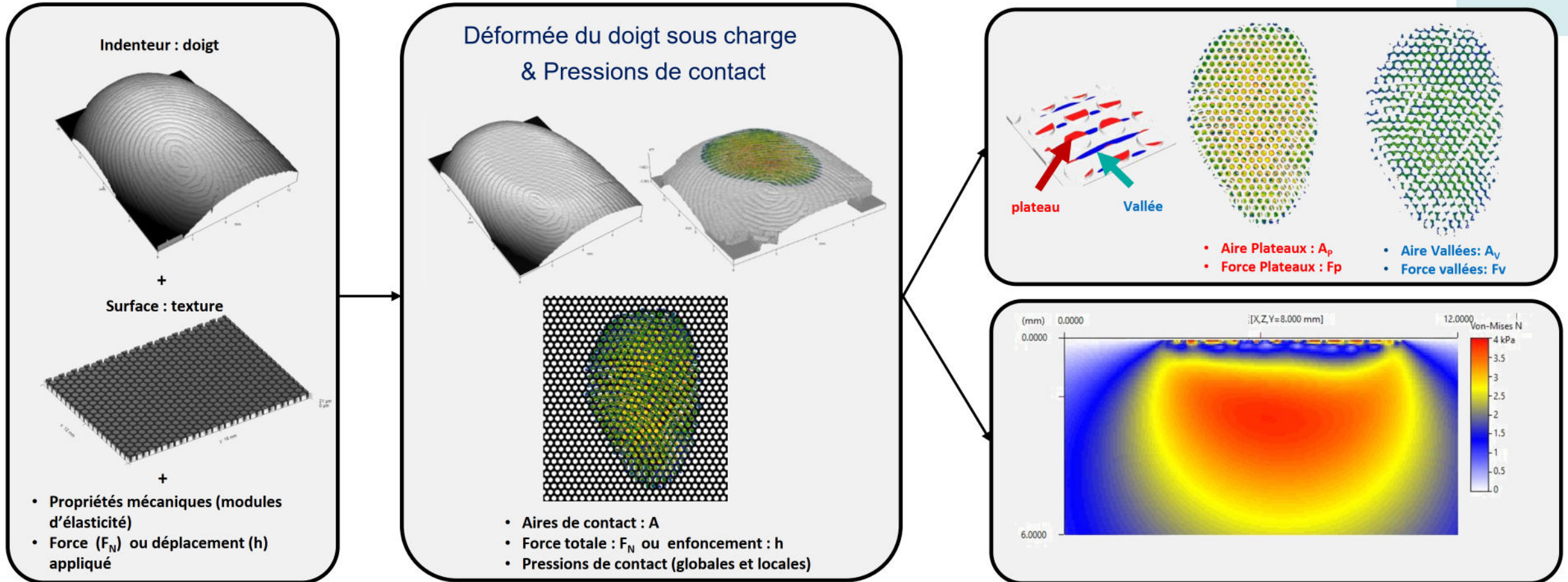
MODÈLE DE CONTACT NUMÉRIQUE

- Développement d'un code **ContactPlot** basé sur les éléments frontières afin de déterminer, lors d'un contact (doigt/surface) : Aires réelles de contact, Pressions locales, Déformations, ...
- Hypothèses : mode élastique pur, matériau homogène, isotrope
- Maillage hexagonal (env. 10^5 mailles).
- Indenteur et surface : topographie 3D ou simulés (formes géométriques)



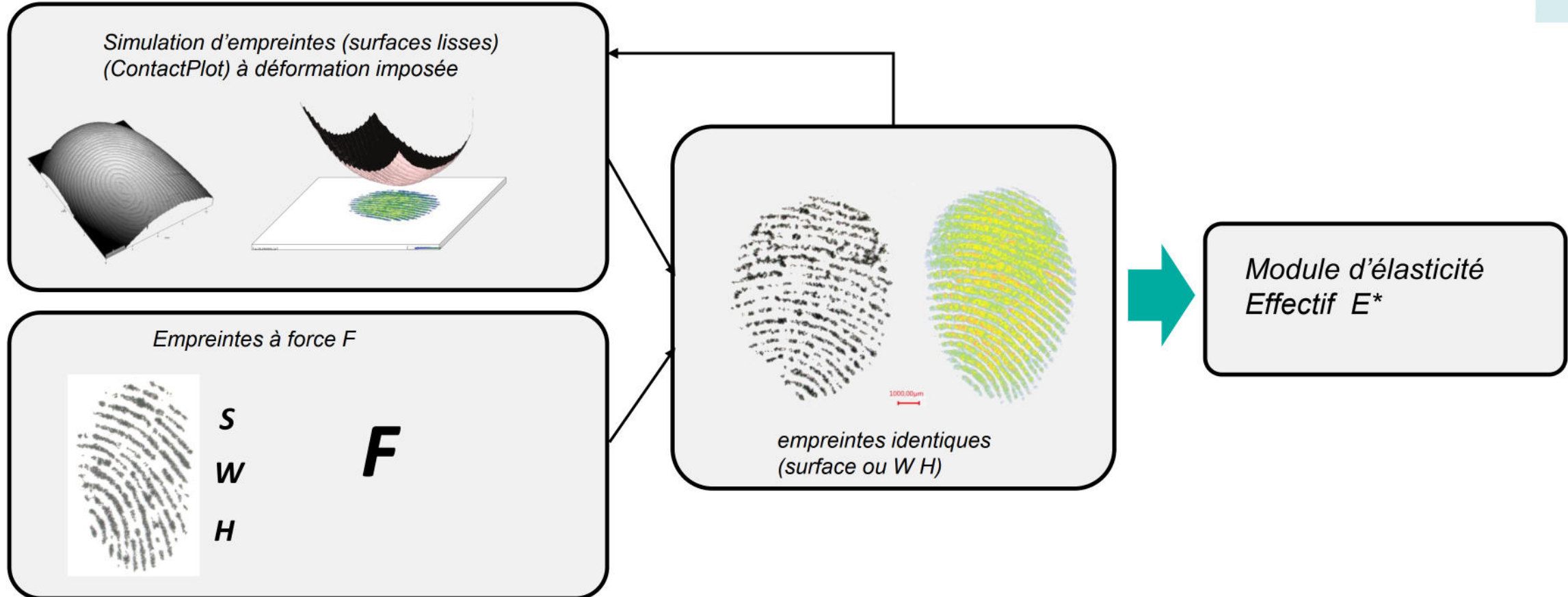
MODÈLE DE CONTACT NUMÉRIQUE

- Application au tactile : doigt/surface



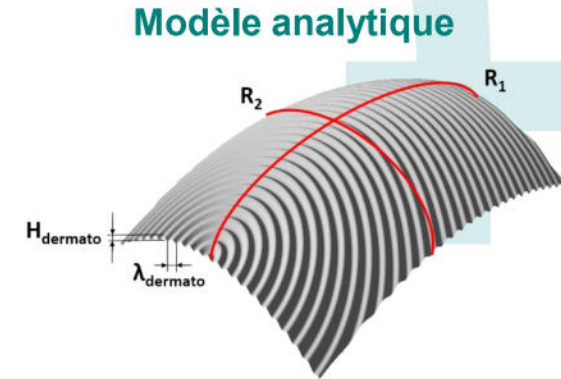
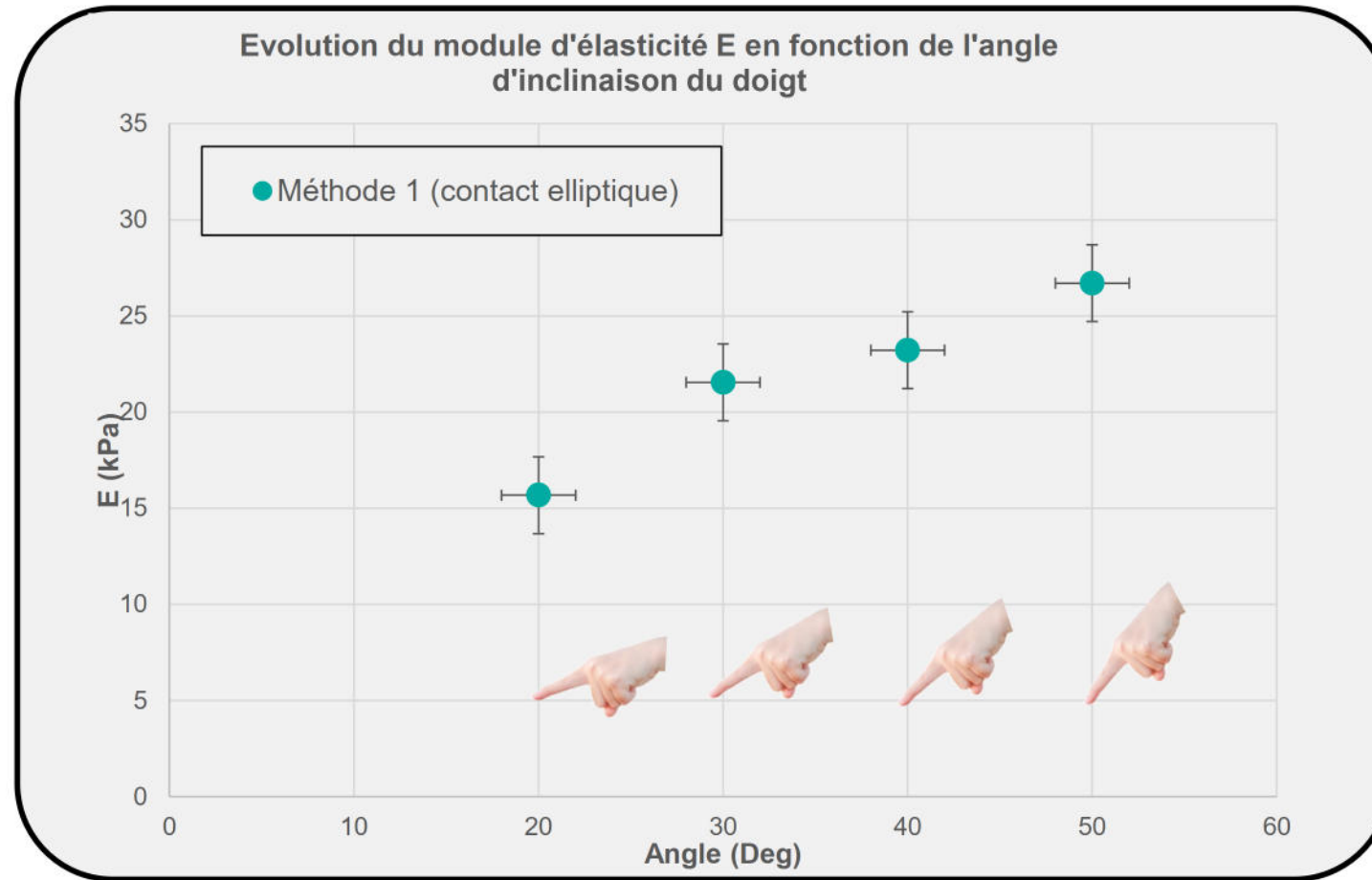
MODÈLE DE CONTACT NUMÉRIQUE

- Méthode inverse pour trouver le module d'Young avec une correspondance des empreintes (réelles vs simulations)



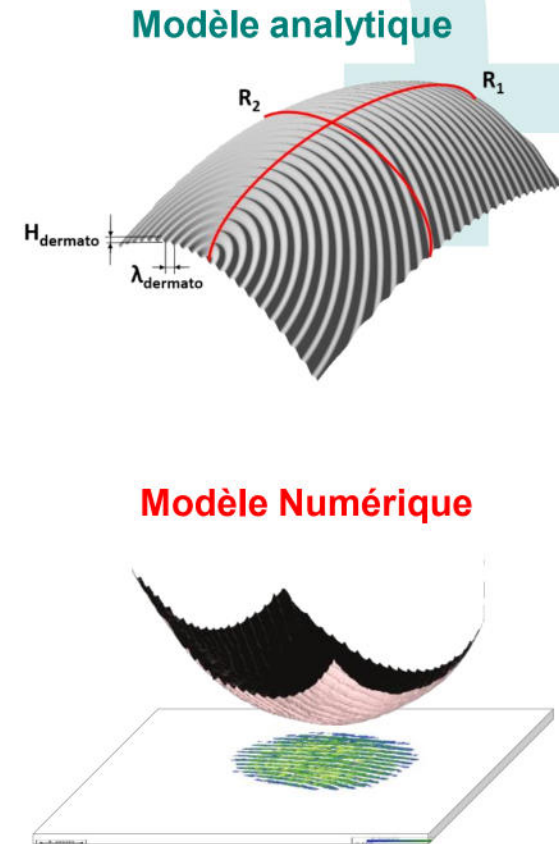
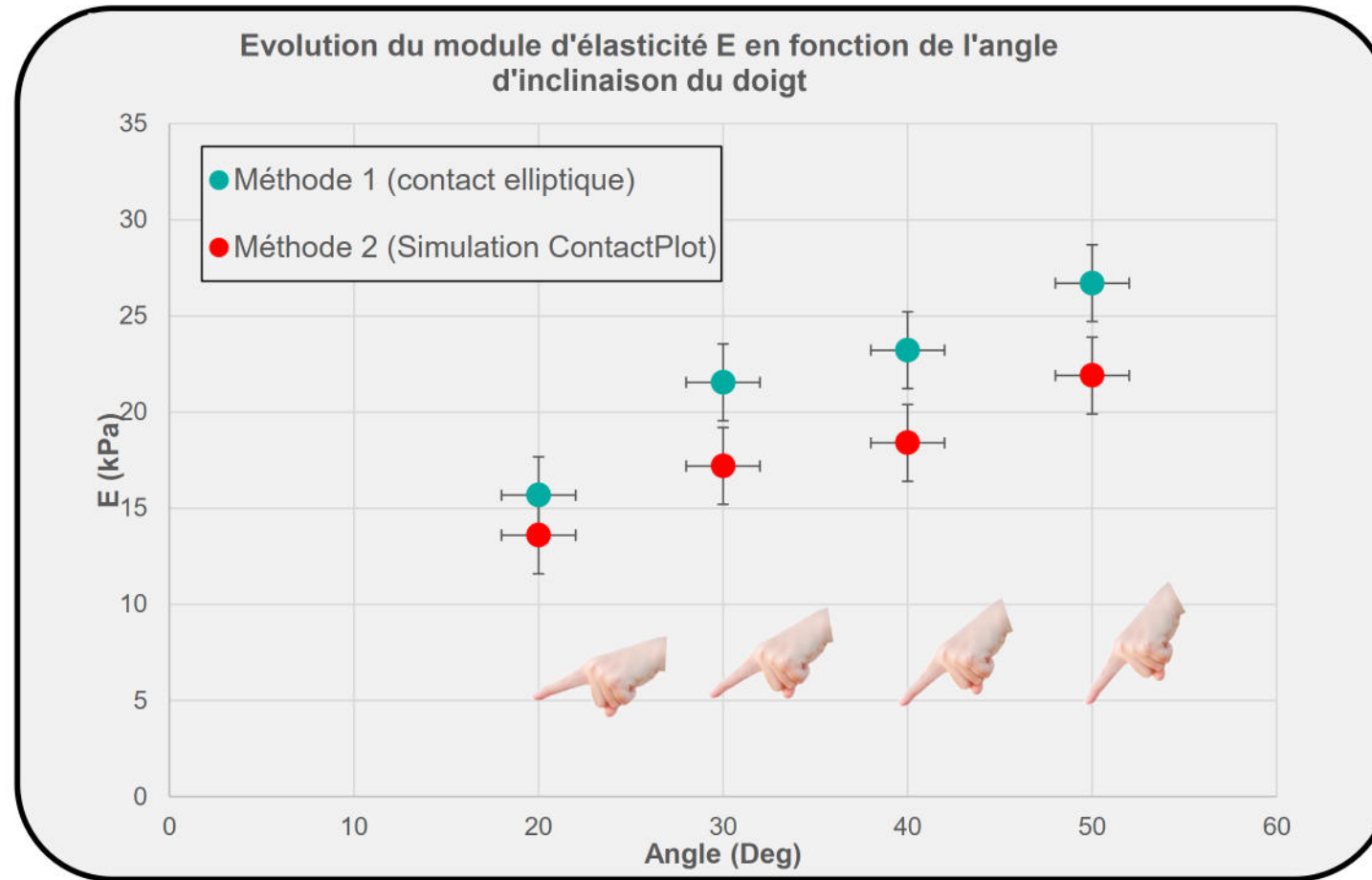
Prise en compte de la géométrie réelle du doigt et des dermatoglyphes

APPLICATION : INCLINAISON DU DOIGT



- Forte évolution du module d'Young en fonction de l'angle

APPLICATION : INCLINAISON DU DOIGT



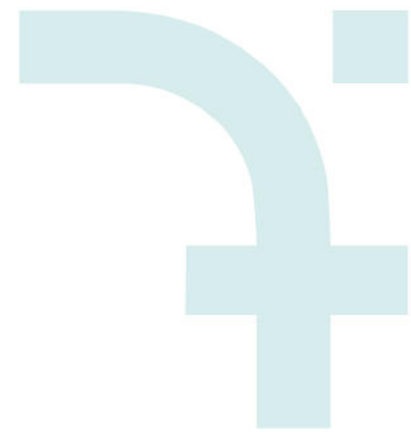
- On surestime le module d'Young de 15 % à 20 % en assimilant le doigt à une parabololoïde

CONCLUSION

- Deux méthodes expérimentales de mesure : indentations et empreintes
- Une méthode analytique rapide et une méthode numérique (prenant en compte la morphologie réelle) pour calculer le module d'élasticité
- Variation du module en fonction inclinaison du doigt
- ContactPlot permet d'avoir les paramètres de contact.

PERSPECTIVES

- Modification appareil d'indentation
- Evolution du programme : adhésion, viscosité...
- Liens avec le comportement tribologique et perception tactile.



MERCI

