

# De la ingeniería heterogénea a las transiciones sociotécnicas: el caso de las Micro y Nano Tecnologías (MNT)

Matthieu Hubert<sup>1</sup> y Dominique Vinck<sup>2</sup>

Recibido: 18/08/2021; Aceptado: 23/12/2021

**Cómo citar:** Hubert, M. & Vinck, D. (2022). De la ingeniería heterogénea a las transiciones sociotécnicas: el caso de las Micro y Nano Tecnologías (MNT) *Revista Hipertextos*, 10 (17), pp. 121-144. <https://doi.org/10.24215/23143924e051>

**Resumen.** Mientras algunos enfoques CTS como la teoría del actor-red han sido criticados por su incapacidad para producir mecanismos explicativos de las transiciones sociotécnicas (Geels, 2007), el artículo muestra que dicha teoría permite dar cuenta de una transición sociotécnica completa, desde el diseño de hojas de rutas para los laboratorios de I+D hasta la difusión de nuevos dispositivos técnicos en la sociedad, sin renunciar a “seguir los actores” (Latour, 2006) y sus prácticas concretas y situadas. Para eso, analizamos las Micro y Nano Tecnologías (MNT) como un caso de transición y movilizamos el concepto de “ingeniería heterogénea” (Law, 1989) para explicar la capacidad de transformación social de las prácticas tecnocientíficas en varios sitios claves de dicha transición: comités internacionales donde prioridades tecnológicas y hojas de ruta se definen; laboratorios donde se inventan y diseñan nuevos dispositivos técnicos; plataformas de experimentación y transferencia de tecnología hacia la industria; grandes programas de investigación y desarrollo donde académicos e industriales imaginan los usos de esos nuevos artefactos y dan forma a nuevas infraestructuras sociotécnicas. La articulación de esos distintos estudios de casos da algunas pistas para dar cuenta de los procesos de transición hacia la producción y el uso de las MNT, su difusión masiva en las sociedades contemporáneas y sus posibles impactos en términos de vigilancia digital y control social.

**Palabras clave:** innovación, tecnociencia, transición, ingeniería heterogénea, nanotecnología.

<sup>1</sup> Investigador adjunto del CONICET y miembro del Laboratorio de Investigaciones en Ciencias Humanas (LICH) de la Universidad Nacional de San Martín (UNSAM). Ha publicado entre otros: *Nanotechnologies : l'invisible révolution. Au-delà des idées reçues* (con D. Vinck), Paris, Editions Le Cavalier Bleu. Contacto: [mhubert@unsam.edu.ar](mailto:mhubert@unsam.edu.ar)

<sup>2</sup> Profesor titular de la Universidad de Lausanne, Suiza, Instituto de Ciencias Sociales, STS Lab. También es director de la *Revue d'anthropologie des connaissances*. Ha publicado entre otros: *Engenheiros no Cotidiano. Etnografia da Atividade de Projeto e Inovação*, Fabrefactum Editora, Belo Horizonte (Brasil), 2013; *Ciencias y sociedad. Sociología del trabajo científico*, Barcelona, Ed. Gedisa (2014); *Critical studies of innovation: Alternative approaches to the pro-innovation bias* (con B. Godin), Cheltenham, Edward Elgar (2017); *Humanidades digitales: la cultura frente a las nuevas tecnologías*, Gedisa, Barcelona (2018); *Staging Collaborative Design and Innovation: An Action-Oriented Participatory Approach* (con C. Clausen, S. Petersen & J. Dorland), Cheltenham, Edward Elgar (2020); *Handbook on Alternative Theories of Innovation* (con B. Godin & G. Gaglio), Cheltenham, Edward Elgar (2021); *Faire sans, faire avec moins. Les nouveaux horizons de l'innovation* (con F. Goulet), Paris, Presses des Mines. Contacto: [Dominique.Vinck@unil.ch](mailto:Dominique.Vinck@unil.ch)

## De la ingeniería heterogénea a las transiciones sociotécnicas: el caso de las Micro y Nano Tecnologías (MNT)

---

**Sumario.** 1. Introducción. 2. La noción de ingeniería heterogénea. 3. Ingeniería heterogénea de orientaciones tecnológicas: las hojas de ruta. 4. Ingeniería heterogénea de dispositivos técnicos: las transferencias de tecnología. 5. Ingeniería heterogénea de organizaciones de I+D: las plataformas tecnológicas. 6. Ingeniería heterogénea de problemas y soluciones tecnológicas: los programas colaborativos. 7. Ingeniería heterogénea de infraestructuras sociotécnicas: las ciudades inteligentes (*smart city*). 8. Conclusión.

### From heterogeneous engineering to sociotechnical transitions: the case of Micro and Nano Technologies (MNT)

**Abstract.** While some STS approaches such as actor-network theory have been criticised for their inability to produce explanatory mechanisms for socio-technical transitions (Geels, 2007), the article shows that such theory allows us to account for a complete socio-technical transition, from the design of roadmaps for R&D laboratories to the diffusion of new technical devices in society, without renouncing to “follow the actors” (Latour, 2006) and their concrete and situated practices. To this end, we analyse Micro and Nano Technologies (MNT) as a case of transition and mobilise the concept of “heterogeneous engineering” (Law, 1989) to explain the capacity for social transformation of technoscientific practices at several key sites of this transition: international committees where technological priorities and roadmaps are defined; laboratories where new technical devices are invented and designed; platforms for experimentation and technology transfer to industry; large research and development programmes where academics and industrialists imagine the uses of these new artefacts and shape new socio-technical infrastructures. The articulation of these different case studies provides some clues to account for the transition processes towards the production and use of MNTs, their massive diffusion in contemporary societies and their possible impacts in terms of digital surveillance and social control.

**Keywords:** innovation, technoscience, transition, heterogeneous engineering, nanotechnology.

### Da engenharia heterogénea às transições sócio-técnicas: o caso das Micro e Nano Tecnologias (MNT)

**Resumo.** Embora algumas abordagens STS como a teoria actor-rede tenham sido criticadas pela sua incapacidade de produzir mecanismos explicativos das transições sócio-técnicas (Geels, 2007), o artigo mostra que tal teoria nos permite dar conta de uma transição sócio-técnica completa, desde a concepção de roteiros para laboratórios de I&D até à difusão de novos dispositivos técnicos na sociedade, sem renunciar a “seguir os actores” (Latour, 2006) e as suas práticas concretas e situadas. Para tal, analisamos as Micro e Nano Tecnologias (MNT) como um caso de transição e mobilizamos o conceito de “engenharia heterogénea” (Law, 1989) para explicar a capacidade de transformação social das práticas tecnocientíficas em vários locais-chave desta transição: comités internacionais onde são definidas prioridades tecnológicas e roteiros; laboratórios onde são inventados e concebidos novos dispositivos técnicos; plataformas de experimentação e transferência de tecnologia para a indústria; grandes programas de investigação e desenvolvimento onde académicos e industriais imaginam as utilizações destes novos artefactos e dão forma a novas infra-estruturas sócio-técnicas. A articulação destes diferentes estudos de caso fornece algumas pistas para explicar os processos de transição para a produção e uso de MNT, sua difusão massiva nas sociedades contemporâneas e seus possíveis impactos em termos de vigilância digital e controle social.

**Palavras-chave:** inovação, tecnociência, transição, engenharia heterogénea, nanotecnologia.

## 1. Introducción

La expresión “internet de las cosas” refiere a la extensión de internet más allá de las computadoras y los terminales móviles (Greengard, 2015). Esta ampliación de las redes informáticas es posible gracias al rápido desarrollo de microchips cada vez más potentes, a precios mucho más bajos. Así, los sensores podrían proporcionar información a distancia sobre diferentes entornos materiales (la temperatura de la casa, el número de trabajadores en un taller, etc.); los actuadores podrían controlar a distancia diferentes dispositivos materiales (la calefacción, el contador de electricidad, la heladera, etc.). Esa difusión masiva de microchips capaces de interactuar a distancia aumenta drásticamente la capacidad de coleccionar e intercambiar datos personales. Como resultado, el estilo de vida y el comportamiento de cada ciudadano se está convirtiendo en algo completamente rastreable, posiblemente sin el conocimiento de las personas afectadas. Cada vez es más difícil garantizar el anonimato de los individuos en sus movimientos y actividades (lo que consumen, cómo se visten, los tratamientos médicos que utilizan, etcétera).

Aunque las preocupaciones que plantean las Micro y Nano Tecnologías<sup>3</sup> (MNT) no son fundamentalmente nuevas, adquieren una dimensión totalmente nueva debido a su tamaño. Por sus propiedades de miniaturización, invisibilidad y ubicuidad, las MNT permiten la proliferación de dispositivos invisibles que podrían facilitar el control social sistemático de los ciudadanos (Vinck y Hubert, 2017). Desde principios de la década de 2000, académicos y agencias de regulación han advertido de los riesgos que suponen para el respeto de las libertades individuales. Por su capacidad de producción y emisión de datos sobre los usuarios, esas tecnologías plantean serios interrogantes sobre el control social de las personas por parte de otras personas, de las empresas o de los Estados (Zuboff, 2019): ¿cómo garantizar la protección de los datos personales? ¿Cómo se puede regular el tiempo de conservación de la información o la seguridad de los datos almacenados? ¿Qué mecanismos de información deberían establecerse en relación con los derechos individuales y colectivos de los usuarios (por ejemplo, para desactivar los dispositivos incorporados a los productos o para borrar la información registrada)?

Ante estos retos, los estudios sociales de la ciencia y la tecnología (CTS) deben desarrollar marcos analíticos que permitan comprender los procesos de transición hacia la producción y el uso masivo de las MNT y su difusión en las sociedades contemporáneas. Sin embargo, algunos de los enfoques CTS más usados como la teoría del actor-red (Callon, 1986; Latour, 2006) o la construcción social de la tecnología (Bijker et al., 1987) han sido criticados por su incapacidad para producir mecanismos explicativos de las transiciones sociotécnicas (Geels, 2007), desde la convergencia de un conjunto de expectativas y promesas, pasando por la aparición de “nichos tecnológicos”, hasta la consolidación de un nuevo régimen sociotécnico (Geels, 2002). Este

---

<sup>3</sup> Durante los últimos treinta años, las Micro y Nano Tecnologías (MNT) han sido objeto de numerosos trabajos en física, química, biología, ciencias de la ingeniería y en la interfaz de estas disciplinas. Suscitando grandes expectativas debido a las particulares propiedades de la materia a escala nanométrica (una millonésima parte de un milímetro). Desde el punto de vista científico, las investigaciones en MNT se refieren a la fabricación, observación, manipulación y modelización de nano-objetos, así como a la comprensión de sus propiedades y sus interacciones con el entorno. Desde el punto de vista industrial, incluyen una gran diversidad de aplicaciones en los campos de la energía, los materiales, la biomedicina, la informática y las telecomunicaciones. También las MNT han sido criticadas por los riesgos que plantean para la salud, el medio ambiente, el respeto a la vida privada o la posibilidad de transformar la especie humana. Se puede encontrar una presentación más detallada de los desafíos sociopolíticos y éticos asociados al desarrollo de las MNT en Vinck y Hubert (2017).

artículo pretende mostrar que es posible realizar una descripción de los mecanismos que actúan en este tipo de transición respetando los principios de investigación y escritura de la teoría del actor-red (Latour, 2006).

Para ello, nos basamos en diferentes estudios de casos que analizan las prácticas tecnocientíficas en las MNT<sup>4</sup>. El objetivo es mostrar que, una vez articulados, estos estudios de caso ofrecen una visión global de la transición en marcha, desde el diseño de nuevas hojas de ruta (*roadmapping*) hasta la regulación de las infraestructuras sociotécnicas así constituidas. Sin embargo, proponemos realizar un doble cambio respecto a ciertos usos canónicos de la teoría del actor-red<sup>5</sup>.

El primer cambio es teórico-conceptual. En lugar de recurrir al repertorio clásico de dicha teoría (sociotécnico, traducción, inscripción, enrolamiento, simetría, actante, etc.), nos apoyaremos en el concepto de “ingeniería heterogénea” (Law, 1989), que presentaremos con más detalle en la sección siguiente. Este enfoque supone que el éxito de una innovación técnica no puede explicarse únicamente por sus propiedades intrínsecas o por los conocimientos científicos y tecnológicos formales (académicos) que movilizan los tecnólogos en su trabajo cotidiano. También permite librarse de ciertas críticas recurrentes a la teoría del actor-red, que le reprochan de dar cuenta de un mundo únicamente formado por redes sociotécnicas indiferenciadas (Shinn y Ragouet, 2005). Por el contrario, el concepto de ingeniería heterogénea hace hincapié, como veremos, en la diversidad de las prácticas tecnocientíficas y las diferenciaciones que esas mismas habilitan.

El segundo cambio es metodológico. En lugar de seguir a los mismos actores a lo largo de la investigación y de su restitución, como lo podría sugerir una versión canónica de la teoría del actor-red, nuestro artículo propone enlazar varios estudios de caso según un hilo conductor problemático. Un hilo que puede resumirse así: ¿por qué mecanismos se produce una transición sociotécnica? ¿Cómo podemos dar cuenta del cambio de escala, desde la construcción de un proyecto de laboratorio hasta la regulación de nuevas infraestructuras que afectan y moldean la sociedad en su conjunto, sin abandonar el interés de seguir a los actores y sus prácticas concretas y situadas? Y, más generalmente, ¿cómo explicar la capacidad de transformación social de las

---

<sup>4</sup> Este artículo se basa en los resultados de varios proyectos de investigación relacionados con los aspectos locales y internacionales de las MNT y, en particular, en materiales (entrevistas, observaciones, análisis de fuentes escritas y archivos digitales) que se ha recopilado en el curso de un trabajo de campo realizado en la región de Grenoble entre 2005 y 2009 en el marco del proyecto “Fonctionnement et vie de laboratoire” (financiado por el *Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives*) y del programa de la *Agence Nationale de la Recherche* “Lodysénano”. La investigación se basó, en particular, en la observación directa y en entrevistas realizadas por cuatro científicos sociales (Gloria Zarama, Dominique Vinck, Morgan Jouvenet y Matthieu Hubert), entre los que se encuentran los dos autores de este artículo. Nuestra participación fue el resultado de la combinación de nuestros intereses de investigación en el análisis de la relación entre cambios organizativos y prácticas científicas, y de una solicitud de los directivos de una de las instituciones científicas locales en relación con la fusión prevista de varios laboratorios y plataformas dentro de un nuevo centro de investigación e innovación (ver, por ejemplo: Vinck, 2010; Hubert, 2015). Los informes de las observaciones y las entrevistas se intercambiaron y discutieron dentro de nuestro grupo de investigación. Hemos frecuentado estos laboratorios y plataformas participando en sus actividades rutinarias (reuniones, situaciones de trabajo e intercambios de pasillos) y eventos puntuales (conferencias, visitas organizadas, etc.). Esta investigación colectiva supuso una lectura y categorización transversal de extractos de unos doscientos informes detallados de observaciones y entrevistas, utilizando el software de análisis cualitativo *NVivo*. El trabajo es de carácter etnográfico en la medida en que se trata de describir una cultura y unas prácticas que se pueden observar localmente (Vinck, 2003).

<sup>5</sup> Para simplificar nuestro argumento, hablamos de usos canónicos de la teoría actor-red para designar sus usos más comunes, sin olvidarnos que incluso sus fundadores la describen como una teoría en constante ajuste y reformulación. Véase Latour (2006) para un análisis más completo de estos ajustes a lo largo del tiempo.

prácticas tecnocientíficas? En nuestro artículo, al igual que en la etnografía multisituada de Christine Hine (2007), la serie de estudios de caso no es una simple colección; al contrario, está atravesada por un hilo conductor problemático que guía el paso de un estudio de caso a otro, de un sitio de investigación a otro (Hubert, 2014). En particular, la articulación entre varios estudios de casos, como la que proponemos en las páginas siguientes, permite dar cuenta de los procesos de transición hacia la producción y el uso de las MNT, su difusión masiva en las sociedades contemporáneas y sus posibles impactos en términos de vigilancia digital y control social.

La primera parte del artículo vuelve sobre la noción de ingeniería heterogénea y presenta cómo la movilizaremos en el resto del texto. La segunda da cuenta de la implementación y el uso de algunas hojas de ruta (*roadmaps*) típicas de las MNT. La tercera parte focaliza en cómo se traducen las orientaciones tecnológicas definidas por esas hojas de ruta en la concepción y caracterización de técnicas de laboratorio compatibles con los estándares y las normas industriales. La cuarta examina el establecimiento de nuevos métodos y organizaciones de experimentación y transferencia tecnológica: las plataformas tecnológicas. La quinta parte analiza la constitución de redes de cooperación entre grupos de investigadores e industriales que diseñen nuevos dispositivos técnicos e imaginan sus usos futuros. La sexta describe la implementación de un programa de investigación y desarrollo en el cual académicos e industriales imaginan los usos de algunos de esos nuevos artefactos típicos de las MNT y dan forma a una nueva infraestructura sociotécnica: una aplicación de la “internet de las cosas” dedicada a ámbitos urbanos (*smart city*). En la conclusión, volveremos sobre los usos que hicimos de la teoría actor-red y del concepto de ingeniería heterogénea para dar cuenta de una transición sociotécnica –una transición marcada, en el caso estudiado, por la convergencia entre MNT y distintos tipos de tecnologías digitales.

## 2. La noción de ingeniería heterogénea

El concepto de ingeniería heterogénea, propuesto originalmente por John Law (1989), surgió de un debate teórico sobre cómo se impone una opción técnica sobre otras. Esta discusión contrasta dos enfoques de los estudios sociales del cambio tecnológico. El primero considera que los intereses y recursos de los grupos sociales capaces de imponer sus puntos de vista explican la tecnología dominante (constructivismo social). El segundo enfoque considera que este proceso se explica mejor si se tiene en cuenta la forma en que el innovador vincula un artefacto con su contexto social, económico, político y científico (enfoque relacionista).

El análisis del cambio tecnológico en términos de ingeniería heterogénea corresponde al segundo enfoque. Atribuye un rol central al innovador como constructor de una red, un sistema o un tejido “sin costura” (Hughes, 1983). Destaca tres características principales del proceso de innovación: “(1) la heterogeneidad de los elementos que intervienen en la solución de los problemas tecnológicos, (2) la complejidad y contingencia de la forma en que se articulan estos elementos, y (3) la forma en que se forjan las soluciones dentro de situaciones conflictivas” (Law, 1989, p. 111). Según Law, esta capacidad de articular elementos heterogéneos explica conjuntamente el éxito tecnológico y las relaciones de poder que lo hacen posible y resultan de él.

El enfoque de la ingeniería heterogénea se basa los principios teórico-metodológicos de la teoría del actor-red de Michel Callon (1986) y Bruno Latour (2006). Eso significa que no



favorece ninguna explicación social a priori, propone reconocer la agencia de las entidades no humanas y aplica un principio de simetría generalizada entre actores/actantes humanos y no humanos para describir el “actor-red” que habilita la constitución y estabilización de una innovación técnica<sup>6</sup>. En ese marco, el concepto de ingeniería heterogénea es útil para dar cuenta del “trabajo de articulación” (Fujimura, 1987) entre entidades heterogéneas que hace posible la construcción de problemas tecnocientíficos “tratables”, la formulación de soluciones posibles y la selección de una opción técnica entre otras. En ese sentido, permite no sólo insistir en la heterogeneidad de los recursos y conocimientos movilizados en las prácticas tecnocientíficas, sino también subrayar la heterogeneidad de esas prácticas y de los procesos habilitados (organización, coordinación, comunicación, negociación, etc.) por las mismas prácticas.

En las páginas siguientes, analizamos las Micro y Nano Tecnologías (MNT) como un caso de transición y movilizamos el concepto de ingeniería heterogénea para explicar la capacidad de transformación social de las prácticas de ingeniería en varios sitios claves de dicha transición: comités internacionales donde prioridades tecnológicas y hojas de ruta se definen; laboratorios donde se inventan nuevos conceptos y diseñan dispositivos técnicos; plataformas de experimentación y transferencia de tecnología hacia la industria; grandes programas de investigación y desarrollo donde académicos e industriales imaginan los usos de esos nuevos artefactos y dan forma a nuevas infraestructuras sociotécnicas. Circulando por esos lugares, mostraremos que raramente las prácticas tecnocientíficas se limitan a un trabajo cognitivo o a una racionalidad técnica “pura”; al contrario, apuntan a organizar, negociar, traducir y articular elementos heterogéneos e interdependientes –un conjunto de actividades que permiten producir de manera conjunta (o coproducir) las innovaciones consideradas y sus usos sociales.

### 3. Ingeniería heterogénea de orientaciones tecnológicas: las hojas de ruta

Ya en la década de 1980, Motorola fue la primera empresa multinacional que comunicó ampliamente su uso estratégico de las hojas de ruta tecnológicas (*technology roadmaps*) (Willyard y Mclees, 1987). De hecho, estas herramientas de prospectiva se adaptan especialmente bien a un sector industrial como el de la microelectrónica, empujado por la tecnología (*technology push*) –es decir, un sector en el cual las funcionalidades de los productos y los mercados potenciales derivan de los avances tecnológicos (Devalan, 2006). En esta sección, examinamos el papel de estas hojas de ruta en la configuración de nuevas orientaciones en las MNT, considerando el ejemplo canónico del *International Technology Roadmap for Semiconductors* (ITRS). ¿Cómo y quién diseña esa hoja de ruta? ¿Cómo se traducen y materializan las orientaciones tecnológicas en la hoja de ruta del ITRS? Y, a nivel del laboratorio, ¿por qué y cómo los tecnólogos e científicos en MNT utilizan esta hoja de ruta internacional para dar forma a sus propias agendas de investigación e innovación? Y, por último, ¿qué relevancia tiene el concepto de ingeniería

---

<sup>6</sup> Cabe aclarar que, en el presente artículo, nos centramos principalmente en el concepto de ingeniería heterogénea, que los principios teórico-metodológicos son los de la etnografía multisituada de Christine Hine y que, si bien nos situamos en el marco general de la teoría del actor-red, nuestro objetivo no es discutir el alcance y las limitaciones de dicha teoría (y menos comparar su pertinencia con otros marcos teóricos para analizar las transiciones sociotécnicas).

heterogénea para dar cuenta de esta dimensión de las prácticas tecnocientíficas: la elaboración de nuevas orientaciones tecnológicas?

El ITRS es la principal hoja de ruta para guiar los sectores académicos e industriales en el campo de la micro y nanoelectrónica. Fue lanzada en 1992 por la Asociación de las Industrias de Semiconductores de Estados Unidos, a la que se unieron sus homólogas europeas y asiáticas en 1998 (Hoefflinger, 2012). En concreto, se trata de un documento de varios cientos de páginas que contiene texto, figuras y tablas<sup>7</sup>. La hoja de ruta del ITRS permite identificar los próximos retos científicos y tecnológicos que los académicos e industriales tienen que superar para pasar de una generación de micro y nanochips a otra, caracterizando cada generación por una dimensión de referencia conocida como “nodo tecnológico” (*technology node*) (de 32 nanómetros en 2010 a 22 nanómetros en 2012, por ejemplo). Ese documento es el resultado de debates y negociaciones en grupos de trabajo que juntan representantes de los principales centros industriales y científicos del sector, que se reúnen dos veces al año. Las recomendaciones que ofrecen se actualizan anualmente; se refieren a las principales dificultades tecnológicas que el sector tiene que resolver (*roadblocks*), así como a las futuras etapas (*milestones*) identificadas en un plazo de unos quince años.

A primera vista, las opciones seleccionadas en la hoja de ruta del ITRS parecen ser el resultado de una reflexión prospectiva puramente tecnológica, materializando los consensos de la comunidad científica e industrial. De hecho, los comités de expertos proporcionan tres tipos de informaciones cuyo carácter principalmente técnico no está en duda. En primer lugar, identifican las cuestiones relevantes que deben abordar los ingenieros e investigadores del sector, en función de la aplicación considerada. Por ejemplo, en una conferencia científica, un experto del ITRS dice: “Los retos son estos tres, básicamente: queremos operar a temperatura ambiente [...] controlar el voltaje límite [...] controlar los efectos parásitos”. En segundo lugar, la hoja de ruta ofrece recomendaciones sobre la forma “correcta” de resolver estos problemas: no sólo puede tratarse de explorar y desarrollar nuevas soluciones tecnológicas (un nuevo material, un nuevo proceso de fabricación o una nueva arquitectura como el transistor de doble puerta, la electrónica molecular o la tecnología de silicio sobre aislante); también puede implicar animar a los actores a hacer “compensaciones de rendimiento”, cuando dos parámetros están correlacionados negativamente y la mejora de un parámetro empeora el otro (por ejemplo, “hay que degradar el rendimiento para evitar las fugas parasitas” o “sustituir el SiO<sub>2</sub> [para resolver un problema de fugas electrónicas] conduce a nuevos problemas de interfaz”). Por último, el ITRS proporciona objetivos cuantificados (“hay que bajar de un voltio en la tensión de alimentación”), actualizando las listas de valores a alcanzar para los distintos parámetros (dimensión crítica, corriente de fuga, potencia, tensión límite, etc.), en función de la aplicación elegida (microprocesadores, memorias, etc.).

Aunque todos estos debates están directamente relacionados con cuestiones técnicas, la elaboración de la hoja de ruta tiene dimensiones económicas y estratégicas igualmente importantes. En particular, el reto es “que [todos los actores científicos e industriales] tiren en la misma dirección”, ya que “todos estamos en el mismo barco”, como señala un experto que forma parte de uno de los comités del ITRS, para quien se trata de organizar lo mejor posible la “cooperación” -es decir, conciliar lógicas cooperativas y competitivas- entre los actores científicos

---

<sup>7</sup> Ver el sitio web del ITRS: <http://www.itrs2.net/>

e industriales del sector. Es “el interés de todos”, dice otro científico, según el cual la hoja de ruta es útil para saber “cuándo necesitaremos qué”. Desde el sector privado, esa combinación de lógicas cooperativas y competitivas que permite la hoja de ruta es necesaria para anticipar cuáles van a ser las necesidades futuras de sus clientes y así limitar las inversiones necesarias en materia de I+D (Investigación y Desarrollo).

Sin embargo, la cuestión de por qué y cómo laboratorios públicos de investigación en MNT movilizan esta hoja de ruta internacional para dar forma a su propia agenda de investigación no queda tan evidente. Por supuesto, la referencia a la hoja de ruta del ITRS constituye una estrategia retórica útil para justificar el interés suscitado por tal o cual técnica y focalizar en la resolución de algún problema tecnocientífico en particular: “ya es hora de ocuparse de ello, eso es lo que significa”, afirma así un científico del sector público en una conferencia, movilizando las recomendaciones de la hoja de ruta para valorar la centralidad de su tema de investigación. El mismo tipo de proceso argumentativo puede encontrarse en los documentos oficiales de un laboratorio público de investigación MNT que investigamos, donde la referencia a la hoja de ruta justifica la agenda de investigación del laboratorio:

“Las técnicas litográficas actuales no permiten fabricar una máscara (retícula) con una anchura inferior a varias decenas de nanómetros, mientras que, para los circuitos lógicos, habrá que alcanzar dimensiones críticas del orden de 10 nanómetros en 2016 (Hoja de ruta tecnológica internacional para los semiconductores (ITRS) “roadmap 2002”)” (Informe de actividades de un laboratorio de investigación en MNT).

En este ejemplo, los científicos y tecnólogos del laboratorio trabajan en el desarrollo de nuevas técnicas de grabado por plasma (plasma etching) para reducir el tamaño crítico de los transistores, con el fin de superar las limitaciones de las técnicas litográficas convencionales. Sin embargo, según la hoja de ruta del ITRS de 2002 mencionada en este fragmento de informe, estas técnicas actuales de litografía óptica no podrán cumplir los objetivos futuros (2016, en este caso) anunciados en esa misma hoja de ruta. Por ello, el laboratorio justifica su orientación temática refiriéndose a esos mismos objetivos:

“La hoja de ruta del ITRS pone de manifiesto un importante desajuste entre la resolución final de una determinada generación de litografía y las dimensiones que deben alcanzarse en el silicio para esa generación. Por ejemplo, en 2016, será necesario poder producir puertas de transistores con un tamaño de 9 nanómetros, mientras que la litografía utilizada tendrá una resolución máxima de 13 nanómetros” (Informe de actividades de un laboratorio de investigación en MNT).

Así, para los tecnólogos e científicos del laboratorio, la hoja de ruta se utiliza como argumento para justificar la pertinencia de las orientaciones tecnocientíficas elegidas —o sea, en este caso, una nueva técnica de grabado por plasma que pretende remediar el futuro fracaso de la técnica utilizada en este momento (en 2002) en la industria (una técnica que está alcanzando sus propios límites de resolución). En ese sentido, la hoja de ruta se erige menos como una limitación o una restricción (en la definición de la estrategia del laboratorio) que como un recurso y una oportunidad para solicitar financiación externa e interesar a posibles socios externos (industriales, en particular).



En su comunicación, este laboratorio hace un uso estratégico del ITRS, sin tratar de identificar opciones alternativas a la orientación dominante que impone la misma hoja de ruta. Sin embargo, esta instrumentalización oportunista del ITRS no elude, por parte de los investigadores, incluso dentro del laboratorio mencionado, una evaluación mucho más crítica de sus consecuencias reales en las agendas de I+D. En particular, algunos le reprochan efectos adversos indeseables: el ITRS favorecería las estrategias defensivas y fomentaría el uso de soluciones tecnológicas poco creativas, en lugar de estimular la innovación, ya que “todo el mundo hace lo mismo”. Esta “frialdad” se ve incluso acentuada por la influencia de algunos grandes actores industriales en los procesos de toma de decisiones de los comités del ITRS: “algunos intentan ir más rápido que la hoja de ruta o influir en ella”, dice un investigador del mismo laboratorio, refiriéndose en particular a las mayores empresas multinacionales, como Intel, que influirían en las orientaciones tomadas según sus propios intereses. Asimismo, en una conferencia que reúne a académicos e industriales del sector, un científico denuncia el “conservadurismo extremo de los industriales de la microelectrónica” y reclama el diálogo entre los especialistas de la electrónica y la óptica para lograr la integración entre los componentes ópticos y electrónicos –y, asimismo, resolver el “cuello de botella” que, según él, constituyen los “problemas de interconexión” (un problema que había sido identificado por la hoja de ruta del ITRS). También sugiere –irónicamente- que las fuentes láser deberían alejarse de los transistores “para no asustar a los ingenieros de microelectrónica”. En otra reunión más informal, un ejecutivo jubilado de la industria micro y nanoelectrónica al que se le presentaron estos mismos argumentos admite que “la hoja de ruta está matando la innovación”<sup>8</sup>.

Finalmente, la inclusión de una opción tecnológica en el ITRS no es neutra, ya que esta última fija los objetivos que deben alcanzar los actores (científicos e industriales) involucrados. En este sentido, la hoja de ruta constituye un poderoso instrumento de coordinación, capaz de producir efectos de convergencia a escala internacional. Aunque es muy criticado por su carácter prescriptivo, en detrimento de la apertura a otras alternativas tecnológicas más innovadoras, algunos ingenieros e investigadores en MNT la movilizan para construir sus propias orientaciones científicas y técnicas: consideran necesario incluir en ella parte de sus actividades y seguir sus recomendaciones para interesar a los socios industriales, convencer a los organismos de financiación o movilizar a los usuarios potenciales, con el fin de implicarlos en sus actividades de I+D.

Además, como vimos, las orientaciones estratégicas adoptadas bajo la influencia del ITRS no se guían únicamente por consideraciones científicas y técnicas. Más bien, son el resultado de una multitud de prácticas que podemos reunir bajo la noción de ingeniería heterogénea. En efecto, por un lado, las negociaciones, compromisos y relaciones de poder desempeñan un papel importante en la elaboración del ITRS. El concepto de ingeniería heterogénea permite dar cuenta de esta imbricación sociotécnica –es decir, esa interpenetración entre las dimensiones tecnocientíficas y sociopolíticas del proceso de construcción de la hoja de ruta. Por otro lado, como vimos, los tecnólogos e investigadores en MNT toman en cuenta los objetivos y prioridades de la hoja de ruta del ITRS (mientras critican sus efectos perversos). En ese sentido,

---

<sup>8</sup> Esto también muestra el artículo de Sydow et al. (2012) que examina la trayectoria de la litografía óptica y las dificultades asociadas a la aparición de tecnologías alternativas, debido a una "preferencia general por el cambio tecnológico más pequeño, barato y predecible" y a una "industria que no puede soportar la idea de desarrollar múltiples tecnologías diferentes que sirvan para el mismo propósito" (2012, p. 919).

la noción de ingeniería heterogénea resulta ser un concepto heurístico para mostrar el trabajo de alineación de un conjunto de restricciones internas y externas, que se imponen en la definición de nuevas orientaciones científicas y técnicas. Subraya el “trabajo de articulación” (Fujimura, 1987) que se lleva a cabo para hacer que un problema tecnocientífico sea considerado como “tratable” –es decir, manejable no solo en términos tecnocientíficos, sino también en función de limitaciones y oportunidades socioeconómicas y políticas.

### 4. Ingeniería heterogénea de dispositivos técnicos: las transferencias de tecnología

Como se ha mostrado en la sección anterior, la inclusión de una tecnología (dispositivo o método) en la hoja de ruta del ITRS tiene consecuencias en cuanto a la formulación de las agendas de I+D de las organizaciones industriales y académicas que actúan en el campo de las MNT. Sin embargo, esas agendas no son los únicos determinantes de las innovaciones que salen de esas mismas organizaciones. En esta sección, consideraremos las consecuencias prácticas –en particular en términos de diseño y experimentación- de la inclusión de una opción técnica en la hoja de ruta del ITRS, focalizando en lo que pasa en el caso de un laboratorio de MNT de la ciudad de Grenoble en Francia: ¿cómo se traducen las orientaciones tecnológicas en las prácticas diarias del laboratorio? Y, ¿cómo el concepto de ingeniería heterogénea ayuda a entender lo que está en juego en ese proceso de traducción?

Para responder a estas preguntas, consideraremos un ejemplo, el de la litografía de nanoimpresión, tal y como la practican los técnicos, ingenieros y científicos de ese laboratorio de investigación en MNT. Mostraremos que la inclusión de esta tecnología en la hoja de ruta modifica no solo su percepción, desde el laboratorio considerado, como una tecnología estratégica de las MNT, sino también sus propias características sociotécnicas. Al focalizarnos en esas características, queremos centrar la atención en los usos que los tecnólogos y científicos del laboratorio hacen de esa tecnología. Asimismo, queremos mostrar que estos usos pueden analizarse en términos de ingeniería heterogénea.

Las técnicas de nanoimpresión son relativamente recientes, ya que se mencionaron por primera vez a mediados de los años 90, una vez por un equipo de la Universidad de Minnesota, como técnica de impresión térmica, y una segunda vez por un equipo del Philips Research Lab, como técnica de impresión asistida por rayos ultravioleta. Desde 2003, la nanoimpresión está incluida en la hoja de ruta del ITRS como parte de “la familia de litografía avanzada que debe alcanzar una resolución de 32 nanómetros en 2013”, como señaló un científico del campo de las MNT en una conferencia en 2005 (Lyon, Francia). La idea es convertir la nanoimpresión como técnica de fabricación de (futuros) circuitos integrados, cuyo tamaño crítico debería seguir reduciéndose hasta los 32 nanómetros en 2013: “así que los plazos están ahí”, comenta el mismo científico. Gracias a su inclusión en la hoja de ruta, la nanoimpresión se perfila como una alternativa creíble a la fotolitografía (o litografía óptica). Sin embargo, la credibilidad que le otorga la inclusión en el ITRS no es suficiente en sí para convertirla en una tecnología de referencia, y aún falta gran parte del trabajo de diseño, ingeniería y experimentación en los laboratorios de MNT para transformarla en una tecnología adecuada para la industria micro y nanoelectrónica.

El cambio producido por la inclusión de la nanoimpresión en la hoja de ruta del ITRS puede caracterizarse de la siguiente manera. Antes, la nanoimpresión era una técnica relativamente confidencial, destinada a unas pocas aplicaciones marginales. Todavía era una técnica exploratoria, confinada al laboratorio, movilizaba por unos pocos investigadores que valoraban su simplicidad y su flexibilidad: era fácil de usar, práctica y “barata”, en comparación con la inversión y los importantes costos de mantenimiento que requieren las técnicas de litografía óptica. Para sus detractores, era poco prometedora, condenada a seguir siendo una herramienta de laboratorio, un “molde para gofres”, dicen algunos escépticos, o incluso una técnica del pasado: “al fin y al cabo, no es ni más ni menos que una técnica medieval que data de la imprenta de Gutenberg”, dice un joven científico (entrevista con becario doctoral, Grenoble, Francia).

¿Qué cambia, entonces, la inclusión de la nanoimpresión en la hoja de ruta del ITRS? Por supuesto, no cambian sus propiedades técnicas intrínsecas; lo que cambian son las características (sociotécnicas) que sus usuarios (los tecnólogos y científicos del laboratorio que investigamos) deben tener en cuenta para asegurar su posible recontextualización en otros ámbitos —y, en particular, en ámbitos industriales, ya que el principal desafío del ITRS es conseguir transferencias tecnológicas exitosas para el sector industrial. En una conferencia, una especialista en nanoimpresión del mismo laboratorio explica ese cambio, enumerando cuales son, según ella, las tres son las características esenciales para hacer de esta técnica una alternativa industrial creíble a la litografía óptica (notas de campo, Lyon, Francia).

Primero, para industrializarse y convertirse en una técnica de referencia de la industria, la nanoimpresión debe cumplir los estándares básicos del funcionamiento de este tipo de fábrica. Una de las normas más estructurantes de la industria microelectrónica es el tamaño de las “obleas” (placas) de silicio utilizadas como soporte de producción de los circuitos integrados. Desde los principios de los años 2000, se suelen utilizar obleas de 200 y 300 milímetros. Con estas dimensiones, la intensidad del tratamiento colectivo de los chips reunidos en una misma oblea corresponde a un compromiso aceptable entre las economías de escala (el coste del chip es tanto menor cuanto mayor es el número de chips por oblea) y la uniformidad de los chips producidos (es tanto más difícil producir los mismos chips cuanto mayor es el tamaño de la oblea). Por eso, al igual que con otras técnicas de litografía utilizadas para fabricar dispositivos micro y nanoelectrónicos, la uniformidad de la resolución de la máquina de nanoimpresión se convierte en un parámetro esencial. Por lo tanto, para transformar una técnica exploratoria a una técnica industrial, un primer cambio importante es el tamaño de las obleas utilizadas para calcular esta uniformidad y esa dupla (uniformidad-tamaño de la oblea de referencia) constituye una primera característica sociotécnica que condiciona la posibilidad de transferencia a la industria.

Segundo, la inclusión de la nanoimpresión en la hoja de ruta del ITRS significa que la “velocidad de procesamiento” también se está convirtiendo en una “cuestión clave” para cumplir los requisitos de productividad industrial, como lo explica la misma científica:

“La segunda característica muy interesante, siempre con vistas a la integración de estos procesos en la industria microelectrónica, es su velocidad, que es excelente, lo que parecerá extraño [...] sobre todo en comparación con el uso de la litografía electrónica, es decir, la escritura directa con un haz de electrones, que procesa de forma lineal, un chip tras otro, mientras que nuestra técnica de replicación procede de forma colectiva; así que ahí está el segundo punto fundamental” (grabación de campo, Lyon, Francia).

Dicho de otra manera, la capacidad de la nanoimpresión para procesar simultáneamente (y de manera uniforme) todos los chips ensamblados en la misma oblea le permiten cumplir con los requisitos de productividad industrial.

Tercero, la “reproducibilidad” del proceso de fabricación de una oblea a otra se convierte en una característica esencial para interesar y convencer a los fabricantes de micro y nanochips. Según la misma especialista, el cumplimiento de ese tercer requisito depende en gran medida de los resultados futuros del trabajo de “optimización” que están realizando los tecnólogos e científicos de su laboratorio: “Sobre el tema de la reproducibilidad, yo diría: es algo que se trabaja. Es ingeniería de moldes, ingeniería de procesos. La factibilidad y el alcance de los estudios necesarios dependerán del tipo de aplicación al que se dirige la industria” (grabación de campo, Lyon, Francia).

Finalmente, tras su inclusión en la hoja de ruta del ITRS, lo que se transforma son las características relevantes de la nanoimpresión. Esas características sociotécnicas no son la simple transposición de los objetivos definidos en la hoja de ruta, ya que esta técnica existía mucho antes de su inclusión en la hoja de ruta. Tampoco son la extensión de propiedades técnicas intrínsecas que habrían sido identificadas en el laboratorio antes de ser incluidas en la hoja de ruta. Más bien, esas características son traducidas, reformuladas y reelaboradas en el laboratorio para garantizar la posible recontextualización de la nanoimpresión en otros ámbitos y su transferencia hacia la industria. Este proceso es la condición para hacer de la nanoimpresión una tecnología de referencia que pueda circular fácilmente del mundo académico a la industria micro y nanoelectrónica. Esta circulación se verá facilitada no sólo porque se ha dado credibilidad a la nanoimpresión mediante su inclusión en la hoja de ruta, sino también porque se han redefinido sus características técnicas en términos de uniformidad de resolución, de velocidad de procesamiento y de reproducibilidad de una oblea a otra. Al trabajar para mejorar su rendimiento en términos de uniformidad, velocidad y reproducibilidad, las características sociotécnicas de la nanoimpresión se alinean con las expectativas y los objetivos del sector productivo considerado (sus estándares técnicos, en particular).

Este proceso de recalificación (o de recaracterización) de la nanoimpresión puede analizarse en términos de ingeniería heterogénea, ya que se trata de enriquecer sus características sociotécnicas vinculándolas a las condiciones de producción en serie y a las normas técnicas de la industria micro y nanoelectrónica. El concepto de ingeniería heterogénea subraya, pues, el cruce de “limitaciones múltiples” (Galison, 1997) que deben tenerse en cuenta y asociarse simultáneamente para industrializar un dispositivo experimental. También muestra que una técnica como la nanoimpresión no se impone sólo por sus propiedades intrínsecas, sino a través de un proceso de reformulación y traducción de sus características técnicas, en función de su (futuro) contexto de uso.

## 5. Ingeniería heterogénea de organizaciones de I+D: las plataformas tecnológicas

Como vimos, el concepto de ingeniería heterogénea es útil para dar cuenta de la diversidad de prácticas que implica las actividades de investigación e innovación en MNT, ya sea para analizar la conformación de una hoja de ruta o la producción de condiciones adecuadas para la

transferencia tecnológica. También es útil si cambiamos la mirada y consideramos la dimensión organizacional del trabajo tecnocientífico. Para ello, es interesante focalizar en el caso de las plataformas tecnológicas, que constituyen un ámbito privilegiado para organizar las actividades experimentales en el campo de las MNT y facilitar las relaciones entre ciencia e industrial (Merz y Biniok, 2010).

Las plataformas son infraestructuras de I+D diseñadas para abrir el uso de un conjunto de instrumentos y máquinas a usuarios externos –usuarios que pueden ser estudiantes, tecnólogos o científicos del sector público o privado. Para garantizar el buen funcionamiento de este tipo de infraestructura, algunos ingenieros, técnicos y administrativos están a cargo de la gestión y del mantenimiento de los equipamientos. Esto incluye mantener las relaciones con las instituciones que acogen la plataforma, buscar financiación externa, negociar con los proveedores de instrumentación y materiales (muestras, gases, líquidos, etc.), supervisar la instalación de nuevas máquinas e infraestructuras (salas limpias, losas flotantes, jaulas de Faraday, etc.), formalizar las buenas prácticas y establecer procedimientos para el acceso y la utilización de las máquinas, interactuar con los usuarios, mantener el estado de las instalaciones e instrumentos, evaluar las propuestas científicas de los usuarios potenciales en términos de factibilidad tecnológica y disponibilidad de las máquinas de la plataforma, gestionar los contratos de mantenimiento y supervisar su aplicación efectiva –entre muchas otras actividades más puntuales que jalonan la vida de una plataforma (Hubert, 2015).

Este “trabajo de organización” (de Terssac y Lalande, 2002) de las actividades experimentales constituye otra forma de ingeniería heterogénea en el campo de los MNT. Para este trabajo, los ingenieros y técnicos encargados de las plataformas movilizan competencias que van más allá de los conocimientos técnicos. Por ejemplo, las habilidades de comunicación desempeñan un papel fundamental a la hora de presentar el funcionamiento de una plataforma a un público de usuarios potenciales para convencerlos de realizar sus propias actividades experimentales en la plataforma.

Más allá de esas actividades de promoción y comunicación, otras formas de ingeniería heterogénea resultan aún más cruciales a la hora de crear una nueva plataforma. En particular, las reglas que organizan las actividades experimentales son el resultado de negociaciones en las que participan la mayoría de los actores de las plataformas (técnicos, ingenieros, administrativos, investigadores y estudiantes que utilizan las plataformas de forma puntual, proveedores de equipos, etc.). La observación de estas negociaciones permite entender las principales cuestiones y tensiones relativas al reparto de instrumentos y a la regulación de las actividades experimentales (Hubert, 2015): la gobernanza institucional y operativa de la plataforma; la posibilidad de diferenciar los espacios de trabajo experimentales (para la enseñanza, la investigación o la transferencia de tecnología a la industria); las condiciones de financiación sostenible y la posible contribución de los usuarios (cuyo importe puede depender, por ejemplo, del origen institucional de los usuarios); las normas de uso (incompatibilidades entre materiales debidas a una contaminación potencial, por ejemplo); los procedimientos administrativos y de acceso físico a la plataforma; los criterios de evaluación de los proyectos presentados por los usuarios; el papel concreto de los usuarios en la plataforma (formarlos y habilitarlos para realizar ellos mismos el trabajo experimental o delegar ese trabajo al personal técnico de la plataforma); las funciones respectivas de los técnicos de la plataforma y del personal técnico que trabaja para los proveedores de equipos en la puesta en marcha y el mantenimiento de las máquinas; las opciones



en cuanto a la gestión del conocimiento (garantizar la propiedad intelectual, mantener el secreto o compartir los conocimientos producidos).

Estas negociaciones pueden complicarse, o incluso volverse conflictivas, ya que los compromisos aceptables para todos no son necesariamente alcanzables. Esto suele pasar, en algunos casos, cuando los técnicos, ingenieros e investigadores se enfrentan a la dirección de la plataforma al respecto de sus prioridades: ¿habría que comprar una técnica experimental de nicho, que pocos laboratorios tienen, susceptible de interesar a unos pocos usuarios expertos en un campo emergente (la nanoimpresión en sus inicios, por ejemplo), o es preferible invertir en una máquina poco innovadora, que puede, sin embargo, interesar a muchos usuarios (un microscopio electrónico de barrido, por ejemplo)? Otro ejemplo de posible confrontación tiene que ver con la posibilidad de modificar los dispositivos experimentales de la plataforma, ya que algunos usuarios quieren explorar nuevas vías de experimentación (a través de bricolajes o de ajustes inusuales de los instrumentos), mientras que los técnicos e ingenieros de la plataforma (e incluso los fabricantes de equipos) quieren, en la medida de lo posible, limitar el uso de las máquinas a sus ajustes estándares, con el fin de evitar que se produzcan problemas técnicos imprevistos que den lugar a acciones de mantenimiento correctivo. Un tercer ejemplo, entre muchos otros, se refiere a las estrategias de innovación adoptadas. En efecto, quienes realizan investigaciones exploratorias quieren trabajar en obleas de bajo costo (100 milímetros de diámetro), sólo para hacer una prueba rápida y aproximada y así tener una idea preliminar de lo que podría pasar con un determinado proceso tecnológico, mientras que quienes se dedican a la transferencia tecnológica hacia la industria quieren trabajar respetando los estándares industriales que exigen invertir en costosas obleas de 200 o 300 milímetros (véase el apartado anterior).

Finalmente, en el caso de las plataformas, el concepto de ingeniería heterogénea es pertinente para dar cuenta de la gran variedad de prácticas a través de las cuales se conforma un “buen” ámbito de I+D –es decir, uno que se adapte a las necesidades y expectativas de los protagonistas: comunicar, negociar, regular, organizar y delegar el trabajo experimental son algunas de las múltiples actividades que técnicos, ingenieros e responsables administrativos y técnicos a cargo de las plataformas llevan a cabo para producir y mantener este tipo de infraestructura experimental abierta a una gran diversidad de usuarios. De este modo, el concepto de ingeniería heterogénea no sólo se refiere a lo que James Trevelyan denomina “coordinación técnica”, es decir, “trabajar con otros e influir en ellos para llevar a cabo concienzudamente determinadas tareas necesarias de acuerdo con un plan mutuamente acordado” (Trevelyan, 2007, p. 191), sino que también toma en cuenta la existencia de tensiones, desacuerdos y conflictos que pueden surgir de una redefinición de las normas, de la aparición de una nueva técnica o de una reconfiguración de las relaciones de poder (dentro de la plataforma o en sus relaciones con socios institucionales y usuarios externos).

## 6. Ingeniería heterogénea de problemas y soluciones tecnológicas: los programas colaborativos

La noción de ingeniería heterogénea arroja luz, como vimos, sobre la producción de condiciones técnicas y organizacionales favorables a la transferencia tecnológica. Asimismo, subraya la importancia de una gran diversidad de actividades sociotécnicas –ya sea que se trate de organizar,

negociar, comunicar, recalificar o articular distintas entidades vinculadas con el trabajo técnico. Para analizar más a fondo las dinámicas interinstitucionales que permiten la emergencia de una innovación técnica, veamos ahora el ejemplo de un programa colaborativo de investigación tecnológica destinado a diseñar y aplicar un nuevo dispositivo técnico: la punta de dedo digital. A partir de este caso, analizaremos cómo se diseña una nueva tecnología en el marco de este tipo de programa de I+D y cómo el concepto de ingeniería heterogénea ayuda a dar cuenta de las prácticas tecnocientíficas concretas en una situación de cooperación entre actores heterogéneos.

Los tecnólogos y científicos de un laboratorio de investigación en MNT, que llamamos Microsystems<sup>9</sup>, se ocupan de identificar nuevas oportunidades de desarrollo tecnológico. La supervivencia de su laboratorio depende de ello. Como especialistas en microsensores y microactuadores, notaron que el diseño de sensores táctiles podía ser un desarrollo importante dentro del campo de las MNT. Se dieron cuenta de que el tema del “tacto” apenas se había explorado y que, sin duda, constituiría una nueva frontera tecnológica para el desarrollo de sensores, en la encrucijada entre las cuestiones de investigación fundamental y un enorme potencial de aplicaciones industriales.

Dos de sus ingenieros decidieron embarcarse en un proyecto exploratorio. Su objetivo es imaginar un sensor táctil como concepto tecnológico y realizar un primer demostrador del que habrá que caracterizar las prestaciones efectivas. Como este proyecto está aún lejos de cualquier aplicación industrial y de las necesidades expresadas por la industria, los ingenieros están negociando, en su propia institución pública, la asignación de fondos que les permitan realizar trabajos de investigación tecnológica básica. Un ingeniero eléctrico del equipo, con diez años de experiencia en el campo de los sensores (materiales piezoeléctricos, microsensores de presión y fuerza, acelerómetros para medir las vibraciones), se hace cargo del proyecto. Con la ayuda de un técnico y el apoyo de una plataforma tecnológica que propone los mejores equipos en el campo de la microtecnología, comienzan reciclando un concepto que habían desarrollado para la industria del neumático: un sensor de fuerza para medir la deformación y la adherencia de los neumáticos de los coches. Trasladaron las especificaciones del proyecto anterior, que habían desarrollado en colaboración con la industria de los neumáticos de automoción, a un diseño de sensor táctil. Tienen el sensor fabricado por la plataforma tecnológica y lo prueban. Obtuvieron resultados interesantes y decidieron poner en marcha un proyecto en colaboración con un laboratorio de investigación física que trabaja en la fricción. Los dos laboratorios no tienen el mismo objetivo: la intención del laboratorio Microsystems es desarrollar sensores para luego transferirlos a la industria; el objetivo del laboratorio de física es utilizarlos como instrumentos de investigación.

En esa etapa preliminar del proyecto, el concepto de ingeniería heterogénea permite subrayar las traducciones que realizan los ingenieros para impulsar el desarrollo de los sensores táctiles, lo que implica un proceso de reformulación de sus características (sociotécnicas) en función de las colaboraciones en las que participan. El sensor se convierte en una herramienta de investigación y la colaboración inicial se convirtió en una red de cooperación científica europea que implicó la redacción de una propuesta de investigación para el programa de financiamiento “Medir lo imposible” (*Measuring the impossible*). Este programa trata de movilizar a investigadores e industriales para abordar el reto de medir las reacciones y sentimientos humanos: la

---

<sup>9</sup> Cambiamos el nombre del laboratorio para respetar el anonimato de las personas e instituciones mencionadas.

susceptibilidad individual a las enfermedades, los determinantes de la emoción musical, las cualidades sonoras de los objetos, el disfrute de los medios de comunicación (el placer de jugar), la calidad del aire percibida, la memoria de los testigos oculares, los sentimientos asociados a la textura, etc. El programa aborda las cuestiones de la “metrología emergente” debatidas en el Congreso Internacional de Metrología de 2007. Constituye un caso típico de I+D en MNT que, por su capacidad de producción y emisión de datos sobre los usuarios, plantean serios interrogantes sobre el control social de las personas por parte de otras personas, de las empresas o de los Estados.

Los tecnólogos del laboratorio Microsystems redefinen, traducen y articulan sus objetivos a una serie de argumentos relacionados con la percepción humana y los procesos cognitivos. Así, los sensores están cargados de significados por su inclusión en un programa europeo y su reto metrología relacionado con el ser humano. El proyecto europeo, dirigido por el *National Physical Laboratory* (centro líder en el Reino Unido para el desarrollo de técnicas de medición y que actúa como laboratorio nacional de normas técnicas del Reino Unido), reúne a seis institutos de investigación europeos y a un laboratorio de investigación industrial perteneciente a una empresa multinacional de productos sanitarios. Los equipos que participan en el consorcio son heterogéneos, con experiencia en medición física, instrumentación y microsistemas, neurociencia cognitiva, psicología y modelización matemática. Algunos están cerca de la industria, mientras que otros están más cerca de la investigación básica.

El abanico de sus intereses cognitivos es relativamente abierto. El laboratorio de metrología intenta garantizar la coherencia y la trazabilidad de las mediciones, incluso en el caso de las características subjetivas: aspecto y percepción visual, rugosidad, suavidad, dureza, sensaciones táctiles y térmicas. Busca métodos más adecuados para predecir la sensación de naturalidad con vistas a aplicarlos a nuevas situaciones. Como el laboratorio también tiene una amplia experiencia en el desarrollo de normas técnicas y estándares de referencia, está interesado en el desarrollo de materiales de prueba e instrumentos o métodos de medición. Asimismo, como también cuenta con cierta experiencia en matemáticas, simulación y extracción de datos, se compromete a analizar y modelizar los resultados de la investigación experimental realizada por los demás socios del proyecto. Relaciona la medición física con la percepción humana. Como ha participado en otro proyecto que utiliza un modelo de la respuesta visual humana a la luz, sugiere utilizar este modelo basado en la experiencia con la percepción visual. Además, al tener experiencia en la coordinación de proyectos de investigación en colaboración y contar con un sistema de gestión de la calidad con certificación ISO 9000, se encarga de la gestión del proyecto.

Así, la forma de la red y el contenido del proyecto van tomando forma según los intereses, las experiencias y las limitaciones de cada uno. El centro de investigación industrial asociado, por ejemplo, se ocupa principalmente del diseño de nuevos productos de cuidado personal y del hogar. Dos de sus equipos de investigación, que ya participan en la neurociencia cognitiva y la física sensorial, tienen experiencia en cognición y metrología. También cuentan con instalaciones experimentales especializadas para explorar las propiedades sensoriales de los materiales y las respuestas cognitivas. Están interesados en el desarrollo de materiales de prueba.

Uno de los grupos de investigación de la universidad se centra en la cognición (exploración de las bases neuronales y cognitivas del cerebro humano) y cuenta con electroencefalógrafos (EEG), técnicas de neuroimagen (escáneres) y cámaras de sonido atenuado para el estudio del comportamiento humano. Les interesan los sentidos visuales y táctiles y las interacciones entre

los modos sensoriales. También participa en estudios sobre el efecto de las lesiones corticales en la percepción táctil y visual y en el estudio del reconocimiento de objetos por parte de personas ciegas. Otro grupo de investigación académica trabaja en psicología experimental y neurociencia cognitiva, centrándose en los mecanismos perceptivos y cerebrales asociados al procesamiento sensorial humano (por ejemplo, las interacciones entre el tacto y la visión). Su experiencia en la medición psicofísica de los procesos perceptivos le lleva a participar en el desarrollo de procedimientos psicofísicos en la interfaz entre las mediciones físicas y la neuroimagen. Otro grupo de investigación universitario está especializado en el análisis de imágenes para aplicaciones alimentarias (mediciones del color de las flores y bioquímica de la materia vegetal).

En Francia, los dos laboratorios implicados, incluido el de los dos ingenieros mencionados, ya habían colaborado para desarrollar un sensor táctil. El laboratorio de física se dedica a la física de las superficies (mecánica de la adhesión y de la fricción) y dispone de equipos para producir sustratos y caracterizarlos. Está interesado en el diseño de un sensor táctil biomimético y en comprender los fenómenos que se producen entre un dedo y un sustrato. El otro laboratorio, que llamamos Microsystems, se centra en el desarrollo de nuevos sensores y su transferencia a la industria.

La articulación de las competencias, los recursos y las expectativas de cada uno de los socios, fruto de numerosas negociaciones y ajustes, va conformando la red y el contenido del proyecto. Encuentran complementariedades tales que los resultados producidos por uno se convierten en los recursos que necesitan los otros. Eligen el tema de la naturalidad porque su percepción, en el caso de los materiales, ha demostrado ser reproducible de una persona a otra, lo que es importante para los investigadores en neurociencia y psicología, porque significa que los procesos neuronales subyacentes tendrán una buena reproductibilidad y que los conocimientos que podrían publicar tendrían un alto impacto. La elección de la naturalidad también interesa al socio industrial implicado, ya que se podría aplicar a una amplia gama de productos de gran valor agregado. La naturalidad se constituye como un objeto-frontera (Star & Griesemer, 1989) entre los actores implicados. Los actores interesados en la diferenciación del material reflejan su interés por la variabilidad del sustrato; para ellos, la naturalidad es una característica entre otras. En cuanto a los ingenieros de Microsystems, no importa si el problema es la naturalidad; lo importante es tener la oportunidad de diseñar un sensor táctil según las especificaciones definidas por los demás miembros de la red.

Al definir la contribución y las competencias de todos los miembros de la red, éstos dan forma al objeto y viceversa. Negocian y establecen un objetivo común y su desglose en sub-objetivos y tareas. Poco a poco, surge una jerarquía de prioridades: comprender los procesos neuronales que intervienen en la percepción de la naturalidad; identificar en qué medida las propiedades de los materiales condicionan esta percepción; determinar las medidas más adecuadas para este proceso perceptivo y para la modelización de las relaciones entre las características físicas, las redes sensoriales y las funciones cognitivas con el fin de predecir la percepción humana de la naturalidad de los futuros productos. Dentro de esta configuración colectiva de las prioridades de investigación, el objetivo de los ingenieros de Microsystems (desarrollar nuevos sensores) no se considera una prioridad, sino sólo una sub-tarea útil. Cuando el proyecto es finalmente aceptado por este programa europeo, lo hace con un presupuesto significativamente reducido, lo que lleva al consorcio a abandonar el desarrollo de los sensores. Los ingenieros de Microsystems tuvieron que luchar y negociar para mantener su posición, su

contribución y su parte de la subvención. Anticipando que el campo del tacto será una preocupación industrial creciente, solicitan otros fondos para resolver algunos de los problemas tecnológicos relacionados con la realización de sensores. Tienen que defender y justificar su posición dentro de una red dominada por los investigadores de neurociencia y ciencia cognitiva.

Con el diseño de este nuevo dispositivo técnico, se abriría un nuevo campo de investigación e innovación para la medición de parámetros subjetivos de los que dependen muchas aplicaciones potenciales relacionadas con la calidad de los productos de alto valor agregado, su deseabilidad y las expectativas de los consumidores en términos de confort. El reto para las empresas industriales es predecir la reacción de los consumidores (gracias a métodos menos costosos y más rápidos que los paneles de consumo) ante los nuevos materiales, pero también combatir el fraude detectando materiales y productos falsificados. Los tecnólogos y científicos involucrados no sólo asocian el proyecto a la creencia de que los productos naturales (seda, cuero, nogal, palo de rosa, marfil) son muy valorados, sino también que son recursos naturales limitados. El proyecto abriría nuevas oportunidades para el desarrollo de materiales artificiales y la mejora del diseño de la moda y los productos de consumo. Preocupados por conducir al desarrollo industrial y económico, los miembros del consorcio vinculan el proyecto a la necesidad de definir normas con los organismos internacionales de normalización y al discurso general sobre la economía europea, que depende de su capacidad para diseñar productos de alta calidad y diferenciarlos de las imitaciones importadas de baja calidad. El establecimiento de un dedo digital se convierte así en un medio de protección de Europa frente a los países competidores (Downey, 1992). También vinculan el proyecto a retos globales como el desarrollo sostenible (diseñando productos artificiales para proteger los recursos naturales), la mejora del bienestar y la salud (a menudo asociados a la naturalidad) y la productividad (mediante el diseño de entornos de trabajo confortables).

Finalmente, la noción de ingeniería heterogénea resulta ser un concepto que permite analizar este trabajo de articulación y alineación de una serie de recursos y limitaciones para construir un problema movilizador y solucionable. Permite dar cuenta de las actividades de los tecnólogos y científicos, atrapados en una red de cooperación interinstitucional, cuyas orientaciones no se reducen a consideraciones puramente científicas y técnicas. Son el resultado de la construcción de compromisos y relaciones de poder entre actores heterogéneos en los que los ingenieros mencionados no están en posición de fuerza. Tienen que alinear e integrar su contribución dentro de una dinámica colectiva que en parte escapa a su control. Negocian y traducen sus conocimientos, sus recursos y su estrategia para no quedar excluidos de la red que está dando forma al nuevo dispositivo técnico.

## 7. Ingeniería heterogénea de infraestructuras sociotécnicas: las ciudades inteligentes (*smart city*)

El desarrollo de las MNT no sólo conduce a nuevos objetos, sino también a su proliferación y articulación produciendo nuevas infraestructuras en la sociedad. El ejemplo anterior, aunque se trataba de una amplia red heterogénea, seguía estando dentro del mundo de la I+D en torno a un dispositivo específico y sus aplicaciones locales. Veamos ahora lo que pasa en el caso de un programa europeo que lleva al desarrollo de una infraestructura sociotécnica formada por redes



de sensores muy dispersas con el objetivo final de desarrollar una versión de la “internet de las cosas” dedicada a entornos urbanos –lo que los expertos y promotores del dominio llaman *smart city*.

El sueño y el reto de los científicos y tecnólogos que están detrás de este proyecto europeo – el proyecto ESNA (*European Sensor Network Architecture*)- es integrar los mundos físicos y virtuales, colocando sensores en todos los objetos –o sea, autos, ropa, llaves, libros, casas o cualquier bien de consumo. El responsable del proyecto, en el que participan veinte laboratorios de investigación y empresas, afirma públicamente sus promesas: “hará que nuestra vida cotidiana sea más fácil, segura y eficiente”. El objetivo es construir una “inteligencia ambiental” en hogares y desarrollar “ciudades inteligentes” –o sea, ciudades “amigables”, gracias al uso de tecnologías fáciles de manejar, invisibles y autónomas que ayuden a las personas en tareas cotidianas como controlar a distancia la temperatura de su casa u obtener al instante ofertas de servicios en función de su ubicación e intereses.

El sistema debe ser capaz de manejar grandes cantidades de datos heterogéneos (*big data*) y visualizarlos de forma intuitiva para que el usuario pueda interactuar con ellos. Con esta “internet de las cosas” que mencionamos en la introducción, las consultas de los usuarios buscarían información de sensores dispersos e incrustados en bienes cotidianos. El reto técnico consiste en definir la mejor manera de conectar el mundo virtual con el mundo físico. Se plantea como un problema de articulación entre objetos de la vida cotidiana, parámetros, sensores y actuadores, datos, servidores y software, infraestructura informática, interfaces y usuarios con un objetivo a priori simple: que la mayoría de estas entidades se vuelven “transparentes” una para la otra –es decir, interconectadas de manera a transferir constantemente los datos de una entidad a las otras.

Para lograr una red de este tipo, los tecnólogos y científicos involucrados planean transformar las redes sociotécnicas preexistentes mediante la integración de interfaces, que adoptarían la forma de servicios (gratuitos o de pago, ofrecidos por empresas privadas o instituciones públicas). Servicios que proporcionen información comprensible o que conduzcan a una acción automática (por ejemplo, abrir una puerta), preservando la seguridad, la confianza y la privacidad de los ciudadanos. También imaginan al usuario potencial y lo configuran como una persona que hace preguntas a las máquinas, formuladas en lenguaje natural, para saber, por ejemplo, “¿cuál es la temperatura en la casa y en el pueblo donde vive sola mi abuela? “. La tecnología sería capaz de descifrar la pregunta, buscar y acceder a las redes de sensores pertinentes (por ejemplo, sensores en las calles y paradas de autobús, o incrustados en los autos que circulan por el pueblo, o distribuidos en la ropa de la abuela), verificar los datos de varias fuentes de información, estructurar una respuesta garantizando la confidencialidad de los datos y enviar la información al usuario, que puede decidir con quién compartirla.

El proyecto ESNA incluye la fabricación de un prototipo y la implementación de un experimento en una ciudad española, Santander, donde se están desplegando doce mil sensores para ayudar a “suavizar el flujo de tráfico en la ciudad” mediante el control de las ubicaciones de los estacionamientos y proporcionando a los conductores información sobre los lugares disponibles. Se espera que beneficie a los habitantes de esta “ciudad inteligente”, mientras que produce datos experimentales para los científicos y tecnólogos del proyecto. La red sociotécnica se está negociando con las autoridades locales y las empresas. El avance del proyecto implica conectar esa red a otras de sensores y actuadores para controlar el alumbrado público en función de la presencia o ausencia de personas en las calles o de la detección de un incidente, gracias a las

interfaces y conexiones que se están construyendo con los servicios públicos (policía, servicios de emergencia médica) y privados (distribución de energía eléctrica).

Se están llevando a cabo experimentos similares en otras ciudades de Europa. En Aarhus, el objetivo es disponer de una gestión inteligente y autónoma de las infraestructuras de agua y alcantarillado. En Berlín, la ciudad inteligente implica el desarrollo de una red de contenedores conectados a los servicios de gestión de residuos. En Birmingham, las infraestructuras y servicios de transporte (tranvías, autobuses, carriles para bicicletas, veredas y rutas) se están equipando para simplificar la transición entre modos de transporte, ahorrando tiempo a los usuarios. En estos proyectos participan no solo autoridades y servicios públicos, sino también grandes empresas industriales como Ericsson, SAP, Thales o Telefónica, que están integrando estas infraestructuras en sus planes de negocio y ofertas de servicios a las ciudades. Estas redes heterogéneas están remodelando gradualmente la ciudad y sus infraestructuras sociotécnicas.

Los tecnólogos y científicos que están detrás de su desarrollo afirman que, dentro de unos años, las computadoras personales estarán conectadas con más de mil dispositivos (otras computadoras, teléfonos, televisores, sensores dispersos en el cuerpo, la ropa, los autos, los hogares, etc.) para conectarlos en una “red de todo”. Están diseñando herramientas de redes personales en las que muchos dispositivos heterogéneos trabajarían juntos, proporcionando servicios personalizados y conectividad ubicua. En el marco del proyecto ESNA, están redactando informes, propuestas de I+D y planes de negocio, organizando demostraciones y presentaciones públicas, tratando de convencer a una gran variedad de actores potencialmente interesados para que compartan su visión del futuro de la ciudad. Trabajan para convencer a las autoridades públicas para que inviertan en estos proyectos que permitirían implementar una “red global personal adaptable”. Afirman que el número de dispositivos personales se multiplicará de forma espectacular en los próximos años. Anuncian una “federación” de redes personales y hablan de un usuario que podría controlar los dispositivos y la información a la que otras personas podrían acceder, mediante características de seguridad adaptadas.

Como ya mencionamos, el proyecto ESNA está preparando las redes de sensores inalámbricos que permitirán a los usuarios conectar cosas y personas en un “internet de las cosas”. Los responsables a cargo del proyecto prevén que, a partir de esa infraestructura, los objetos podrían comunicarse entre sí de modo que, por ejemplo: la ropa podría combinarse espontáneamente en color; una heladera y los armarios de la cocina podrían armar una lista de compras; los alimentos disponibles en el hogar podrían coordinarse sin intervención humana para definir una comida. Con etiquetas electrónicas equipadas con micro o nanosensores que puedan medir diferentes parámetros (humedad, luz, temperatura, presión, movimiento, etc.), los objetos, personas y lugares podrían producir información sobre lo que está presente, en movimiento, dañado, etc. Para ello, los científicos y tecnólogos del proyecto ESNA imaginan las expectativas (presentes y futuras) de los usuarios y desarrollan una plataforma multifuncional capaz de soportar diversas aplicaciones para satisfacer una amplia gama de usos posibles.

Esa difusión masiva de MNT capaces de interactuar a distancia extiende considerablemente la capacidad de coleccionar e intercambiar datos personales. Por lo tanto, como mencionamos al principio del texto, permite convertir los movimientos y actividades de cada ciudadano en algo completamente rastreable, posiblemente sin garantizar su anonimato. Aunque, desde principios de la década de 2000, académicos y agencias de regulación han advertido de los riesgos que suponen para el respeto de las libertades individuales, el desarrollo continuo de las MNT permite

(y, posiblemente, permitirá cada vez más) la proliferación de esos dispositivos invisibles que, cuando se interconectan en una misma infraestructura, podrían facilitar la vigilancia sistemática de las personas (Vinck y Hubert, 2017).

En este caso como en los otros casos estudiados, el concepto de ingeniería heterogénea es útil para captar las visiones y los imaginarios que guían a los tecnólogos y científicos en sus proyectos de transformación de la sociedad. Como en el caso de la expansión marítima portuguesa estudiada por John Law (1989), abarca un conjunto de prácticas de identificación de problemas, de movilización de expectativas (no necesariamente expresadas) y de proyecciones de posibles soluciones técnicas para imponer una visión de la sociedad futura sobre otras alternativas posibles.

## 8. Conclusión

Mientras algunos enfoques CTS como la teoría del actor-red han sido criticados por su incapacidad para producir mecanismos explicativos de las transiciones sociotécnicas (Geels, 2007), mostramos, en este texto, que dicha teoría puede dar cuenta de una transición sociotécnica completa, desde el diseño de hojas de rutas para los laboratorios de I+D hasta la inscripción de un nuevo conjunto de dispositivos técnicos en la sociedad, sin renunciar a “seguir los actores” (Latour, 2006) y sus prácticas concretas y situadas. Para eso, analizamos las MNT como un caso de transición y movilizamos el concepto de “ingeniería heterogénea” (Law, 1989) para explicar la capacidad de transformación social de las prácticas tecnocientíficas en varios sitios claves de dicha transición: comités internacionales donde hojas de ruta se definen; laboratorios donde se diseñan nuevos dispositivos técnicos y se producen condiciones adecuadas para la transferencia tecnológica; plataformas de experimentación y vinculación con la industria; grandes programas de I+D donde académicos e industriales imaginan los usos de esos nuevos dispositivos y dan forma a nuevas infraestructuras sociotécnicas. La articulación de esos estudios de casos provee algunas pistas para analizar los procesos de transición hacia el uso masivo de las MNT, su difusión masiva en las sociedades contemporáneas y sus posibles impactos en términos de vigilancia digital y control social.

A través de los cinco casos presentados en este artículo, damos una idea de la variedad de lugares en los que se producen esos procesos de ingeniería heterogénea. Una heterogeneidad que tiene que ver no sólo con la diversidad de las situaciones de trabajo, sino también con las prácticas tecnocientíficas involucradas y con los conocimientos desarrollados y movilizados. En cada caso considerado, la noción de ingeniería heterogénea llama la atención sobre la gran variedad de los procesos estudiados –procesos que implican una multitud de actividades por parte de los técnicos, ingenieros y científicos (negociar, convencer, organizar, coordinar, etc.) que van más allá de la invención y producción de nuevos objetos y estándares técnicos (Vinck, 2003). Esos procesos son centrales en la reconfiguración de las redes sociotécnicas existentes y, eventualmente, la estabilización y consolidación de un nuevo régimen sociotécnico dominante (Geels, 2002). Por ello, merecen toda nuestra atención en el estudio de una transición marcada por la convergencia entre MNT y tecnologías digitales.

## Referencias

Bijker W. E., Hughes T. P., Pinch T. (eds.) (1987). *The Social Constructions of Technological Systems*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.

Callon M. (1986). Éléments pour une sociologie de la traduction. La domestication des coquilles Saint-Jacques et des marins-pêcheurs dans la baie de Saint-Brieuc, *L'Année sociologique*, 36, 169-208.

Devalan P. (2006). *L'innovation de rupture. Clé de la compétitivité*. Paris : Lavoisier.

Downey G. (1992). CAD/CAM saves the nation? Towards an anthropology of technology. In: Hess D., Layne L. (eds). *Knowledge and society: the anthropology of science and technology*. London: JAI Press Ltd., 142-168.

Fujimura J. (1987). Constructing “Do-able” Problems in Cancer Research. Articulating alignment. *Social Studies of Science*, 17(2), 257-293.

Galison P. (1997). *Image and logic. Material culture of microphysics*. Chicago: The University of Chicago Press.

Geels F. W. (2002). Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: A multi-level perspective and a case-study. *Research Policy*, 31 (8/9), 1257-1274.

Geels F. W. (2007). Feelings of Discontent and the Promise of Middle Range Theory for STS: Examples from Technology Dynamics. *Science, Technology & Human Values*, 32 (6), 627-651.

Greengard S. (2015). *Internet of things*. Cambridge, MA: MIT Press

Hine C. (2007). Multi-sited Ethnography as a Middle Range Methodology for contemporary STS. *Science, Technology, and Human Values*, 32 (6), 652-671.

Hoefflinger B. (2012). ITRS: The International Technology Roadmap for Semiconductor. In: Hoefflinger B. (ed.). *Chips 2020: A Guide to the Future of Nanoelectronics*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 161-174.

Hubert M. (2014). Dr. Latour & Mr. Lab : comment concilier étude de laboratoire et théorie de l'acteur-réseau ?, in: Claire Tollis et al. (dir.). *L'effet Latour – Ses modes d'existence dans les travaux doctoraux*. Paris: Editions Glyphe, 208-223.

Hubert M. (2015). Entre mutualisation des infrastructures et diversité des usages. Le travail de mise en plateforme dans les micro- et nanotechnologies. *Revue d'anthropologie des connaissances* 9 (4), 467-486 [<http://www.cairn.info/revue-anthropologie-des-connaissances-2015-4-page-467.htm>].

Hughes T. P. (1983). *Networks of power: Electrification in Western society, 1880-1930*. Baltimore: Johns Hopkins University Press.

Latour B. (2006). *Changer de société, refaire de la sociologie*. Paris: La Découverte.

Law J. (1989). Technology and heterogeneous engineering: the case of Portuguese expansion, In: Bijker W., Hughes T., Pinch T. (eds.) *The social construction of technological systems. New directions in the sociology and history of technology*. Massachusetts: MIT Press. 111-134.

Merz M., Biniok P. (2010). How Technological Platforms Reconfigure Science-Industry Relations: The Case of Micro- and Nanotechnology. *Minerva* (48), 105-124.

Shinn T., Ragouet P. (2005). *Controverses sur la science. Pour une sociologie transversaliste de l'activité scientifique*. Paris: Raisons d'agir.

Star S. L., Griesemer J. (1989). Institutionnal ecology, 'translations' and boundary objects: amateurs and professionals on Berkeley's museum of vertebrate zoology. *Social Studies of Science*. 19, 387-420.

Sydow J., Windeler A., Schubert C., Möllering G. (2012). Organizing R&D Consortia for Path Creation and Extension: The Case of Semiconductor Manufacturing Technologies. *Organization Studies*, 33 (7), 907-936.

Terzacc (de) G., Lalande K., 2002. *Du train à vapeur au TGV. Sociologie du travail d'organisation*. Paris: PUF.

Trevelyan J. (2007). Technical Coordination in Engineering Practice. *Journal of Engineering Education*. (July), 191-204.

Vinck D. (éd.) (2003). *Everyday engineering. An ethnography of design and innovation*. Cambridge, MA: MIT Press.

Vinck D. (2010). The "Enterprise of Science": Construction and Reconstruction of Social Capital Around Nano R&D". *International Journal of Nanotechnology*, 7 (2/3), 121-136.

Vinck D., Hubert M. (2017). *Nanotechnologies : l'invisible révolution. Au-delà des idées reçues*. Paris: Editions Le Cavalier Bleu.

Willyard C., Mclees C. (1987). Motorola's technology roadmap process. *Research Management*. (September-October), 13-19.

Zuboff S. (2019). *The Age of Surveillance Capitalism: The Fight for a Human Future at the New Frontier of Power*. Londres: Profile Books.